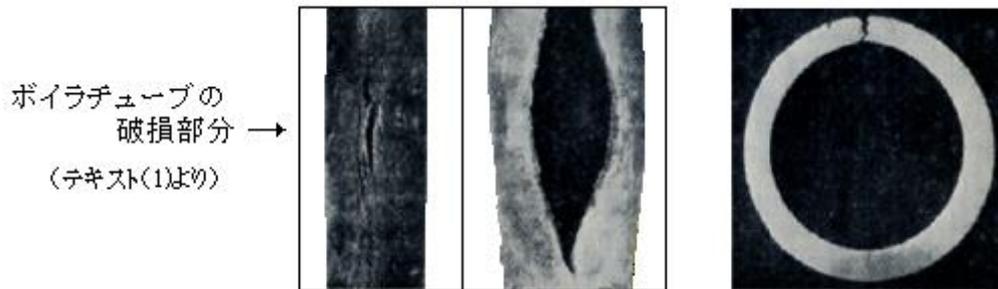


【整番】 SE-05-TM-001	【標題】 構造物設計で遭遇するクリープ問題—LM 式の運用ほか
分類：構造(高温強度)/種別：技術メモ	作成年月：H23.2/改訂：Ver0.0 (H23.3) 作成者：N.Miyamoto

全 28 枚



1. はじめに

炭素鋼で 350℃以上、ステンレス鋼で 430℃以上の構造物では、高温クリープが著しく進行するが、規格の許容応力表にはクリープ領域の許容応力も含まれているので、設計温度に対して許容応力が記載された材料を選び、その許容応力に準じ構造物の肉厚寸法を決め設計を進めればいいので、特に設計に特別な配慮が必要という訳ではない(しかし使用条件が複雑になるとそうとばかりは云ってられない)。

例えば JIS 圧力容器規格で規定される許容応力の実際は次のようになる[補足(1)参照]。

- ・通常領域： [降伏応力・引張強さベースの許容応力]
- ・クリープ領域： [クリープ破断応力ベースの許容応力]

降伏応力・引張強さは短時間の機械試験に、クリープ破断応力は長時間の高温クリープ試験に拠っている。規格の許容応力表では温度別に許容応力値が表示されており、許容応力値が急にダウンし始める温度がほぼクリープ領域の始まりとみていい。この場合、設計者が注目すべきはクリープ領域の許容応力(クリープ破断応力)が温度依存であるとともに、時間依存であることである。

規格の許容応力規定を見てほしい[補足(1)参照]。クリープ域の許容応力が **10 万時間(10⁵ hr)**の高温使用時間を前提にしていることに気付くと思う。もしも使用時間が 1 万時間(10⁴hr)であれば、材料の**高温劣化**の時間累積は少ないので、クリープ破断は起きない。クリープ破断を起こすにはもっと大きな応力あるいはもっと高い材料温度が必要である。

破断応力—材料温度—破断時間は密接にリンクしている。破断応力は実質上の許容応力を、材料温度は設備の運転温度を、破断時間は設備の寿命時間を代弁しているので、**クリープ領域では 許容応力—運転温度—寿命時間(あるいは単に応力—温度—時間)をワンセットとして考える必要がある。**

また、この応力の時間依存によって**累積損傷**という概念が派生する。クリープ破断応力ベースでは、ひずみは降伏応力・引張強さベースのように弾性ひずみとして運転停止と共に解消することはなく、クリープひずみとして残り負荷のたびに(運転のたびに)増えてゆく(累積してゆく)からである。前述の**高温劣化の主体はこの累積したクリープひずみ**である。特に温度条件や負荷条件が変動する時は、**応力—温度—時間** を考慮して累積損傷をカウントする必要がある。

本 TS では、まず最初に**クリープ問題の概要**、次いで設計課題の解決に有効な **Larson-Miller 法の運用**、更に設計における **Larson-Miller 法の 2 つの運用例 (SS400 クリープ強度検討/ ASME B31.3**

付属書V)について述べてみたい。

2. クリープ問題の概要と設計対応

初めに、クリープ問題について、テキスト(1)(2)をベースにしてややマクロ的な説明を試みる。

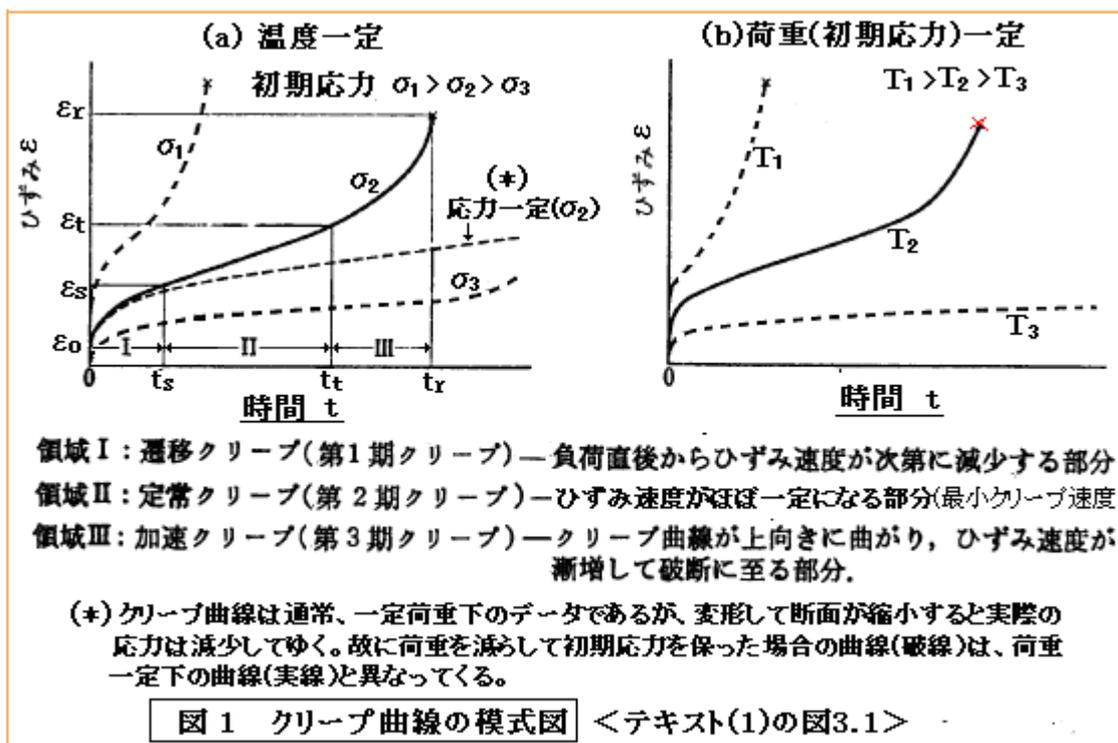
- (1) 高温で使用される構造材が時間経過とともに変形して比較的低い応力で破断する現象はよく知られており、クリープ破断と呼ばれている。高温下で起きる現象にはいろんなものがあるが、このクリープという言葉は、特に強度の観点から高温における種々の材料劣化を総括しているとみていい。従って、クリープが介在して長期的に使用される高温構造物を設計する場合は、圧力/重量など長期持続型荷重(機械荷重)から生じる1次応力を、クリープ破断を考慮した基本許容引張応力以下に制限する必要がある。

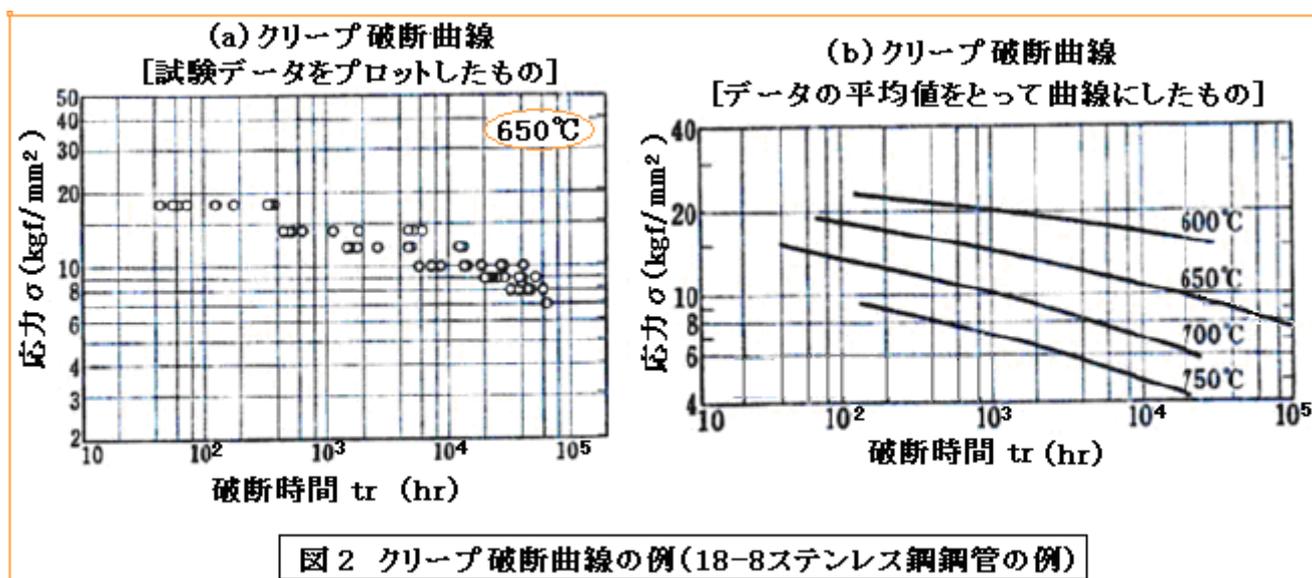
ただ構造設計の観点からはクリープだけが高温強度ではない。工業分野で問題になる高温強度現象を要約して添付 X1 に示す。この表の(1a)は「クリープ破断及びクリープ」、(1b)は「引張変形及び引張破断」である。これらは、前述の一次応力の制限(許容応力)と次のような関係がある。

- ・クリープの影響がまだ少ない時：(1b)の引張変形/引張破断が許容応力のベース
 - ・クリープの影響が大きい時：(1b)の引張変形/引張破断と(1a)のクリープ破断が許容応力のベース
- (1b)は本来、短時間強度であり、そのまま保持し続けると(1a)になる。(1a)は長時間強度である。

添付 X1 の(2a)以下にはやや特異な現象も含まれるが、主に応力(ひずみ)のくり返しに関連して起きる現象である。(1c)(5Aa)(5b)等がひずみ制限(評価)に、(3a)(3b)(4)等がクリープ-疲れ制限(評価)に関係する。後者のクリープ-疲れはクリープと疲労の相互作用に由るものでクリープ破断とリンクしている。

- (2) クリープの強度特性は、一定荷重を長時間負荷して得られる一軸引張クリープ試験の結果をまとめたクリープ曲線ないしクリープ破断曲線で表わされる。図1にクリープ曲線の模式、図2にクリープ破断曲線の例を示す





クリープ曲線はクリープ進行の経過を示しており、各時刻におけるひずみ量を知ることができる。ある応力を持続して負荷した状態では、経過時間によってクリープひずみは変化する。はじめは急激に頭われるが、すぐ減速して一定の速度で保持され、末期において加速されて破断する。

通常的设计では、クリープ破断曲線の方が重要である。図2はSUS材のクリープ破断曲線を示している。当然、いずれの温度でも応力が大きいと破断時間は短い。また温度が高いほど同じ応力に対して破断時間が短い。压力容器規格では、破断時間が 10^5 hrであれば、通常的设计寿命(10~15年)にマッチすると考えて(推定)、 10^5 hrの破断データをベースに許容応力を設定している。圧力配管規格も殆ど然り。

- (3) 図2の破断曲線を見ると、650°Cのデータは 10^5 hrまでであるが、例えば600°C- 10^5 hrデータはないので、その条件で設備を検討することが出来ない。高温構造設計ではこの種のクレームはよくある。この場合、新たにクリープ試験を行うことなく、次のような手段で破断応力を推定することが可能である。

- ① 統計処理で回帰曲線を求め外挿する。
- ② パラメータ P を用いて外挿する。

①は通常の統計的な手法である。②は、 P と σ の関係が図3のように1本の線、折線あるいは曲線で表わせるようなパラメータを用いて外挿(場合によっては内挿)を行うもの。これには表1に示すようなパラメータが用いられている。これらパラメータは殆ど差がなく何れを用いてもよいが、特にLarson-Millerのパラメータが最もよく用いられている。

Larson-Miller法は、破断応力-材料温度-破断時間の相関関係を簡単な代数式で表現する。通常、破断応力は規格に拠らない実質的な許容応力(あるいは最大発生応力)に、材料温度は設備の運転温度に、破断時間は設備の寿命時間に置き換えることができる。いずれにしても、その3つの変数のうち、2つが固定できれば、容易に他の一つの変数の値を知ることができる。これは、温度や荷重(応力)のいろんなバリエーションに対して設計の自由度を拓ける。これについては次の3項で詳しく述べる。

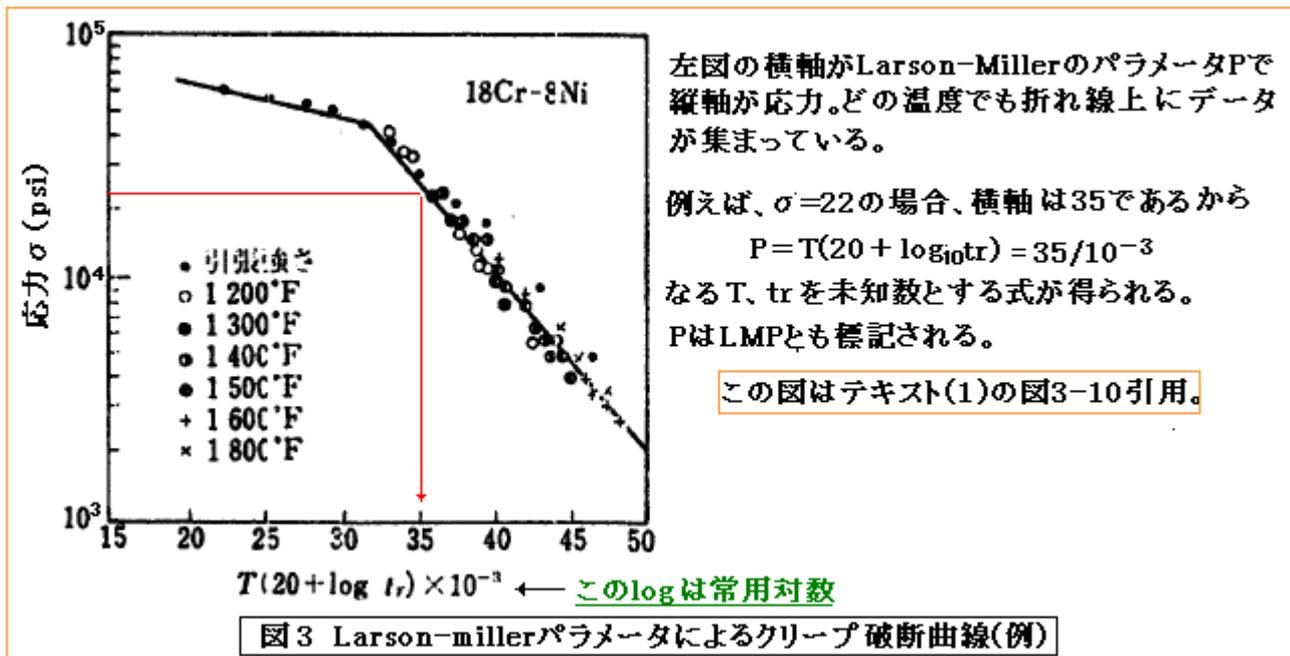


表1 3種類のクリープ破断強度外挿法 (テキスト(1)の表3.1引用)

外挿法	パラメータ	特徴
Larson-Miller	$P = T(C + \log t_r)$ T: °K, t_r : hr	定数Cが1個。Larson and MillerはC=20としたが、材料によって必ずしも20が最適とは限らない。log t_r -1/T線図が図3-9(a)のようになる場合、1/T=0でCの値が決められる。例: 図3-10
Sherby-Dorn	$P = \log t_r - \frac{Q}{RT}$ T: °K, t_r : hr R: ガス定数	定数Qが1個。DornらによればQはクリープの活性化エネルギーを表わすが、一般には応力の関数となる。log t_r -1/T線図が図3-9(b)のようになる場合、直線のこう配からQの値が決められる。
Manson-Haferd	$P = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a}$	定数が t_a と T_a の2個。したがってデータをパラメータPで整理する際のあてはめ性がよい。log t_r -T線図が図3-9(c)のようになる場合、各直線の交点より t_a 、 T_a が決められる。

(4) クリープひずみは1次応力のみならず2次応力でも派生するが、リラクセーション(弛緩)によって応力が緩和するので、直接クリープ破断に影響を及ぼすことは少ない。従って1次応力下のクリープ進行をカウントするのが設計課題になる。冒頭で述べた通りクリープひずみは時間に比例する形で損傷が累積され、その累積損傷量が限界に達すると引張応力よりも低い応力で破断するので、温度/圧力など使用条件が変化するときはその累積損傷量をカウントして限界値と比較する必要がある。即ち

$$D_{c1} = \sum (t_i / t_{ri}) \leq B \quad \text{-----(3)}$$

ここで、 D_{c1} =1次応力に対するクリープ損傷係数、B=クリープ破断に関する制限値(≤ 1.0)
 t_i =i番目の使用条件における保持時間(hr)、 t_{ri} =i番目の使用条件における破断時間(hr)
 サフィックス i=使用条件(温度,機械荷重)番号[=1,2,3...I(Iは使用条件の総数)]

この式で、制限値Bは、専らクリープ破断のみを考えるとときは1.0である。ところが、実際にはこのクリープ損傷は疲労損傷と重畳する。故に両者の累積損傷量の和をチェックする必要がある。即ち

$$D = (D_{c1} + D_{c2}) + D_f \leq 1.0 \quad \text{-----}(4)$$

ここで D_{c2} =2次応力に対する緩和クリープ損傷係数、 D_f =疲労損傷係数、 D =クリープ疲れ損傷係数 D_{c2} は前述のリラクセーションの結果である。(4)式によれば、制限値は $B \leq [1.0 - (D_{c2} + D_f)]$ である。即ち緩和クリープによる損傷係数 D_{c2} と疲労損傷係数 D_f に依存して変化する。

ただ緩和クリープはもともと小さく、温度変化サイクルが少なく、熱膨張拘束等による2次応力が通常レベルならば累積された D_{c2} は無視できるように思う。また同様に温度変化サイクルに左右される D_f も、規格に準じた構造で作られ、そのサイクル数が少なければ無視できる。

因みに5項で紹介するASME B31.3 付属書 V は、クリープ進行と同期する温度変化サイクルが100回を超えないときはクリープ-疲れの相互作用を無視している。その場合は $B=1.0$ であってかつ(4)式のクリープ-疲れ評価は不要になる。これは、規格許容応力が本来持っているマージンに負う所がある(補足(2)参照)。しかしサイクル数が多くてクリープとの相互作用が懸念される時は、(4)式の適用にならざるを得ない。ただクリープ疲れについては Nuclear 関係の Code Case や高速増殖炉関係の設計規準以外、明確な評価方法は示されていないのが現状である(但しボイラ関係は未調査)。

なお厳密に言えば、クリープ-疲れ損傷は(1次+2次)応力制限とも関連する。クリープ領域での(1次+2次)応力の制限はクリープひずみの介在で非クリープ域(通常領域)の制限と異なってくると思われる。しかし、配管は圧力容器に比べ(1次+2次)応力が大きくなるが、例えばASME B31.3では、通常領域と異なる制限は用いておらず 10^5hr ベースの許容応力を用いた許容変位応力範囲 S_A が適用されている。圧力容器も基本的には同じ運用か(?)と思われる。

【現在、動力関係/高圧技術関係については未調査。必ず何らかの提案やルールがあるはずなので追々、これらを調べ、クリープ領域の(1次+2次)応力強さ制限やクリープ-疲れ制限をまとめたい。実務上はASME Sect.IIIのCode Caseが有効である。】

3. Larson-Miller 法とその運用

(1) 前述のLarson-Miller法は、当該ケースのクリープデータがないときの有力な設計手段として有効である。それは下記の簡単な代数式で与えられる。

$$LMP = (T + 273.15)(C + \log_{10} t_r) \quad \text{-----}(1)$$

ここで LMP =Larson-Miller パラメータ、 T =材料温度($^{\circ}\text{C}$)、 t_r =破断時間(hr)、 C =材料定数(-)

なお C は、左辺の LMP を算定するための LMP -応力関係式のベースとなった値を採る。

通常 LMP は、図3に示すように右下がり、破断応力が低くなるほど LMP は増加する。これを(1)式でみると、右辺の材料温度あるいは破断時間が増加すれば左辺の LMP は増加して、破断応力は低下することになる(破断しやすくなる)。(1)式の傾向は感覚的に理解できると思う。

左辺の LMP は図3のようにクリープ破断応力 S によって決まる。典型的な LMP -応力関係式は、

$$LMP = b_0 + b_1 \log_{10} S + b_2 (\log_{10} S)^2 + b_3 (\log_{10} S)^3 + b_4 (\log_{10} S)^4 + \dots \quad \text{-----}(2)$$

になる。例えば後述のNIMSデータによれば、ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 STB410 の場合⁽⁶⁾、

$$b_0, b_1, b_2, b_3 = \text{材料による定数}(1.236112 \times 10^5, -1.478190 \times 10^5, 6.813408 \times 10^4, -1.071554 \times 10^4)$$

即ち(2)式右辺第4項までで、フィットカーブ(平均曲線)式が与えられる。

前項の(3)でも述べたように(1)(2)式を用いれば、クリープ領域における任意の温度-応力-時間に対して、許容応力、寿命時間ないし運転温度が得られるので、設計上、大変有益である。

ただ問題は、特定の材料に対する(2)式の導入である。クリープ破断試験によるクリープ破断データは当然ながら溶解番号毎にばらつく。規格のクリープ領域の許容応力は、破断データの平均値または最小値にそれぞれ異なる補正係数(<1.0)をかけて一定の裕度をもたせて、そのいずれか小さい方を採っている。規格と同程度の裕度を持たせることは意義があるので[補足(2)参照]、この場合のLMP-応力関係式は、平均値と最小値について、あるいは少なくとも最小値について設定すべきである。

物質・材料研究機構 NIMS(旧金材研)は、主要な JIS 材料についてクリープ試験データを発行しているので、その破断データを用いて LMP-応力関係式を作ることができる。ただフィットカーブ式を作るのは煩雑なので、データが比較的密である場合は、統計的手法で得られた平均値あるいは最小値をプロットして繋ぎ、平均値曲線/最小値曲線として使用する方が便利だと思う。

なお規格の場合、補正係数は、平均値に対し 0.67(2/3)、最小値に対し 0.8 をとって、夫々の値に乗じている。おそらく、後者の $1/0.8=1.25$ が規格許容応力(10⁵hr ベース)の実質的裕度になるのではないかと思う。

(2) LMP 式と LMP-平均/最小応力関係式(あるいは平均値/最小値曲線)を用いて許容応力/寿命時間/運転温度を設定する手順を以下に示す。

- 許容応力の設定：① 寿命時間→破断時間、運転温度→材料温度とし、(1)式から LMP 値を求める。
 ② LMP-平均応力関係式から破断応力 S をトライ&エラーで求める。
 ③ 同様に LMP-最小応力関係式から破断応力 S をトライ&エラーで求める。
 ④ ②から得られた値に 0.67、③から得られた値に 0.8 をかけその小さい方を当該寿命時間/運転温度における許容応力とする。

- 寿命時間の設定：① 発生応力の 1.5(1/0.67) 倍を用い LMP-平均応力関係式から、また発生応力の 1.25(1/0.8)倍を用い LMP-最小応力関係式から、夫々の LMP 値を求め、その小さい方を採る。
 ② (1)式を変形した下記の式から破断時間 t_r を求める。

$$t_r=10^a \quad \text{但し } a=LMP/(T+273.15)-C$$

 ③ 破断時間 t_r を、当該発生応力/運転温度における寿命時間とする。

- 運転温度の設定：① 上記と同様に各 LMP 値を求め、その小さい方を採る。
 ② (1)式を変形した下記の式から材料温度を求める。

$$T=LMP/(C+\log_{10}t_r)-273.15$$

- ③ 得られた材料温度を、当該発生応力/寿命時間における運転温度とする。

例えば、STB410 材で発生応力の 50MPa のときの運転温度を設定してみる。但し平均値ベース

の方が LMP 値が小さいとする。S=1.5x50=75MPa として(2)式を用い、NIMS のデータから、

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= 1.236112 \times 10^5 - 1.478190 \times 10^5 \log_{10} 75 + 6.813408 \times 10^4 (\log_{10} 75)^2 - 1.071554 \times 10^4 (\log_{10} 75)^3 \\ &= 15349 \end{aligned}$$

想定破断時間を JIS 圧力容器規格と同じく $t_r = 10^5 \text{hr}$ とすれば、(1)式を変形して、

$$T = \text{LMP} / (C + \log_{10} t_r) - 273.15 = 15349 / (15.753 + 5) - 273.15 = 466^\circ\text{C}$$

JIS の許容応力表は 466°C の場合、許容応力は内挿して 51.9MPa である。この許容応力は 67% で設定されているので、実質の許容応力は $51.9 / 0.67 = 77.5 \text{MPa}$ であって、計算前提にだいたい符合している。

[以上の計算で用いた材料定数 $C = 15.753$ は、NIMS のクリープデータシートによる。]

(3) 材料によっては(2)式のような LMP-応力関係式が見当たらない時もある。そのときは、規格の許容応力表を利用して、その応力値に対する LMP 値を求める方法がある。その手順は次のようになる。

- まず、発生応力 S が許容応力表の隣り合う 2 つのコラム [S_1, S_2] の間にあるとき、次の式から仮想の材料温度 T^* (\neq 実際の材料温度) を求める。なお $S_1 > S_2$ で、温度 T_1, T_2 は S_1, S_2 に対応。

$$T^* = T_1 + \{(S_1 - S) / (S_1 - S_2)\} (T_2 - T_1)$$

- 次に破断時間は規格では 10^5hr であるから $t_r = 10^5 \text{hr}$ とおく。また材料定数 C は下記による。

$$C = 20 \quad (\text{炭素鋼, 低合金鋼および中合金鋼のとき})$$

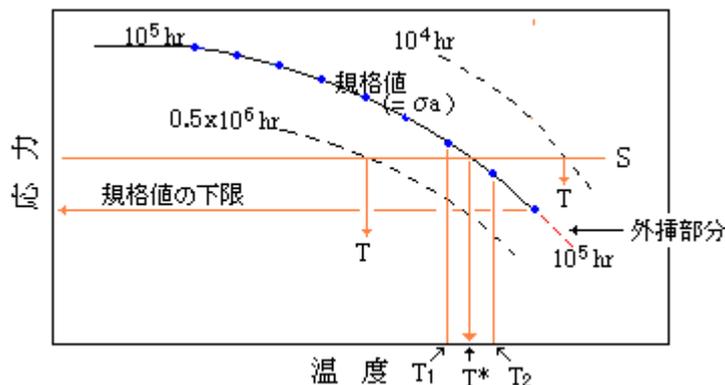
$$C = 15 \quad (\text{オーステナイトステンレス鋼及び高ニッケル合金鋼のとき})$$

- 以上の T^* 、 t_r 及び C を、(1)式に代入して応力 $1.5S / 1.25S$ の LMP 値を求める。例えば炭素鋼では

$$\text{LMP} = (T^* + 273.15)(20 + 5)$$

このようにして得られた LMP 値は、前項の LMP-応力関係式で得られる(1)式左辺の LMP 値と等価である。この LMP を用いて最大限の運転温度、寿命時間を算出できるが、これは全て規格と同等の補正をベースしたものである。即ち規格の許容応力表を利用するケースでは、前(2)項のように、応力値に $1.5 / 1.25$ を乗じて LMP 値を算定する必要がない。非常に便利である。ただ規格表で与えられる最小の応力より低い応力に対しては、外挿による以外 LMP 値を求めることができないので、適用は多少、限定される(なお過剰な外挿は不可)。

下図はある破断時間に対する応力 - 温度関係の傾向を示している。例えば規格の破断時間 10^5hr より長い $0.5 \times 10^6 \text{hr}$ のときは、図のように破断曲線は規格曲線の内側になり、同じ応力に対しては材料温度 T は減少する。また破断時間が 10^4hr と 10^5hr よりも低くなると破断曲線は規格曲線の外側になり、同じ応力では材料温度は大きくなる。



許容応力/寿命時間/運転温度の設定手順は前(2)項に準じる。ここで、JISのSB410材のLMPを求めてみる。 $S=22\text{MPa}$ とすると、許容応力表より $S_1=24$ 、 $T_1=525$ 、 $S_2=18$ 、 $T_2=550$ であるから、

$$T^*=T_1+\{(S_1-S)/(S_1-S_2)\}(T_2-T_1)=525+(24-22)/(24-18)(550-525)=533.3^\circ\text{C}$$

故に、 $LMP=(T^*+273.15)(20+5)=(533.3+273.15)\times 25=20162$

因みに、材料温度 575°C の時の破断時間は、

$$a=LMP/(T+273)-C=20162/(575+273.15)-20=3.77$$

よって、 $t_r=10^{3.77}=5884\text{hr}$ となる。従って、運転温度 575°C 、発生応力 22MPa に対して 5884hr の寿命時間が許容できる。高温なるほど温度に敏感になり、寿命が短くなる。

【なおこの検討では材料定数 C を 20 としているのは、ASME系の規格では炭素鋼について $C=20$ が採られているからである(5.項のチャートの脚注を参照のこと)。】

(4) 高温構造物の評価は2項の(4)で述べたように累積損傷評価も含んでいる。この場合もLarson-Miller法は各使用条件におけるクリープ破断時間を算定する上で有効である。得られた破断時間をもって累積損傷をカウントする。以下に、**使用条件(機械荷重/温度/保持時間)および荷重サイクル条件(応力範囲/くり返し回数)から構造設計の可否を判断する検討手順**を、ひとつの参考として例示する。なおここでは、

- ・直接利用できるようなクリープデータがない場合であって
- ・荷重サイクルのくり返し回数が多く疲労の影響が無視できない耐圧構造

を仮定する。手順のステップは、次の通り。

(S1) まず、規格計算やFEM解析等で、各使用条件につき内圧/重量など機械荷重による1次応力を計算し、その時の許容応力 S_{ai} を満たしているかチェックする。

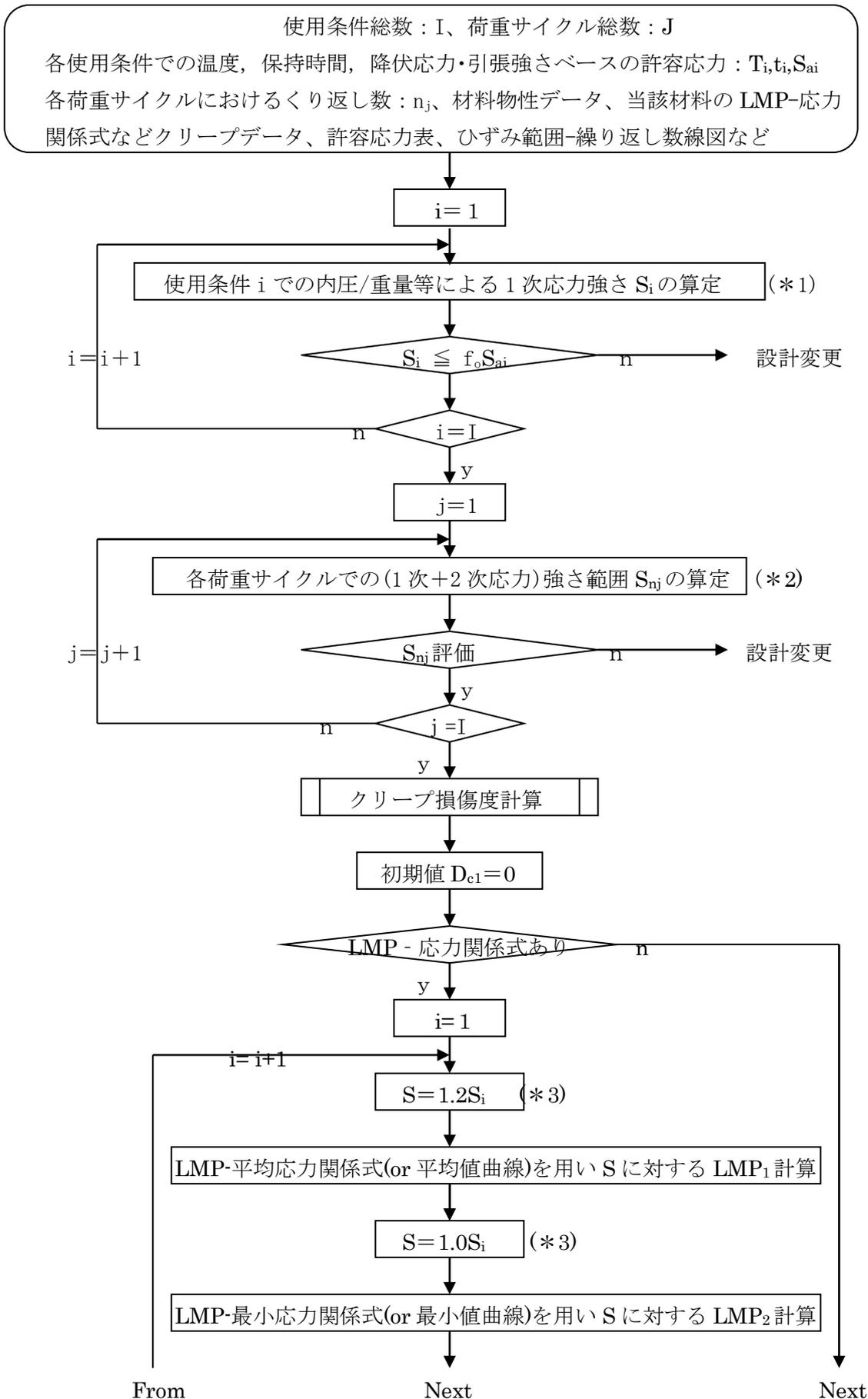
(S2) 更に温度荷重も含めて各荷重サイクルにつき(1次+2次)応力強さ範囲 S_{nj} を求め(1次+2次)応力制限をチェックする。 S_{nj} は疲労評価に使用する。

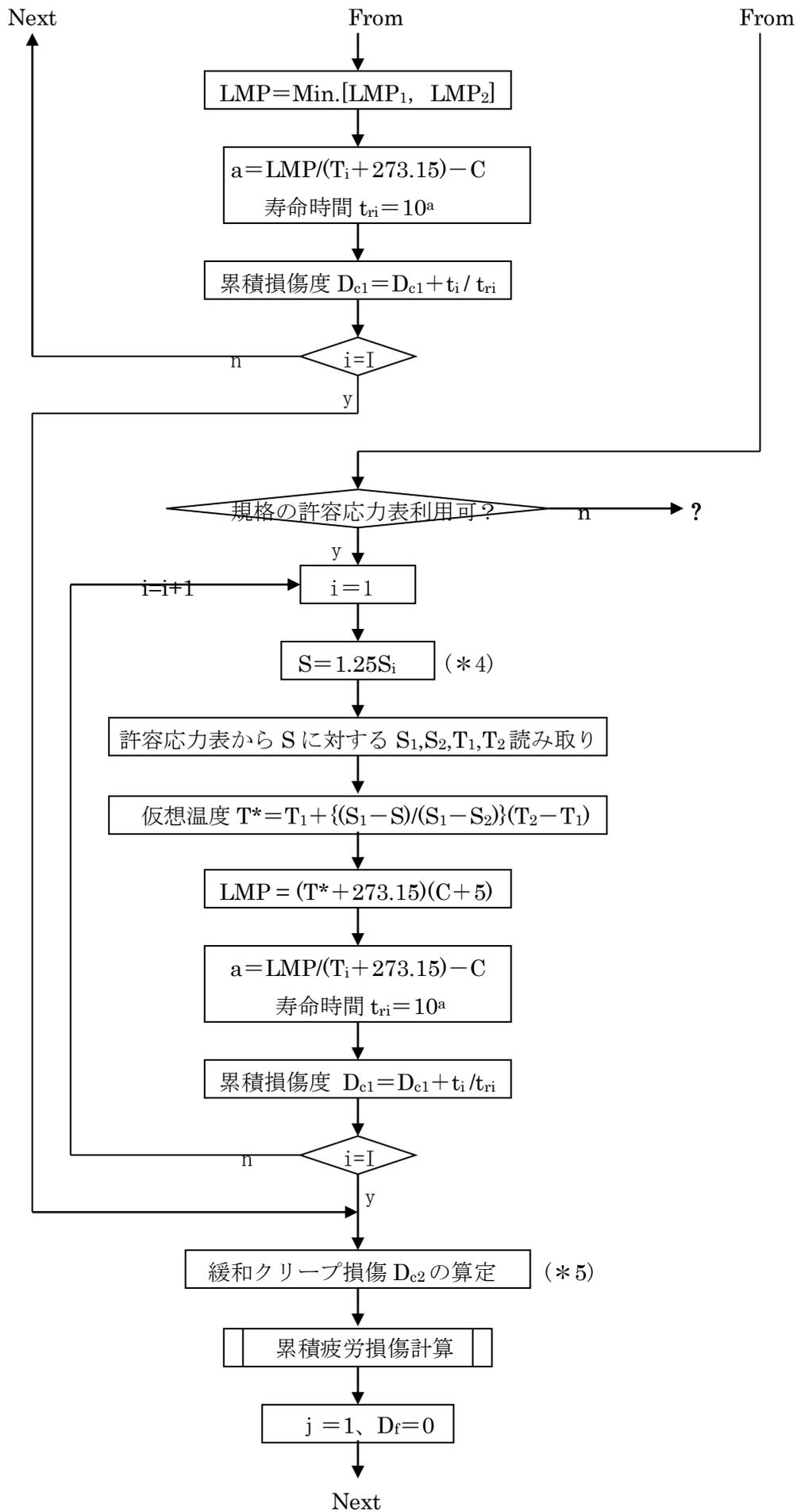
(S3) 次いで各使用条件のクリープ破断時間 t_{ri} を求める。3項で示した2つの方法のいずれかでLMP値を求め、与えられた運転温度を前項(1)式に適用して t_{ri} を計算し、1次クリープ損傷係数 D_{c1} をカウントする。

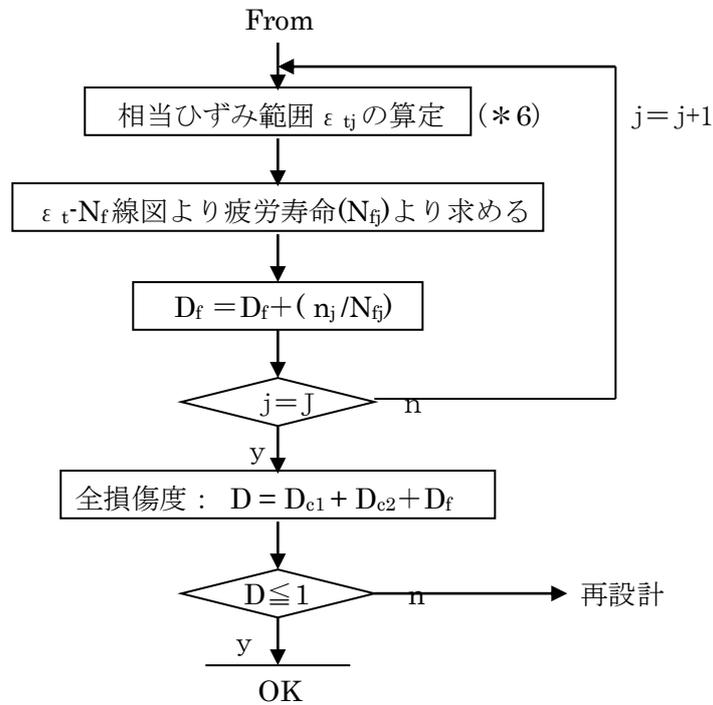
(S4) 更に2次応力による緩和クリープ損傷係数 D_{c2} をカウントする。

(S5) 次いで、各荷重サイクルでの相当ひずみ範囲を求め、ひずみ範囲-繰り返し回数線図にこれを用いて疲労寿命サイクル N_f を求め、累積疲労損傷係数 D_f をカウントする。

(S6) 累積クリープ損傷係数 $[D_{c1}+D_{c2}]$ と累積疲労損傷係数 D_f の代数和をとりそれが 1.0 以下であることを確認する。







【 記号定義 】

i = 使用条件番号 (=1, 2, 3...)、 j = 荷重サイクル番号 (=1, 2, 3...)、 I = 全使用条件数、
 J = 全荷重サイクル総数(荷重条件数)、 D = クリープ疲れ損傷係数、 D_f = 疲労損傷係数、
 D_{c1} = 1次応力によるクリープ損傷係数、 D_{c2} = 2次応力による緩和クリープ損傷係数、
 T_i = 使用条件 i での運転温度(°C)、 T_1^* = 仮想温度(°C)、
 T_1, T_2 = 許容応力表で当該応力 S をはさんで隣り合う温度(°C)
 t_i = 使用条件 i での保持時間(hr)、 t_{ri} = 使用条件 i での破断時間(°C)、
 n_j = 荷重サイクル j における繰り返し回数(-)、 N_{fj} = 荷重サイクル j における疲労寿命回数(-)
 S_i = 使用条件 i での1次応力強さ(MPa)、 S_{ai} = 規格の許容応力(MPa)、
 S_{ni} = 使用条件 i での(1次+2次)応力強さ範囲(MPa)
 ε_{tj} = 荷重サイクル j での相当ひずみ範囲(MPa)、
 $S_1 S_2$ = 許容応力表で当該応力 S をはさんで隣り合う許容応力(MPa)、
 LMP = Larson-Miller パラメータ、 LMP_1 = Larson-Miller パラメータ(平均値ベース)、
 LMP_2 = Larson-Miller パラメータ(最小値ベース)
 C = LMP 式の材料定数[(1)式左辺に適用の LMP -応力関係式に対応したものあるいは規格の
 ベースになっているもの]
 a = ベキ数、 f_0 = 許容応力の割り増し係数(通常、長期 1.0/短期 1.33)

【 注記 】

(*1) 圧力などの機械荷重と温度がワンセットとして保持された状態をひとつの使用条件とする。なおサイクリ的に変動する場合は、それぞれのピーク値をとって安全側に一つの使用条件としていい。

使用条件ごとに機械荷重による1次応力を算定し、これが設計条件(最大圧力,最大温度)で設定された許容応力に入るかチェックする。荷重が短期荷重の場合は、規格の許容応力に規格で定められた割り増し係数を乗じたものを許容応力とする(なお短期荷重の保持時間は短く、その間のクリープ

ひずみの蓄積はほとんど零に近いので、許容応力として材料の短期強度である降伏応力をとる考えもある)。

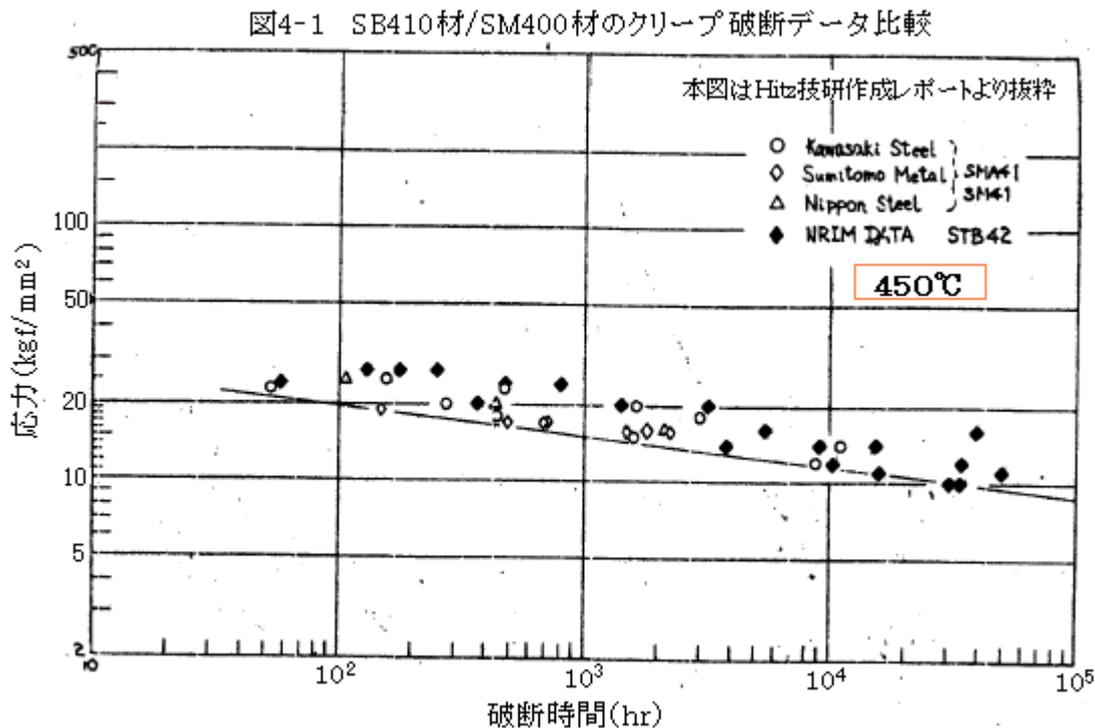
- (※2) 非クリープ域では、シェークダウン制限 $3S_m$ になるが、クリープ域では2次応力の緩和や緩和クリープ/1次クリープの累積があり簡単ではない。厳密に攻めるなら、促進クリープひずみと弾性追従ひずみを求めて制限内にあるか評価することになる。
- (※3) 応力 S_i にかかる **1.2** と **1.0** は、それぞれ平均値ベースと最小値ベースの補正係数で、クリープ-疲れ損傷評価の実施を前提にしてセットしたもの。ここでは**クリープ-疲れ損傷評価を行うので補足(1)(2)で示すようなマージン 1.25 の割り増しは不要になる。故に規格の裕度係数 1.5、1.25 を割り増し 1.25 で割って 1.2、1.0 が得られる。**
- (※4) 温度設定に使う S には、上記と同じ理由から S_i にマージン 1.25 で乗じたものを使う。この場合、仮想温度 T^* は高めになり LMP 値も高めになる。
- (※5) 2次応力(含熱応力)の緩和過程で生じる緩和クリープ損傷をカウント。方法としては、例えば2次応力範囲の半分に対応する弾塑性応力を線図などで求め、これを初期応力としてリラクゼーション解析を行い緩和クリープを求めて損傷度をカウントする(詳細は別途)。
- (※6) 相当ひずみ範囲は、弾塑性ひずみ+クリープひずみ+ピーク熱ひずみを云う。これを用いて相当ひずみ-繰返し数線図から寿命回数を算出する。**補足(3)**を参照のこと。

4. Larson-Miller 法の運用例 - SS400 のクリープ強度検討

何故か、SS 材や SM 材では、許容応力上、クリープが支配的になる 350℃以上の温度では、許容応力表の該当コラムがブランクになる[補足(1)参照]。この理由は知らないが、同じ炭素鋼鋼板であるボイラ用鋼板 SB 材が 550℃までの許容応力が与えられている事実を思えば、暗に SS 材ないし SM 材(リムド鋼)から SB 材(キルド鋼)への Change を促しているようにみえる(安定性はキルド>リムド)。これは鋼板や鋼管の場合、OK である。しかし型鋼になるとインゴットを確保するためかなりコスト高になる恐れがある。

実際のところ、高温ダクトの胴やインターナルでは SS 材の使用実績は多い。従ってここで、SS 材や SM 材の 350℃以上への使用を検討することは無意味ではないと思う。

残念ながら SS 材や SM 材に関するクリープデータは数少ない(と思う)。ただ、組成的/強度的にみて SB410 材(あるいは STB410)への親近性は高い。下図は SM400(旧 SM41)と STB410(旧 STB42)を比較したものである。短い破断時間で若干 SM400 が下回る傾向があるが、ほぼ同程度のレベルにある。



非クリープ域では SS400 の許容応力は SB410 のそれを多少下回っている。その傾向も考えて SS400 の破断応力の低下率を 0.90 として、これを SB410 の JIS 規格の許容値に乗じて補正したものを SS400 の許容応力とすることが提案される。即ち

(単位 : MPa)

	375℃	400℃	425℃	450℃	475℃	500℃	525℃	550℃
SB410 許容値	97	88	76	57	49	36	24	18
SS400 許容値	87	79	68	51	44	32	22	16

なお JIS 規格の SB 材の許容値は多分データとしては古いような気がする。そこで前述の NIMS (物材研) の STB410 (STB と同等材) の LMP - 平均応力関係式を用いてクリープ破断応力を求め、JIS 規格値と比較してみる。手順としては、

- ① LMP 式(1)を用いて 375～550℃の各温度ステップに対し LMP 値を求める。
但し全て破断時間は 10⁵hr とする。
- ② LMP-平均応力関係式から、破断応力 S をトライ&エラーで求める。
- ③ 破断応力 S の 67%を寿命時間 10⁵ hr における各温度ステップの許容応力 S_a とする。

計算結果 S, S_aを規格値と比較して以下に示す。

温度	LMP	破断応力 S	許容応力 S _a (=0.67S)	規格値 σ _a	比較 (=σ _a /S)
375℃	13451	223MPa	149MPa	97MPa	0.43
400	13970	170	114	88	0.52
425	14489	121	81	76	0.63
450	15008	88	59	57	0.65
475	15526	70	47	49	0.70
500	16045	58	39	36	0.62
525	16564	50.4	33.8	24	0.48
550	17083	44.5	29.8	18	0.40
575	17602	40.0	26.8	—	—

表からわかるように、平均値ベースの計算で得られた S_aは わずかに 450～500℃で漸近するものの、規格値 σ_aと合わない。375℃、550℃は特に差異が著しい。最小値ベースの計算は行っていないが、この結果を見る限り、規格値は最小値ベースで設定されているようである。

いろいろ議論はあるだろうが、結局、前述のように類似材 SB410 の規格値の 90%程度をもって SS400 材の規格相当許容応力(10⁵hr)とすることに落ち着くような気がする(実際に 350℃を越えて使用されている SS400 ではこの程度の強度低下が見込まれているようだ)。

この規格相当許容応力に対し、該当する温度と寿命時間 10⁵hr から(1)式を用いて LMP 値を求めると下記のようなになる。

規格相当許容応力 (MPa)	87	79	68	51	44	32	22	16
LMP 値	16204	16829	17454	18079	18704	19329	19954	20579

これをグラフにすれば図 3 のような LMP-応力関係曲線が得られる。いろんな応力 - 温度 - 時間の組み合わせに対処できるので設計に役立つと思う。例えば発生応力が 73.5MPa であれば、LMP は単純内挿して LMP=(16829+17454)/2=17142 になる。そして温度が 450℃の場合、寿命時間は

$$a=17142/(450+273.15)-20=3.7 \rightarrow t_r=10^{3.7}=5012\text{hr}$$

になる。

5. Larson-Miller 法の運用例－ASME B31.3 付属書 V について

プラント運転では、運転の不調など何らかの理由で、設計条件(圧力・温度)を越えても運転せざるを得ないような事態になることがある(運転休止/復旧は相当のコスト損失を生じる……)。この逸脱にどう対処するのか？

化学プラントの配管コード ASME B31.3⁽⁴⁾では、この設計逸脱に関し 302.2.4「圧力及び温度の変動に関する許容事項」で次の要件の満足を求めている。

- (a) 当該配管システムに非延性の耐圧部品が使用されていないこと(鋳鉄弁などは不可)。
- (b) 圧力による公称応力は当該温度における降伏応力を越えないこと。
- (c) 偶発荷重による長手方向組合せ応力 S_L は 1.33x 基本許容応力を越えないこと。
- (d) 設計条件を越える圧力-温度変動総数(累積数?)は 1000 回/全試用期間を超えないこと。
- (e) 如何なる場合でも 上昇圧力は試験圧力を越えないこと。
- (f) 変動による偶発的設計からの逸脱は下記の何れかの圧力設計限界内にとどまっていること。
 - (1) 温度上昇における圧力レーティング or 許容応力については次の割り増しを可とする。
 - ・ その変動が 10hr 未満/1 回かつ 100hr 未満/1 年の場合→33%
 - ・ 50hr 未満/1 回かつ 500hr 未満/1 年の場合→20%
 但し、その変動が寿命を損なっていないことをユーザに説明のこと(付属書 V)。
 - (2) 圧力レリーフのように自己抑制的な変動の場合は次の割り増しを可とする。
 - ・ 50hr 未満/1 回かつ 500hr 未満/1 年の場合→20%
- (g) システム構成部品の使用の可能性については持続的変動と周期的変動の複合を評価すること。
- (h) 最低温度が下限界規定を満たさない温度変動は不可であること。
- (i) 弁の締切差圧は弁メーカーの最大差圧レーティングを超えないこと。

ASME B31.3 の付属書 V は上記の (f) の (1) に対応しているが、当然ながら上記 (a)～(i) の確認も必要になる。また「その変動が寿命を損なっていないこと」を確認するためにクリープ累積損傷計算を行うが、その場合、全ての使用条件に対し計算するか、あるいは最も厳しい条件のみ保守的に計算するか of 2 つの選択肢を設けている(前者については簡単な計算例が示されている)。

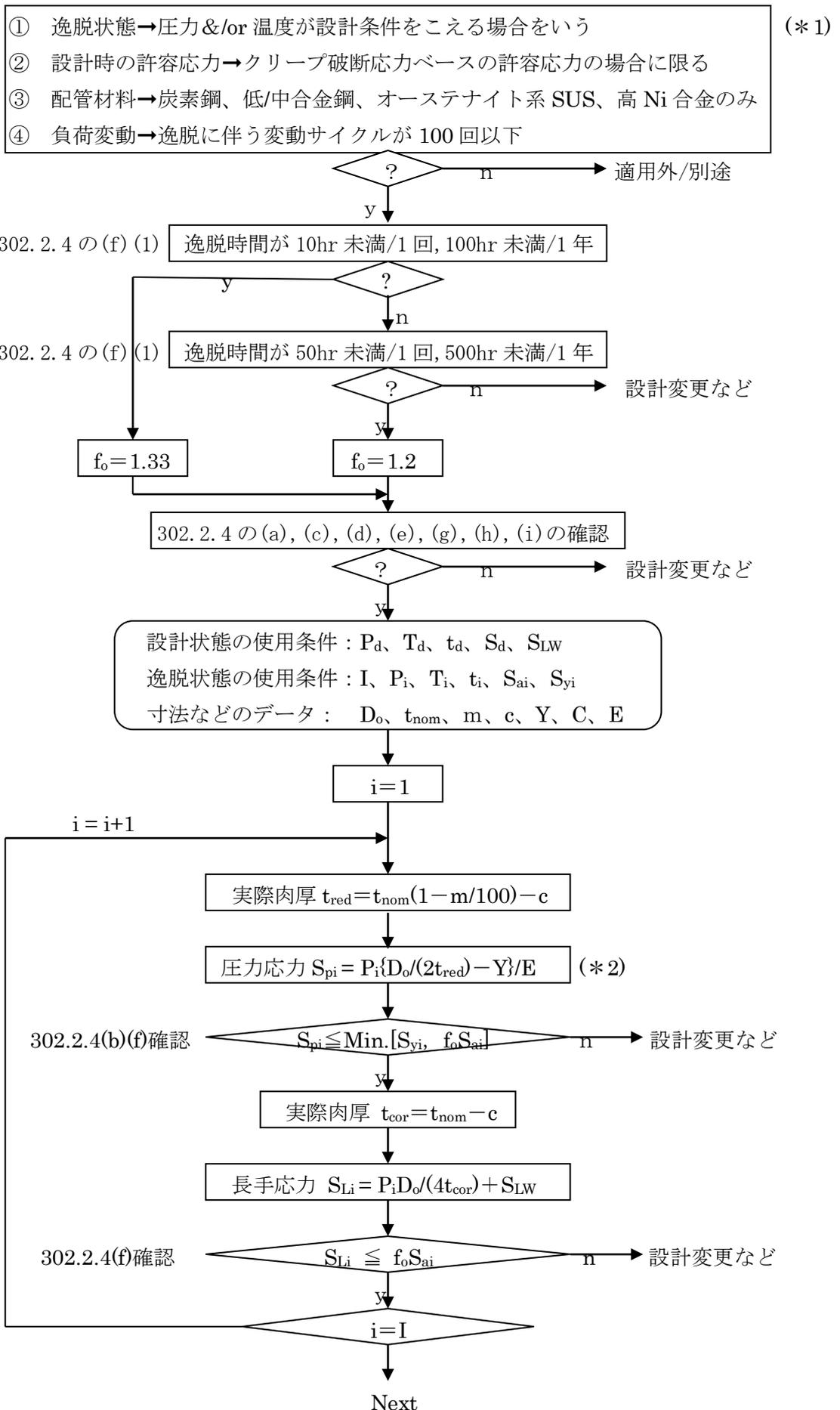
全ての使用条件に対し解析する場合の手順は次のようになる。

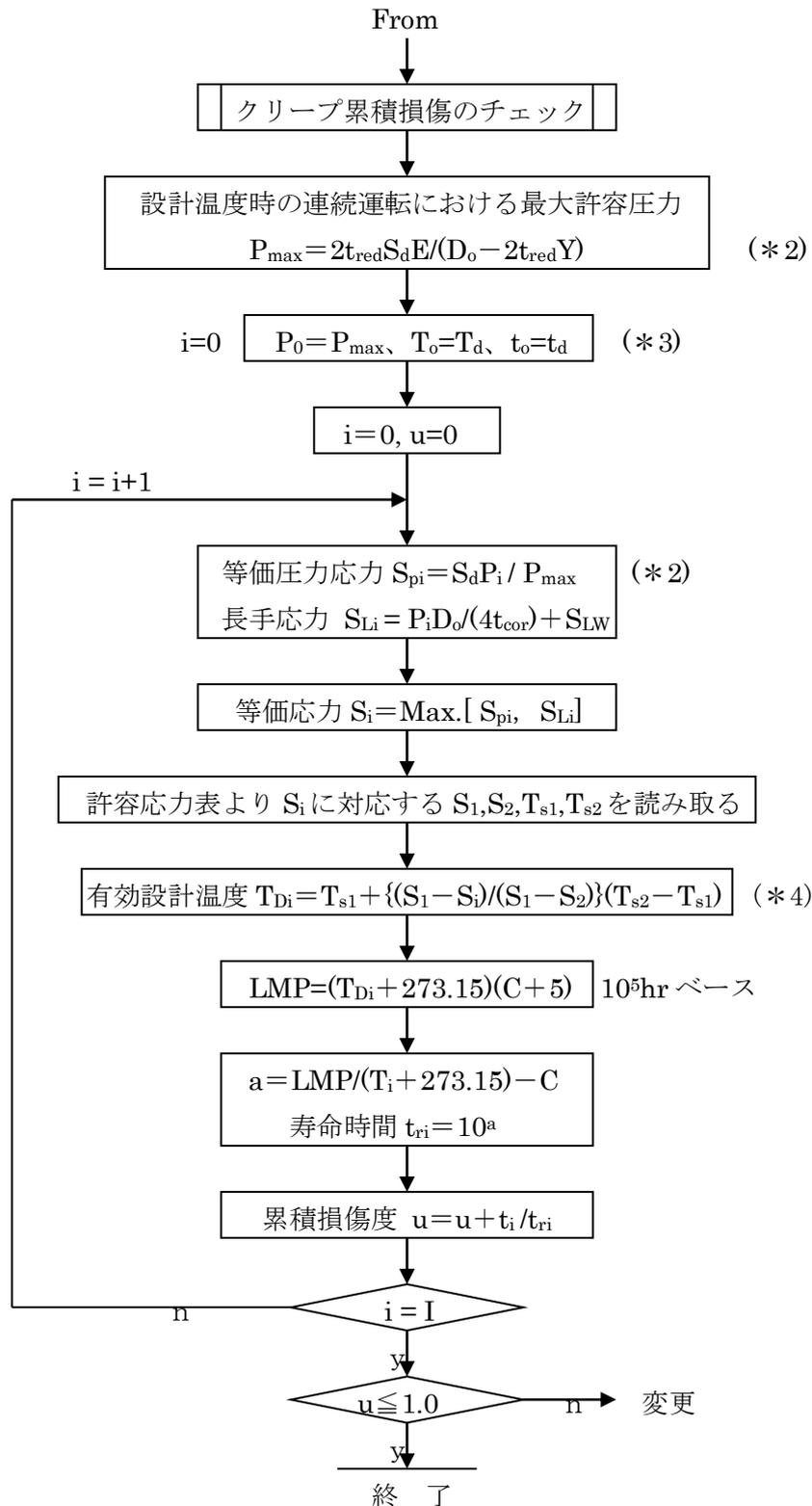
- (S1) 評価条件の確認、許容応力割り増し係数の選択及び 302.2.4 の(a),(c),(d),(e),(g)～(i)の確認。
- (S2) 逸脱時の各使用条件(圧力, 温度)について、配管の圧力応力と圧力/自重による長手応力が割り増しの許容応力(あるいは降伏応力)以下であることの確認[302.2.4(b) (f)の確認]。
- (S3) 運転条件(≒設計条件)を含む全ての使用条件(圧力, 温度)に対し、クリープ損傷度を求めその累積値が 1 未満であることの確認。

この手順を具体的にチャートにして以下に示す。なおこの手順の累積クリープ損傷計算では前 3 項の(3)に示す①の方法が使われている。全般に逸脱時の許容応力が設計時の許容応力の 1.33 倍(ないし 1.2 倍)以下に抑えられるなど、かなりの裕度があるようだ。

なお付属書 V の例題としては JPI 配管規準⁽⁵⁾の付属書 M のそれが該当する。これを添付 X2 に示す。

ASME B31.3 付属書 V [高温使用時の許容変動]の評価手順





【 記号の説明 】

I=逸脱状態の使用条件(圧力,温度)総数、i=使用条件番号(=0,1,2,3,⋯I)

P_d=設計圧力(MPa)、P_i=使用条件 i の圧力(MPa)、P_{max}=設計状態の最大許容圧力(MPa)

T_d=設計温度(°C)、T_i=使用条件 i の実際温度(°C)、T_{Di}=等価応力 S_i に対する有効設計温度(°C)

T_{s1}, T_{s2}=許容応力表で有効設計温度 T_i をはさんで隣り合う温度(°C)

t_d=逸脱状態以外の保持時間(hr)=(寿命時間 - Σ t_i)、t_i=使用条件 i の保持時間(hr)

t_{ri}=使用条件 i での破壊寿命(破断時間)(hr)

S_d = 設計温度時の許容応力(MPa)、 S_{LW} = 重量等の持続荷重による長手方向応力(MPa)、
 S_{pi} = 使用条件 i での圧力による公称応力(圧力応力)(MPa)、
 S_{Li} = 使用条件 i での合成長手応力(MPa)、 S_i = 等価応力(MPa)
 S_{ai} = 規格による基本許容応力(MPa)、 S_{yi} = 使用条件 i の温度 T_i での降伏応力(MPa)、
 S_1 、 S_2 = 許容応力表で等価圧力 S_i をはさんで隣り合う許容応力(MPa)
 D_o = 管の公称外径(mm)、 t_{nom} = 管の公称肉厚(mm)、 t_{cor} = 実際肉厚(mm)、 t_{red} = 実際肉厚(mm)
 m = 製作公差(mm)、 c = 腐れ代(mm)、 Y = 肉厚計算に用いる有効係数(-)
 f_o = 許容応力の割り増し係数(= 1.33 or 1.2)、
 LMP = Larson-Miller のパラメータ、 a = ベキ乗数(-)、 u = 累積クリープ損傷係数(-)
 C = 材料定数：炭素鋼、低合金鋼、中合金鋼 → $C=20$
 オーステナイト系ステンレス鋼、高ニッケル合金 → $C=15$

【注記】

(*1) ここでは運転時の変動のうち、**圧力 &/or 温度が設計条件を越える場合を逸脱状態とみなして** チェックする。圧力/温度の逸脱では真っ先に許容応力の異同が問題になる。もし設計時の許容応力が降伏応力・引張強さベースであれば、逸脱が短期とみなせる範囲で許容応力の割り増し即ち $1.33S_a$ あるいは $1.2S_a$ で評価すれば事足りるが、**クリープ領域にあって許容応力が破断応力ベースであれば、クリープひずみの累積によって設備寿命が損なわれる恐れがあるので、クリープ損傷の累積をレビューする必要がある。**①と③はこのレビューの前提となっている。また、②はこのレビューが汎用的な圧力配管材料を対象としており全材料を網羅したものでないことを宣言したもの。④は、疲労原因となる変動サイクルの回数を制限する。規定では単にサイクル数となっているが具体的でない。例えば運転温度の逸脱のくり返しでは、往々にして熱過渡応力によって応力サイクルができ、クリープ-疲労の相互作用によって損傷が加速される。故に**100回を越えたらクリープ-疲れ評価を行って、クリープ損傷+疲労損傷の累積和を 1.0 以下に抑える必要がある(ただ 100 回の根拠はわからない)。**

(*2) B31.3 の規定によれば、内圧をうける直管の肉厚式は、

$$t = PD / \{2(SEW + PY)\}$$

であるから、 $SW \rightarrow S_{pi}$ 、 $P \rightarrow P_i$ 、 $t \rightarrow t_{red}$ 、 $D \rightarrow D_o$ とおいて圧力応力 $S_{pi} = P_i \{D_o / (2t_{red}) - Y\} / E$ が得られる。これはいわゆるフープ応力に該当し、ここでは圧力応力と仮称している。

また肉厚式を P について解き、 $SW \rightarrow S_d$ 、 $P \rightarrow P_{max}$ 、 $t \rightarrow t_{red}$ 、 $D \rightarrow D_o$ とおいて同様に等価応力 $P_{max} = 2t_{red}S_dE / (D_o - 2t_{red}Y)$ が得られる。更に P_{max} 式を変形して $\{D_o / (2t_{red}) - Y\} = (S_dE / P_{max})$ とし、これを前述の圧力応力 S_{pi} 式に代入して **等価圧力応力 $S_{pi} = S_d P_i / P_{max}$ が得られる。**即ち圧力応力と等価圧力応力は、同じ式になる(しかし付属書の計算例に倣ってここでは別々の式にした)。

(*3) 使用条件番号 $i \geq 1$ は逸脱状態の使用条件に割り当てられるもので、通常の運転状態への割り当ては含まれない。この通常運転の圧力/温度は設計圧力/設計温度以下であるから、安全側には運転条件の代わりに設計条件が使える。そこで通常運転状態の使用条件番号を $i=0$ とおき、その時の圧力 P_0 に設計圧力 P_d 、温度 T_0 に設計温度 T_d 、保持時間 t_0 に寿命時間から逸脱状態の全保持時間を差し引いた残分 t_a を振り当てる。累積損傷は $i=0$ から $i=I$ までの代数和として算出される。

(*4) これは前3項の(3)で説明した通り、応力 S_i (但し $S_1 \leq S_i \leq S_2$) を許容応力表に内挿して対応する温度 T_i を求めるもの。外挿 ($S_i \geq S_2$) にも、軽度であれば使用できると思われる。

【 本文の補足 】

(1) ASME 系の圧力容器・配管規格では、基本許容応力を次のような基準で設定している。

基本許容応力 : 下記の各応力の値の中で最小の値

- (a) 常温における規定最小引張強さの 1/4
- (b) 設計温度における引張強さの 1/4
- (c) 常温における規定最小降伏点または 0.2%耐力の 1/1.5
- (d) 設計温度における降伏点または 0.2%耐力の 1/1.5 または 0.9
- (e) 設計温度において 1000 時間に 0.1%ひずみを生じる応力の平均値の 100%
- (f) 設計温度において 100000 時間でのクリープ破断応力の平均値の 67%
- (g) 設計温度において 100000 時間でのクリープ破断応力の最小値の 80%

(a)~(g)はいずれも圧力/自重などの機械荷重(持続荷重)による応力即ち **1次応力(Primary Stress)** 強さの制限に適用される。また(a)~(c)は、使用温度に依存しない応力の制限に、(e)~(g)は、使用時間に依存する応力の制限に使用される。旧 JIS 圧力容器規格では、(e)~(g)が優位になる領域を **クリープ領域と定義**して、非クリープ領域(本文では通常領域と仮称)では(a)~(d)に、クリープ領域では(e)~(g)に分離して扱っている。このように分離すると記述が簡単になるので本 TS ではこの表現を採った。

なお上記(e)は、第1から3期クリープまでの全クリープひずみを10%程度に押さえ(10%÷10⁵hr → 0.1%/1000hr)、構造物の有害な変形を防ごうという趣旨があるようだが、それはさておき、注目すべきは(e)が高温使用時間[10⁵hr]を前提としている点である。(f)と(g)は明らかに[10⁵hr]を前提としているから、**クリープ領域ではなべて高温使用時間[10⁵hr]が想定寿命とされていることがわかる。**

前記(f)はクリープ破断データのばらつきを考え平均値の2/3(約67%)を許容応力としている。これはデータの可能最小値をとったものではなく、ある程度の安全マージンを見込んでいると見ていいと思う。何故なら(g)では最小値の80%が見込まれているからである。このマージンの根拠はよくわからないが何か不安要素が残る時、よく安全率1.25(=1/0.8)が用いられる。もしそうであれば、この場合の不安要素とは、[クリープと疲労の重畳、即ちクリ - プ - 疲れによる寿命の低下]ではないかと思われる。

実際の規格許容応力は、(f)(g)がベースになっていると思われる((e)は過剰変形防止になるのでやや特例的になるのではないか?)。しかし(f)と(g)のいずれが支配的になるのかはわからない。故にこの2つは**並列的に考慮する必要**がある。本 TS でも平均値の67%ないし最小値の80%をもって任意の温度、時間に対する許容応力(最大発生応力)とした。

更に前述のように潜在的に安全率 1.25 が想定されているなら、クリープ-疲れ損傷が解析的にカウントされるという前提では、平均値に対し $1.25 \times 67\% = 83\%$ 、また最小値に対し $1.25 \times 80\% = 100\%$ をもって許容応力としていいのではないかと思う。

下記に JIS 圧力容器の許容応力表の一部を例示する。

		各温度 (°C) における基本許容応力 N/mm ²																							
		-10	0	40	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575
S5330 S5400	—	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	—	—	—	ブランク	—	—	—	—	—
SB410 SB450 SB480 SB450M SB480M	—	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	97	88	76	57	49	36	24	18	—
	—	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	106	95	80	58	49	36	24	18	ブランク
	—	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	113	101	84	58	50	36	24	18	—
	—	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	108	101	89	76	44	33	—
	—	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	115	106	91	76	44	33

降伏応力/引張強さベース ← → クリープベース

A は一般炭素鋼鋼板、B はボイラ用鋼板の許容応力である。B ではクリープが顕著になる 350~400 °C 以上で、応力が早いピッチでダウンしている(これは高温になる程クリープ破断応力が低下するため)。550°C 以上は許容応力が与えられていないが、これは高温酸化等を考慮したものと思われる。一方、A ではクリープが顕著になる 350°C 以上で許容応力の設定が全く放棄されている。

(2) 前項で述べたように規格許容応力には 1.25 程度のマージンが期待される。この場合どの程度、寿命に裕度があるか、STB410 材/450°C を例にとって調べてみる。

まず、10⁵hr のケースにつき、本文(1)式から LMP 値を求める。

$$LMP = (T + 273.15)(C + \log_{10} t_r) = (450 + 273.15)(15.753 + 5) = 15007$$

この LMP を用い STB410 の LMP-平均応力関係式から応力を求めると S=88MPa になる。従って、10⁵hr の時の破断応力の平均値、最小値、余裕値は次のようになる。

平均値 : 88MPa、最小値 73.7MPa (=1.25x0.67x88)、余裕値 59MPa (=0.67x88=0.8x73.7)
 なお 450°C での余裕値は、平均値ベースでも最小ベースでも同じなるようにセットしている(4.項の比較結果では 450°C 付近では然り)。

さてここで、1.25 の裕度を取り除くことは、最小値に余裕値 59MPa をあてがうことである。その時平均値 S は 59/0.8=70.4MPa であるから、再び STB410 の LMP-平均応力関係式を用いて、LMP=15502 が得られる。故に

$$a = 15502 / (450 + 273.15) - 15.753 = 5.68 \quad \rightarrow \quad \text{破断寿命 } t_r = 10^{5.68} = 478630 \text{hr}$$

になる。設備寿命中の全高温使用時間を 10 万時間とすれば、累積クリープ損傷度は、

$$D_{c1} = 100000 / 478630 = 0.21$$

となる。これはクリープ損傷に対する裕度が約 5 倍になることを意味し、**疲労損傷に対して残余の 0.79 を割り当てることも可能である**。なお、高温になる程この傾向は増加し、低温になる程この傾向は減少する。しかし 375°C レベルでも、疲労損傷に対し 0.5 程度の割り当ては可能と思われる。

規格では、穏便な運転条件ではクリープ - 疲れ評価が要求されていないのは、この事実がバックにあるような気がする。

- (3) クリープが重畳する場合の、累積疲労損傷 $\Sigma(n_i/N_{fi})$ の計算はかなり厄介である。ただ長期 1 次応力が低いとき(クリープひずみの蓄積が少ない時)は、比較的簡単な手続きで求めることができる。参考として以下に、旧動燃団基準による計算方法を紹介する。

(S1) ある荷重サイクルについて、まず(1次+2次)応力強さ範囲 S_n を算定し、次式によってひずみ範囲 ε_n を求める。

$$\varepsilon_n = S_n/E \quad \text{ここで } E = \text{サイクル中の最大温度における縦弾性係数}$$

(S2) 応力パラメータ $3\dot{S}_m$ 、 S^* 、 \dot{S} を求める。

$$3\dot{S}_m: \quad T_C \leq T_r \text{ のとき } \quad 3\dot{S}_m = S_{rH} + 1.5S_{mc}$$

$$T_H, T_C > T_r \text{ のとき } \quad 3\dot{S}_m = S_{rH} + S_{rC}$$

$$S^*: \quad \varepsilon_n \leq S_{rH}/E \text{ のとき } \quad S^* = E \varepsilon_n$$

$$\varepsilon_n > S_{rH}/E \text{ のとき } \quad S^* = S(\varepsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH}$$

$$\dot{S}: \quad K\varepsilon_n \leq S_{rH}/E \text{ のとき } \quad S = KE\varepsilon_n$$

$$K\varepsilon_n > S_{rH}/E \text{ のとき } \quad S^* = S(K\varepsilon_n - S_{rH}/E) + S_{rH}$$

ここで $T_H = S_n$ における 2 つのピークの高温側金属温度、

$T_C = S_n$ における 2 つのピークの低温側金属温度、

T_r = クリープが顕著になる温度、 K = 応力集中係数

S_{rH} = 温度 T_H と高温使用時間に対する設計緩和強さ

S_{rC} = 定常温度との温度差が大きい方の金属温度 T_s とその温度から定常温度に戻るまでの時間に対する設計緩和強さ

S_{mc} = 温度 T_c における設計応力強さ S_m (降伏応力・引張応力ベース)

$S = \varepsilon_n$ に相当するひずみに対応する弾塑性応力

(S3) ひずみ集中係数 KE を求める。

$$S_n \leq 3\dot{S}_m \text{ のとき } \quad KE = (S^*/\dot{S})K^2$$

$$S_n > 3\dot{S}_m \text{ のとき } \quad KE = \text{Max.}[(S^*/\dot{S})K^2, KK'e]$$

$$K'e = 1 + (q-1)\{1 - (3\dot{S}_m/S_n)\} \quad \text{但し } q=3$$

(S4) ひずみ範囲 ε_t を次式から求める。

$$\varepsilon_t = KE \cdot \varepsilon_n + K_T \cdot \varepsilon_F$$

ここで K_T = ピーク熱ひずみに対する弾性応力集中係数

ε_F = ピーク熱ひずみ範囲(ピーク熱応力強さ範囲に基づき修正ポアソン比使用)

[ここでいう熱応力は、温度変化により材料に生じる温度勾配による熱応力とみていい]

(S5) ひずみ範囲 - 許容くり返し回数線図(全振幅)より ε_t に対する疲労寿命回数 N_f を求める。

(S6) 以上の計算を全荷重サイクルについて行い、 $\Sigma(n_i/N_{fi})$ をカウントする。

2 次応力の緩和がキーポイントになっている。応力緩和して縮小したひずみ範囲を用いているようだが、 $[KE \cdot \varepsilon_n]$ は所詮、弾塑性ひずみであるから、結果的に非クリープ域における疲労損傷計算、

$$\text{応力振幅 } S_{alt} = (1/2)K_eKS_n \rightarrow S-N \text{ 曲線} \rightarrow N_{fi} \rightarrow D_f = \Sigma(n_i/N_{fi})$$

とはそれほど差異は生じないのではないかと？ もちろん比較して確認する必要があるが、この推論を

長期1次応力が低くないとき(クリープの進行の影響が大きい時)に適用すると、次式を用いて**略略の疲労損傷係数 D_f をカウントできる**のではないかと思う。

$$D_f = \sum (n_i/N_{fi})$$

n_i = 荷重サイクル i におけるくり返し回数、

N_{fi} = 荷重サイクル i における寿命回数。規格の設計疲労曲線(SN 曲線)から読み取る。

その場合、縦軸の応力振幅(S_{alt})は次式より算定する。

$$S_{alt} = (1/2)(E_o/E_h) K_e K S_n + E_o K_{\epsilon_c} + E_o K_T \epsilon_F$$

ここで E_o = 設計疲労曲線の基準縦弾性係数(MPa)、

E_h = 当該荷重サイクル中の最高温度での縦弾性係数(MPa)、

S_n = (1次+2次)応力強さ範囲(MPa)(Peak-Peak)、

K_e = 簡易弾塑性解析で与えられるひずみ集中係数(-)、

K = 応力集中係数(-)、 K_T = ピーク熱ひずみに対する弾性応力集中係数(-)

ϵ_c = サイクル中の累積クリープひずみ(= $\dot{\epsilon}_c h_H$)

$\dot{\epsilon}_c$ = 定常クリープ速度(-/sec)(= $B \sigma^\alpha$)

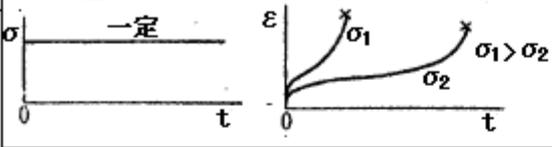
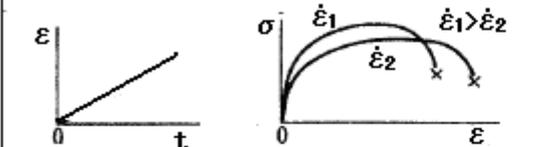
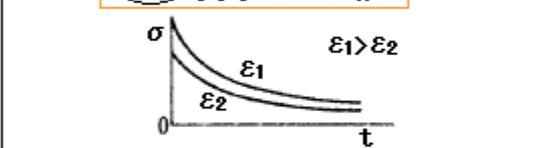
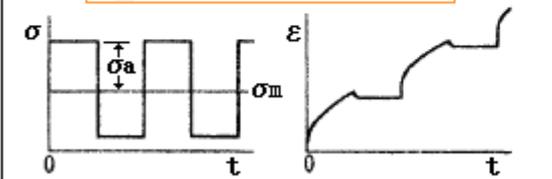
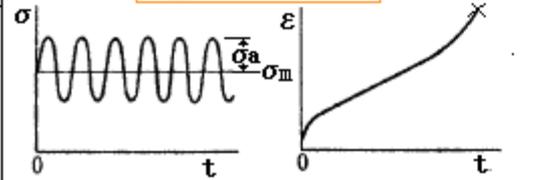
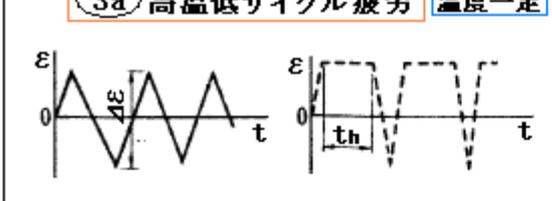
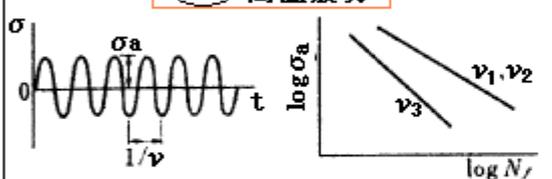
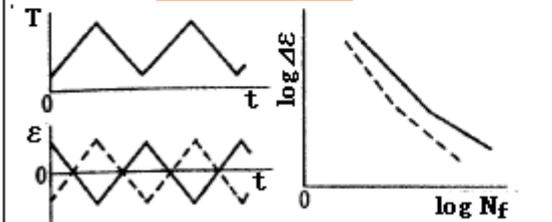
B, α = 各温度での材料定数、 σ = 長期1次応力

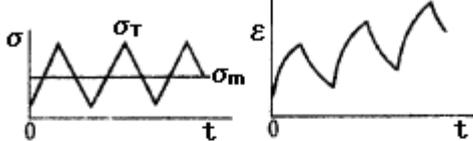
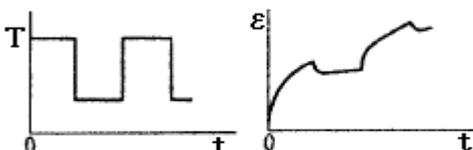
h_H = 顕著なクリープ領域での保持時間/当該荷重サイクル (hr)

ϵ_F = ピーク熱ひずみ範囲(前記と同じ)

なおサイクル時間が長いときは、 ϵ_c は時間分割してカウントしてもよい。

添付 X1 高温強度現象の概要説明 [テキスト(1)引用]

高温強度現象	現象の概要
<p>①a) クリープ及びクリープ破断</p> 	<p>一定温度下で一定の応力が作用する時に生じる非弾性変形及びこれによる破断。負荷直後には時間に依存しない弾性ひずみ/塑性ひずみが生じるがその後、時間とともにひずみが増加して破断に到る。 クリープ→歪が時間依存性、歪(クリープ)速度→応力&温度依存性 クリープ破断時間-温度&時間依存性</p>
<p>①b) 引張変形及び引張破断</p> 	<p>一定温度下及び一定ひずみ速度のもとで材料を引っ張るときに得られる応力ひずみ関係&破断伸び/絞りを用いる。 クリープが比較的応力、低歪速度下の長時間強度であるのに対してこの引張変形はかなり高応力、高歪速度下の短時間強度と言える。</p>
<p>①c) リラクセーション</p> 	<p>ひずみの大きさを一定に保持した場合に 応力あるいは負荷重が時間とともに減少する挙動。 材料内部にクリープひずみが蓄積していった弾性ひずみが減少していった程度、弾性ひずみに置き換わる形で、応力が減少する。</p>
<p>②a) 繰り返し応力クリープ</p> 	<p>比較的長周期の繰り返し応力が平均応力 σ_m 廻りにある場合、その最大応力に等しい一定応力下のクリープと比べると、繰り返し応力のある方が、場合によってはクリープが早いという現象。 最小応力→最大応力への応力増加の際、微視組織変化でひずみ速度が加速されるため。ただ最小応力が零で負荷-除荷を繰り返すとき、クリープひずみが回復して クリープひずみ加速分とキャンセルしあい全体としてクリープが殆ど進行しないこともある。</p>
<p>②b) 動クリープ 温度一定</p> 	<p>上記の繰り返し応力クリープに似るが、かなり短周期の場合、即ち振動応力が負荷される場合は、$(\sigma_m + \sigma_a)$ の中間に位置する一定応力のクリープ曲線と一致するという現象</p>
<p>③a) 高温低サイクル疲労 温度一定</p> 	<p>温度一定下において 破損繰り返し数がほぼ 10^4 回以下の 高応力/高ひずみ 繰り返し疲労をいう。熱疲労なのでひずみ型で扱われ Manson-Cofin式で整理できる。試験結果では、破損サイクル数に周波数依存性/ひずみ保持時間依存性があるので、クリープ-疲労の重畳を前提とした設計が必要になる。 (左図では t_h が長くなるほどクリープの影響がでて寿命が低下)</p>
<p>③b) 高温疲労</p> 	<p>狭義には上記と同じ温度一定下で、高温低サイクル疲労に比べて周波数が比較的高く、$\sigma_a > \sigma_m$ で 10^4 以上で破損する 高サイクル疲労を指す。しかし広義には、繰り返し応力疲労、動クリープ及び熱疲労も含めて応力の繰り返しを受ける場合の破損現象を総称して使用されることが多い。狭義の高温疲労としては上記の低サイクル疲労に似た傾向になるが、その相違点は明確ではない。</p>
<p>④ 熱疲労</p> 	<p>温度の変化に伴う材料の自由膨張が何らかの原因で拘束されて熱応力が発生しその繰り返しによって材料が疲労する現象。 これは上記の温度一定下の高温低サイクル疲労/狭義の高温疲労と異なつた、高温-低温繰り返し疲労とみなされる。 [通常のプラント設備では、たいていこのパターンになる。]</p>

高温強度現象	現象の概要
<p data-bbox="293 226 523 257">⑤a) 熱ラチェット</p> 	<p data-bbox="715 226 1433 286">材料の変形に注目した現象で、熱応力の繰り返しによって変形が一定方向に繰り返される現象。</p> <p data-bbox="715 288 1458 405">熱応力サイクルだけだと、非弾性ひずみが数回繰り返されると、ひずみもその位置で両振りのラチェットは停止する(Shake down)が、他の外力が加わると、その応力が平均応力の役割を担いラチェットが進む。高温では塑性ラチェットによるひずみ以外に、クリープひずみが蓄積される。</p>
<p data-bbox="293 418 612 450">⑤b) 繰り返し温度クリープ</p> 	<p data-bbox="715 418 1410 450">一定応力下で、周期的に温度サイクルが加わる場合のクリープ。</p> <p data-bbox="715 452 1458 524">この場合、熱応力は発生せず非弾性ひずみ(塑性ひずみ)の蓄積はないとする。</p>

<記号定義>

σ = 応力, ε = ひずみ, T = 温度, t = 時間

σ_1, σ_2 = 高い方の応力, 低い方の応力

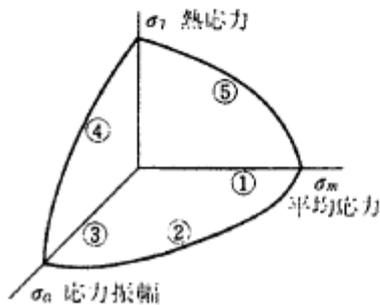
σ_m = 平均応力, σ_T = 熱応力, σ_R = 応力範囲

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = 高い方のひずみ, 低い方のひずみ

$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$ = 高い方のひずみ速度, 低い方のひずみ速度

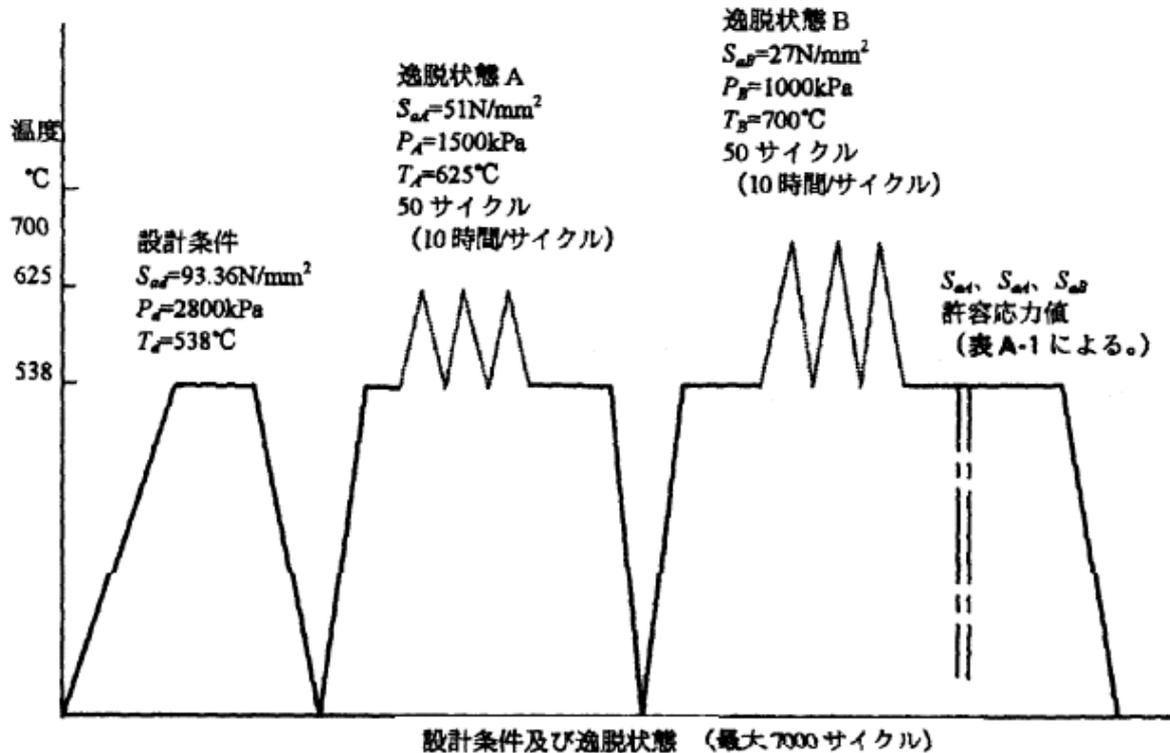
$\Delta\varepsilon$ = ひずみ範囲, ν = 繰り返し応力の周波数

t_h = 高温保持時間, N_f = 疲労寿命サイクル



付属書M参考 高温使用時の許容変動計算例

呼び径200A (外径216.3mm)、呼び厚さ4mm、腐食代無し、材質JIS G 3459 SUS 304 HTP、継目無鋼管、設計温度538°C、設計圧力2,800kPa、設計使用寿命20年 (175,200時間) の配管系に、次図に示す設計条件を超える使用条件の変動が予想される。この変動に対し、その安全性を評価する。



1. 計算の設定条件

a) 設計温度538°Cにおける、付属書Aの表A-1の許容応力値がクリープ基準に基づいているものとする。

b) JIS G 3459 SUS 304 HTP に対する降伏点は、JIS B 8270の付表5.2に従い次のとおりとする。

$$538^{\circ}\text{C} \quad \text{降伏点 } S_{yd} = 108\text{N/mm}^2 \quad 625^{\circ}\text{C} \quad \text{降伏点 } S_{yd} = 99\text{N/mm}^2$$

$$700^{\circ}\text{C} \quad \text{降伏点 } S_{yB} = 91\text{N/mm}^2$$

2. 付属書Mによる評価

M1. 設計基準 設計基準(1)のすべてのクリープ範囲における使用条件及びその継続期間を考慮し評価を行うものとする。

M2. 制限

a) 2.2.4のすべての規定を満たしているかを確認する。

2.2.4 a) 規定を満たしている。

2.2.4 b) 圧力による公称応力は、その温度における降伏点以下とする。

4.1.2より

$$S_m = \frac{P_i D_o}{2000 t r e d E} - \frac{P_i Y}{1000 E} \leq S_{yI}$$

ここに、

$$t r e d = t n o m \left(\frac{1-m}{100} \right) - c$$

E = 付属書A表A-1A又は表A-1Bによる品質係数

t_{nom} = 呼び厚さ m = 製作許容公差12.5%

c = 余裕代の合計 (mm) で機械的 (ねじ又は溝の深さ)、腐食及びエロージョンの余裕代を加えた合計

$$S_{nA} = \frac{1500 \times 216.3}{2000 \times 3.5 \times 1} - \frac{1500 \times 0.7}{1000 \times 1} = 45.3 \text{ N/mm}^2 < 99 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{nB} = \frac{1000 \times 216.3}{2000 \times 3.5 \times 1} - \frac{1000 \times 0.7}{1000 \times 1} = 30.2 \text{ N/mm}^2 < 91 \text{ N/mm}^2$$

2.2.4 c) 合成された長手方向応力は、2.3.6の許容限界以下とする。重量及び他の長期荷重による長手方向応力 $S_{LW} = 20 \text{ N/mm}^2$ と仮定すると、合成された長手方向応力 (S_{Li}) は、次のとおり。

$$S_{Li} = \frac{P_i D_o}{4000 t_{cor}} + S_{LW} \leq 1.33 S_{ai} \quad \text{where } t_{cor} = t_{nom} - c$$

$$S_{LiA} = \frac{1500 \times 216.3}{4000 \times 4} + 20 = 40.3 \text{ N/mm}^2 < 67.83 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{LiB} = \frac{1000 \times 216.3}{4000 \times 4} + 20 = 33.5 \text{ N/mm}^2 < 35.9 \text{ N/mm}^2$$

2.2.4 d) 規定を満たしている。

2.2.4 g) 規定を満たしている。

2.2.4 e) 規定を満たしている。

2.2.4 h) 規定を満たしている。

2.2.4 f) 規定を満たしている。

M3.1.1 圧力に対する等価応力

a) 圧力に対する等価応力 (S_{Pi}) を求める。

$$S_{Pi} = \frac{S_{ad} P_i}{P_{max}}$$

ここに、 S_{Pi} : 圧力に基づく等価応力 (N/mm^2)

P_i : 使用条件 (i) における圧力 (kPa)

S_{ad} : 設計温度における許容応力値 = 93.36 (N/mm^2)、付属書Aの表A-1による。

P_{max} : 設計温度における連続運転に対する最大許容圧力 (kPa)

4.1.2により

$$P_{max} = \frac{2000 t_{red} S_{ad} E}{D_o - 2 t_{red} Y} = \frac{2000 \times 3.5 \times 93.36 \times 1}{216.3 - 2 \times 3.5 \times 0.4} = 3061 \text{ kPa}$$

$$S_{Pd} = \frac{93.36 \times 2800}{3061} = 85.4 \text{ N/mm}^2 \quad S_{pB} = \frac{93.36 \times 1000}{3061} = 30.5 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pA} = \frac{93.36 \times 1500}{3061} = 45.8 \text{ N/mm}^2$$

b) 使用条件 (i) における最大長手方向応力 (S_{Li}) を求める。

$$S_{Li} = \frac{P_i D_o}{4000 t_{cor}} + S_{LW}$$

$$S_{LiA} = 37.9 + 20 = 57.9 \text{ N/mm}^2 \quad S_{LiB} = 13.5 + 20 = 33.5 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{LiA} = 20.3 + 20 = 40.3 \text{ N/mm}^2$$

c) M3.1.2で用いる等価応力 (S_i) は、上記a) 及びb) のいずれか大きいほうとする。

$$S_d = 85.4\text{N/mm}^2 \quad S_B = 33.5\text{N/mm}^2$$

$$S_A = 45.8\text{N/mm}^2$$

M3.1.2 等価応力 (S_i) に対応する有効設計温度 (T_{Ei}) 求める。

$$T_{Ed} = 559.6^\circ\text{C} \quad T_{EB} = 673.4^\circ\text{C} \quad T_{EA} = 638^\circ\text{C}$$

M3.1.3 ラーソン・ミラーパラメータ (LMP_i) の算出

$$LMP_i = (C+5)(T_{Ei}+273)$$

$$LMP_d = (15+5)(559.6+273) = 16652$$

$$LMP_A = (15+5)(638+273) = 18220$$

$$LMP_B = (15+5)(673.4+273) = 18928$$

M3.1.4 許容破損寿命 (t_{ri}) の算出

$$t_{ri} = 10^{a_i} \text{ (hr)}$$

$$a_i = \frac{LMP_i}{T_i+273} - C$$

T_i = 使用条件 (i) の間における実際温度 ($^\circ\text{C}$)

$$a_d = \frac{16652}{538+273} - 15 = 5.53 \quad a_B = \frac{18928}{700+273} - 15 = 4.45$$

$$a_A = \frac{18220}{625+273} - 15 = 5.29$$

$$t_{rd} = 10^{5.53} = 338844 \quad t_{rB} = 10^{4.45} = 28184$$

$$t_{rA} = 10^{5.29} = 194985$$

M3.2 クリープ損傷係数の決定

$$u = \sum \left(\frac{t_i}{t_{ri}} \right) \quad t_i = \text{使用条件 } (i) \text{ に関連する合計継続期間 (hr)}$$

$$t_d = 175200 - 1000 = 174200 \text{ (hr)}$$

$$t_A = 10 \times 50 = 500 \text{ (hr)} \quad t_B = 10 \times 50 = 500 \text{ (hr)}$$

したがって、すべての使用条件に対する損傷係数の合計は、次のようになる。

$$\begin{aligned} u &= u_d + u_A + u_B = \frac{174200}{338844} + \frac{500}{194985} + \frac{500}{28184} \\ &= 0.514 + 0.00256 + 0.0177 = 0.534 \end{aligned}$$

M3.3 評価

$u = 0.534 < 1$ ゆえに、設計条件を超えた変動に対して許容可能である。

引用テキスト・文献)

- (1) 平,大谷「材料の高温強度論」1章 高温強度概説、3章 クリープの基礎 (オーム社)
- (2) 安藤,岡林「原子力プラントの構造設計」 東京大学出版会
- (3) 植田「高温構造設計解析要領書」
- (4) ASME B31.3-2006 Process piping
- (5) JPI-7S-77-2002 「石油工業用プラントの配管基準」
- (6) NRIM/CDS/No.7B/1992 ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 STB410(0.2C)のクリープデータシート