

# リスクベースメンテナンスにおける炉管クリープの損傷係数の算出方法

## Damage Factor Calculation Method of Furnace Tube Creep Rupture in RBM

日本原子力研究開発機構

渡士 克己

Katsumi WATASHI

Member

Furnace tubes are widely used in heat transfer device in petroleum or chemical industries. This study proposes an alternative calculation method for the evaluation of creep rupture damage factor of furnace tubes. The method is consistency with an evaluation procedure described in American Petroleum Institute document API 581. Three types of creep parameters including Larson-Miller parameter, namely NRIM creep rupture data of furnace tube material, can be applied for evaluation. The method is rather simple compared with original method described in API 581 first edition.

**Keywords:** Creep, Damage factor, Furnace tubes, API 581

### 1. 緒言

石油・化学プラント等では、プラントの信頼性・経済性向上活動のベースとして米国石油協会規格(API)に記載されるリスク低減策の策定を基本とするルーチン作業が行われている。この作業は、(1)検査計画策定(API 510/570/653)、(2)検査活動(API 572/574/575)、(3)供用適正評価(API 579)、(4)破壊のしやすさとリスクの評価(API 580/581)、のルーチンを回すことによって行われる。(4)の評価の技術的方法は API 581 に記載されており、評価レベル 1 (定性評価)、評価レベル 2 (半定量評価) 及び評価レベル 3 (定量評価) のいずれかを選択した後、破損発生のしやすさと影響度を評価して、5×5 のリスクマトリックス上に結果を記載して評価する。破損発生のしやすさは 8 種類の破損モードについて計算方法が与えられており、炉管(Furnace Tube)のクリープ破断の評価方法がこの中に含まれる。

API-581 初版 Appendix J<sup>[1]</sup> に示される炉管のクリープ破断のしやすさの評価では時間消耗則が用いられており、使用条件からは炉管外径基準の式による円筒に発生する応力  $S$  と高温使用時間、材料強度として Larson-Miller (LM) パラメータの平均値  $LM_{avg}$  及び平均値と最小値の差  $LM_{delta}$  を用いて、下に示す損傷係数  $D_{FC}$  によって評価される。

$$D_{FC}=0.5 \cdot e^{13FF}$$

ここで、FF は LM パラメータの平均値と運転条件での LM パラメータの値、及び  $LM_{delta}$  から求められる数値である。検査の反映方法は検査有効度減少係数及び必要に応じてオンラインモニター補正を用いて損傷係数は修正される。

この評価方法は、(1)炉管で用いられている材料が必ずしも LM パラメータによってクリープの応力依存性が表されないこと、(2)クリープ破断挙動のばらつきの評価が明確でないこと、(3)結果として示されている損傷係数の式と時間消耗則の対応が必ずしもよくないことが改良点として挙げられる。

そのほか、検査有効度の算定において開放検査における肉厚検査のみが規定されているが、(1)全領域レブリカ、(2)直径計測、(3)酸化物計測、及び(4)割れ検査に関する記述がないことが指摘されている<sup>[2]</sup>。

一方欧州においては、API 581 と同様の趣旨で RIMAP の研究が進められ<sup>[3]</sup>、EU 規格 EN 12952 としての審議が進められている。RIMAP では石油化学、電力、鉄鋼業及び化学工業の分野での評価手法の検討が進められ、電力分野でのクリープ破断の評価例では材料強度として平均値の 80% 値が最小クリープ破断時間として用いられている。

本報は、当該評価方法の破断しやすさの評価方法を改良して、API 評価体系の枠組みの中で使用できる方法を示している。API の規格では 8 種類の破損モードの損傷係数の合計値を用いて破損発生のしやすさを評価するため、炉管のクリープ破断の損傷係数も整合性を保つために標準化している。

なお、本年発行された API 581 2<sup>nd</sup> ed. では、準備中として炉管クリープ評価方法は記載されていない。

### 2. 炉管クリープの損傷係数

#### 2.1 現象の概要

直火型で熱吸収型の燃焼室内に設置されて使用され

る加熱管の炉管のクリープに適用される損傷係数を考える。炉管の材料として、物質・材料研究機構のNRIMクリープ破断データ<sup>4)</sup>が適用できるフェライト鋼(炭素鋼と9Crまでの低合金鋼)、オーステナイト系ステンレス鋼(304、316、321、347)、インコロイ800、インコネル600、及び高合金鋳造管(HK、HP)とする。

炉管では管外面が燃焼ガスによって加熱され、管内の液体は加熱されて蒸気となり、更に加熱されて過熱蒸気が製造されることもある。考慮すべき主たる破損モードは、内圧  $p$  によるクリープ破断である。

炉管の肉厚は、外面では熱負荷がかかり燃焼ガスによる高温酸化などによって、内面では水蒸気酸化などによって、供用期間の経過と共に変化する(図1)。これらの酸化による炉管の肉厚減少は設計時に腐れ代として必要肉厚に考慮されており、又炉管の肉厚初期値は鋼材メーカーの規格品の中から必要肉厚を上回る製品が選択されるので、肉厚の初期値はクリープ破断を防止する観点からは十分厚いものとなる。炉管に使用される伝熱管は、通常超音波検査による肉厚検査と渦電流探傷試験などによる内部欠陥検査を受け合格したものが製品となるため、肉厚の均一性と内部欠陥基点のクリープき裂の除外が品質保証によって確保される。

クリープ破断評価で用いる発生応力の算出は、厚肉円筒の内面に発生する応力を算出する弾性理論式の近似式を用いる。

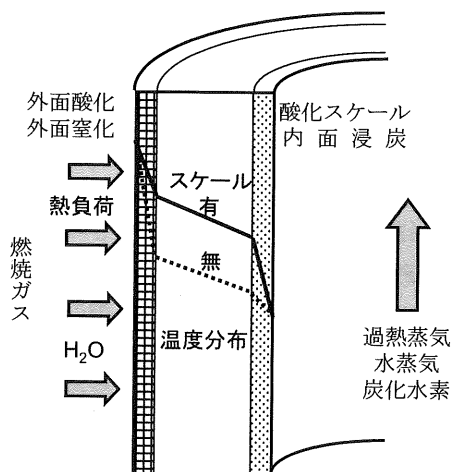


図1 現象の説明

クリープ破断曲線は、時間・温度パラメータを応力の関数で表現して用いる。物質・材料研究機構 NRIM クリープ破断データシートでは、管鋼種によって LM パラメータ、Orr-Sherby-Dorn パラメータ及び

Manson-Haferd パラメータが使い分けられている。

確率変数として LM パラメータではなく、クリープ破断時間を取り扱う。クリープ破断時間の確率分布として対数正規分布を想定し、中央値を  $t_{RM}$  とする。通常、設計段階ではクリープ破断の破損モードの生起を防止するために、 $t_{RM}$  の 95%信頼性下限値  $t_{RM95}$  が材料強度基準によって与えられ、この値が設計で想定した運転履歴のうちクリープ温度滞在時間に対するクリープ破断防止のための設計許容値となる(図2)。

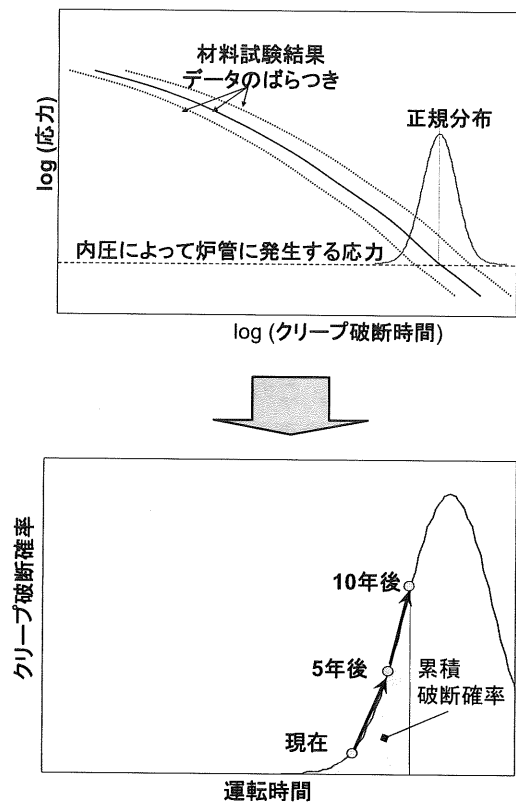


図2 クリープ破断確率の概念

供用条件は設計で想定した条件と基本的には同じであるが、酸化に起因する減肉から評価応力が増加する場合や、酸化皮膜の生成によって炉管金属温度が上昇することがある。或いは設計で想定したものは異なる温度履歴で運転されることがあるかもしれない。従って、炉管のクリープ破断防止の観点から、

- (1) 運転温度履歴の整理・分析(系統温度計/炉管出入口温度計、管群間温度差、等)
- (2) 炉管肉厚の把握(酸化皮膜厚さの計測/推定、炉管温度の計測/推定)

が重要である。

## 2.2 金属材料試験片のクリープ破断時間の特徴

クリープ破断時間  $t_R$  は時間と温度のパラメータ (LMパラメータなど) と応力の関数として表現され、SUS304、SUS316、SUS321 及び 2.25Cr-1Mo 鋼について 100 以上のデータが回帰分析された結果、2.25Cr-1Mo 鋼の標準偏差は 0.176 と小さいが、他の 3 鋼種では 0.24 程度である<sup>[5]</sup>。SUS304 を例として、図 3 に示すように  $t_R$  の平均時間  $t_{RM}$  に対する比の常用対数は正規分布となる。 $t_R/t_{RM}$  を時間係数  $\alpha$  ( $=1/\alpha_R$ ) とすると、 $\alpha=0.1$  ( $\alpha_R=10$ ) で破損確率 1% 以下となる。炉管設計時の内圧によるクリープ破断に対する設計許容応力は 5% 破損確率 (95% 信頼度) で定められていることから、対応する時間係数は 0.4 である (図 4)。2.25Cr-1Mo 鋼では標準偏差が小さいことから、時間係数 0.4 で 5% 破損確率を定めると実際よりも若干大きめの破損確率となる。

[破損確率、時間係数] の組み合わせで、[0.05、0.4] と [0.5、1] を直線で結んで損傷係数を与える式を策定した。API 581 (2000) では、8 種類の破損モードに共通して初期状態で損傷係数 1、累積破損確率 0.5 で損傷係数は 5000 に設定されている。

上記以外の鋼種について NRIM クリープ破断データを見てみると、鋼種ごとにデータ点数の多少があり、データの標準偏差と変動係数のばらつきも大きい。クリープパラメータの統計的性質は SUS304 と同等であると仮定して、4 鋼種以外について時間係数を用いてクリープ破断特性の回帰分析を行った結果はないが、統一して時間係数 0.4 を用いることとする。

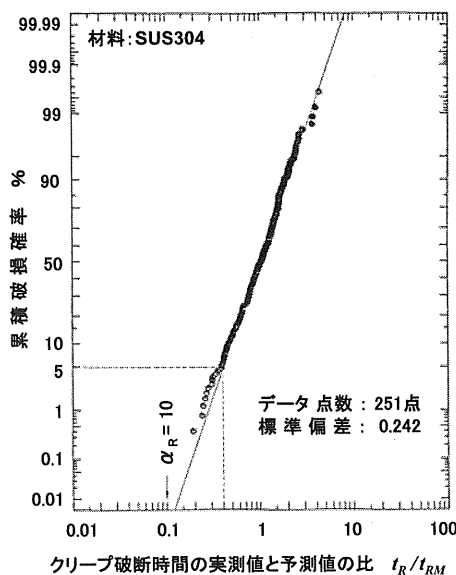


図 3 SUS304 のクリープ破断時間の確率評価<sup>5)</sup>

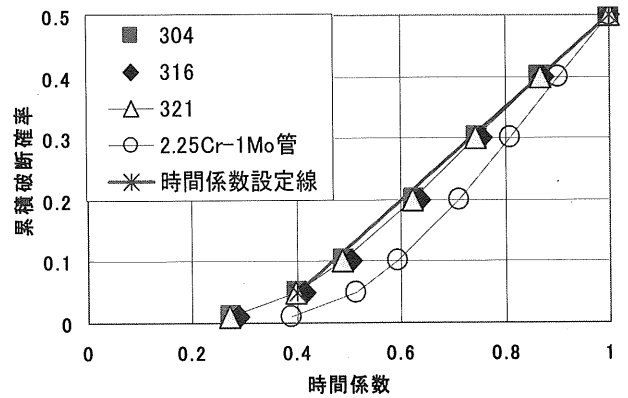


図 4 時間係数と累積破断確率の関係

### 2.3 クリープを無視できる温度と応力

クリープ破断時間は応力が低くなると、また温度が低くなると急速に長寿命となるので、実質的にはクリープを考慮しなくても良い温度と応力の目安値の規定が不要とも考えられるが、クリープ破断評価者の便宜を考えて、API-581 等に記載されるクリープを無視できる温度と応力で、損傷計算に入る前にスクリーニングをすることによって評価の効率化が図れる。

### 2.4 損傷係数の計算

#### a) 炉管の材料温度 ( $T_M$ )

運転中の管材料の平均温度を温度記録計か表面熱電対の測定値から決定する。 $T_M$  の測定値が得られない場合は、系統の出口温度を参考に  $T_M$  を決定するものとする。

#### b) 腐食速度決定

- 1) 平均腐食速度は炉管検査を行い、肉厚データから計算する。
- 2) 1) に代えて、減肉速度の推定値をそれぞれの減肉の損傷係数に基づいて決定してもよい。減肉の破損モード評価においてどの減肉メカニズムを使うかを決めた後、これら減肉速度を加えて総合減肉速度を求める。

#### c) 現在の肉厚の決定

- 1) 前回の検査から求めた肉厚と腐食速度を用いて現在の肉厚を求めるものとする。
- 2) 過去に検査が行われていない場合は、設計時の管肉厚を用い、全供用期間と前項から決定される推定腐食速度を用いて現在の肉厚を推定する方法が考えられる。

#### d) 応力計算

管の応力  $S$  を、現在の肉厚( $T_c$ )、運転圧力( $p$ )、管外径( $D_0$ )を使ってクリープ温度領域の実験式である下式から計算する。

$$S = \frac{p}{2} \left( \frac{D_0}{T_c} - 1.4 \right)$$

e) クリープ損傷の計算

運転履歴から、(温度  $T_M$ 、圧力  $p$ 、継続時間  $t_i$ ) の組み合わせ  $i$  を求める。クリープパラメータ  $P$  を下式によって計算する。

$$P = \sum_i \frac{t_i(T_M, S)}{t_{Ri}(T_M, S)}$$

ここで  $t_{Ri}$  は炉管材料のクリープ破断時間であり、NRIM のクリープ破断式を用いる。

f) 損傷係数の計算

損傷係数を下式によって計算する。ただし、計算結果が 1.0 以下になる場合は損傷係数=1 とする。

$$\text{損傷係数} = 5000 - \frac{4999}{0.6} (1 - P)$$

g) 検査有効度のランク

使われた検査手法や検査手法の組合せに対する検査有効度は、現行検査手法に対応している必要があるが、プラントごとに多様である。API 581 では定期検査における開放検査を想定した炉管の検査有効度ガイドラインが示されている。そこでは検査有効度を選定した後、対応する検査有効度減少件数を定め、上で得られた損傷係数を補正する評価の流れとなっている。

h) オンラインモニター係数による損傷係数の修正

API 581 では管表面熱電対設置による温度の常時モニタリング、連続目視モニター、バーナー芯位置モニターなどの組合せによる、予想外の高腐食速度や不均一加熱による炉管寿命のモニタリング手段に言及している。このようなオンラインモニターによって、問題が発見されることによって対策がとられることを前提にして、炉管の破断のしやすさの評価値の信頼性が高くなることを反映して損傷係数を修正することができる。

### 3. 炉管クリープ…計算例

API 581 (2000) の炉管クリープの評価(Appendix J)において損傷メカニズムとして炉管の酸化などによる減肉を評価し、破損モードとして内圧による炉管の破断を評価する方法を示していたが、2009 年版では削除され、現在準備中とされている。この破損モードに対して本報告では、図 5 に示すように、減肉に伴う周方向膜応力の増加に伴って、クリープ破断の可能性が増加する評価法として、NRIM クリープ破断データを用いた方法案を示した。

長期クリープに関して、API 581 の計算式の根拠が不明であるため、物質材料研究機構の HP で公表されている材料毎の寿命を用いて温度とその温度での運転時間の組み合わせからクリープ破断時間を算出し、破断確率 5% で損傷係数=1 とし、破断確率 50% で損傷係数=5000 となるように損傷係数の計算式を定めた。

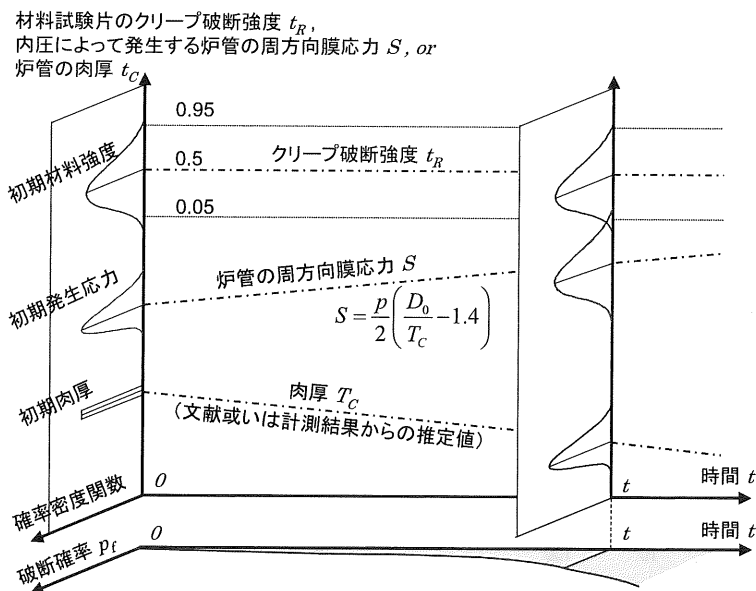


図 5 炉管の発生応力と破断確率の増加

例として、SUS304製の炉管が600°Cで10年間運転された場合の損傷係数を計算した。当該材料のクリープ破断式はNRIMクリープデータシートではManson-Haford型で表されている。表1に示すように、クリープパラメータは0.674であり、損傷係数は2,284となる。

表1 損傷係数の例題

応力 $S_i$ MPa	クリープ 破断時間 $t_{Ri}$ h	1年間 使用時間 h	10年間 使用時間 $t_i$ h	クリープ パラメータ $P_i$
80	496,000	10,000	100,000	0.202
100	165,000	5,000	50,000	0.303
150	14,200	240	2,400	0.169
				$\Sigma P_i = 0.674$

$$\text{損傷係数} = 5,000 - \frac{4,999}{0.6} (1 - \Sigma P_i) = 2,284$$

## 謝辞

本研究は、(社)高圧力技術協会 RBM 研究専門委員会 WG2 の活動の中で実施された。有益な助言を頂いたワーキンググループ2の委員の方々に感謝する。

## 参考文献

- [1] API Publication 581 “Risk-Based Inspection Base Resource Document”, 1<sup>st</sup> ed. 2000
- [2] S.A. Noori and J.W.H. Price, Case study of the use of API 581 on HK and HP material furnace tubes, Journal of Pressure Vessel Technology 127 Feb. 49/54 2005
- [3] A. Jovanovic, Risk analysis of a high-temperature components in a power plant – application of RIMAP approach, PVRC Int. Conf. on Decision Making for Risk Management of Process and Power Plants, 2005
- [4] 物質・材料研究機構 HP  
[http://tsuge.nims.go.jp/top/creep\\_jp.html](http://tsuge.nims.go.jp/top/creep_jp.html)
- [5] 和田、高速炉材料強度基準と安全裕度、日本溶接協会第18回シンポジウム資料集 58/107 1996