

プラント機器の余寿命評価技術

—クリープ余寿命評価—

高度成長期に建設されたプラントの中には、製作後20～30年経過し寿命に近づきつつある機器もあり、それらの合理的な保全あるいは長寿命化のために、近年、余寿命評価が広く行われるようになってきた。余寿命評価は疲労、クリープ、ぜい化、腐食などの損傷モードごとに行われているが、高温で使用される火力発電プラント(ボイラ管、高中圧タービンロータ、ケーシングなど)、石油や石油化学プラント(反応炉管、加熱炉管)などの各部材に対しては、特に、クリープ損傷による寿命評価が重要視されている。ここではクリープ余寿命評価に用いられるいろいろな技術を紹介する。



余寿命評価法

A-1

余寿命評価法としては次の3種類の方法があるが、それぞれ特徴があり、実際にはこれらの方法が組合わされ余寿命診断が実施されている。

1) 解析法

2) 破壊試験法

3) 非破壊試験法

クリープ余寿命評価技術についても、これらの分類にしたがって説明する。

クリープ余寿命評価法

A-2

解析法

診断対象の機器、部品の形状と温度、内圧などの運転履歴から熱応力、内圧応力などを有限要素法により求め、各材料のクリープ破断強度データより次式を用いてクリープ損傷率を計算し、余寿命を評価する。

$$\Phi_c = \sum \frac{t}{t_r} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 Φ_c ：クリープ損傷率
 t ：運転時間
 t_r ：破断時間

この方法は計算のみによるため、破壊試験法、非破壊試験法では診断できないような複雑な形状、あるいは狭隘な箇所についても評価できるという利点がある。その反面、実機の運転履歴を正確に把握することが難しいこと、および、解析に使用する材料特性のばらつきを考慮した安全率を採用するため、評価は実際より安全側になりがちで精度は低いといわれている。

破壊試験法

実際に運転されてきた部材から試験片を切出し、クリープ破断試験を行って余寿命を推定する方法である。この方法では部材に作用した温度、

応力の過去の履歴が明らかでなくても評価が可能であるが、試験片を採取できる部材にしか適用できないこと、試験に時間がかかることなどの欠点がある。

診断の精度を上げるためには、まず、機器のクリティカルな部位から試験片を採取することが重要である。また、クリープ破断試験は余寿命より短時間で破断する加速試験となるが、試験温度、応力が適切でないと組織変化が起りクリープ強度に影響をあたえるため、できるだけ使用温度、応力に近い条件で試験することが望ましい。しかし、時間の制約から1,000h程度で試験されることが多い。

以下に代表的な破壊試験法について述べる。

① ラーソンミラーパラメーター法

クリープ破断強度を温度と時間のパラメーターとして表す方法の一つで、最も古くから広く使用されており、この方法を余寿命評価に適用したものである。

第1図はラーソンミラーパラメーター法による余寿命評価の模式図で¹⁾、新材を温度 T_1 、応力 σ_1 において t_1 時間使用した場合のクリープ破断強度の低下を示している。この場合、 T_1 は不明で σ_1 は既知とする。新材と使用材のデータを同一の定数 C で整理できるとし、 σ_1 における各材料のラーソンミラーパラメーター値(LMP)を L_0 、 L_1 とすると次式が成立する。

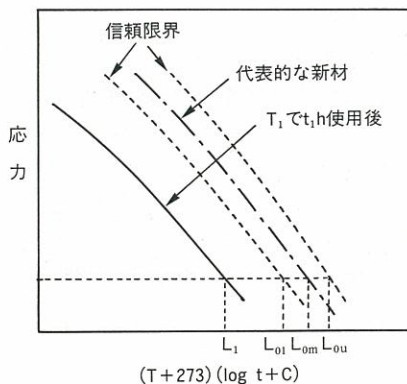
1) 行俊照夫ら：日本学術振興会 耐熱材料研究 第123委員会研究報告, Vol.11(1970), p.301

2) 行俊照夫ら：日本学術振興会 耐熱材料研究第123委員会研究報告, Vol.15(1974), p.125

$$L_0 = (T_1 + 273) (\log t + C) \dots\dots\dots(2)$$

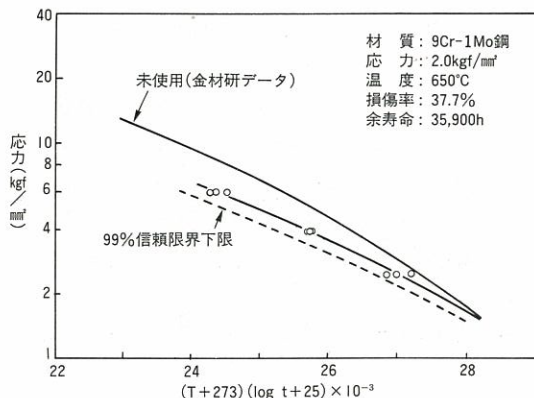
$$L_1 = (T_1 + 273) \{ \log(t - t_1) + C \} \dots\dots\dots(3)$$

(2)、(3) 式から全寿命 t と使用等価温度 T_1 を計算によって求めることができ、その結果、余寿命 $t - t_1$ も得られる。なお、使用されている材料そのものの新材のクリープ破断強度のデータが得られていない場合が多いため、ある程度ばらつき幅を有する文献値が用いられるので、 L_0 はあるばらつき幅 ($L_{01} \sim L_{0u}$) を持ったものとなる。



第1図 ラーソンミラーパラメーター法の模式図

3) 金丸修ら：火力原子力発電, Vol.41(1990), p.326



第2図 ラーソンミラーパラメーター法による余寿命診断例

4) 佐田哲朗ら：三菱重工技報, Vol.27(1990), p.466

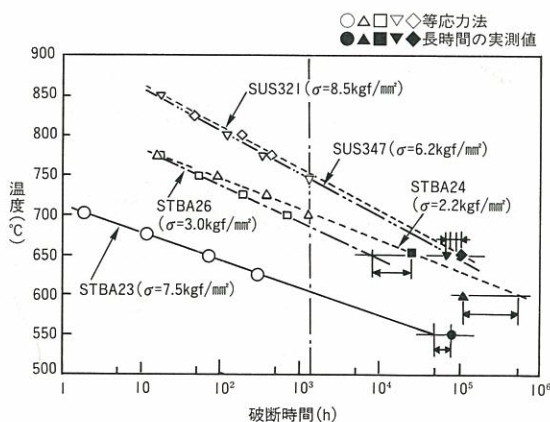
一例として、20年間使用された9Cr-1Mo鋼管のラーソンミラーパラメーター法による余寿命評価結果を第2図に示す。使用材のクリープ破断強度のばらつきを考慮し、余寿命としては99%信頼限界の下限により評価している。

② 等応力法

クリープ破断試験による余寿命評価において、使用材では高応力側の破断時間の低下の割合が大きく、応力を高めた加速試験では正確な評価が困

難であることが知られている²⁾。そのため、実機の使用応力を試験応力とし、使用条件より高い温度で数点のクリープ破断試験を行い、その延長上の使用温度での破断時間を推定する等応力(Iso-stress)法が検討された。

第3図にいろいろな鋼種の等応力法によるクリープ余寿命の推定結果を示すが、1,000h程度の比較的短時間の試験で10⁵hクリープ破断強度をおおむね推定できるとしている³⁾。ただし、試験温度を上げ過ぎると直線関係が成立しなくなるため、組織変化の起らない範囲に温度を抑える必要がある。



第3図 等応力法によるクリープ余寿命の推定

調査用サンプルが小さい場合、あるいは、応力集中部など損傷の大きい位置が限られる場合には、サンプリング量を少なくするために小型試験片が用いられる。通常のクリープ破断試験片は平行部径が6~10mmであるのに対し、この方法では平行部径が2~3mmの微小試験片が使用される。その場合でも、クリープ破断強度は通常試験片のそれとほぼ一致することが認められている⁴⁾。詳細についてはD章をご参照下さい。

非破壊試験法

この方法は破壊試験法と異なり、応力的にクリティカルな部位の診断を短時間で実施でき、定期的なモニタリングも可能である。

本試験法は、クリープ損傷の進行にともなう組織変化を非破壊的なパラメーターで検出するものである。新材に対し実験室的に損傷を加えたものと、実環境における損傷の進行に差があるため、複数の方法を適用し精度の向上を図っている。それでも、実環境との差や実機の初期材料特性のばらつきは避けられず、破壊試験法にくらべ精度は

やや低いといわれている。

本試験法に属する評価法は多数提案されているが、以下に代表的な方法の概要を示す。

① 組織検査法

評価対象部位から金属組織のレプリカを採取し、クリープ損傷の進展にともなう組織、析出物の変化あるいはボイド、微小き裂の発生などを金属顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)などを用いて調査し、あらかじめ求めておいた損傷率との関係から余寿命の評価を行う。

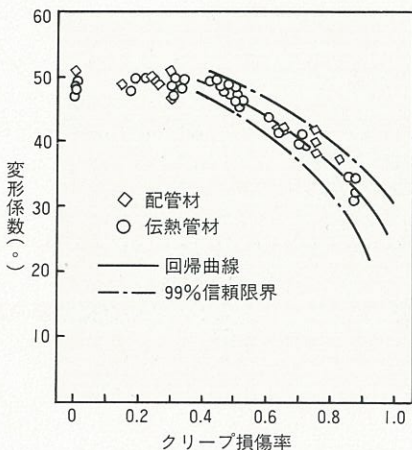
①組織対比法

クリープ損傷率(寿命消費率)の各段階における標準組織と実機の組織を対比させて余寿命を評価するもので、いくつかの因子を組合わせて判定する。

②結晶変形法

粒内変形によってクリープ損傷が進み、ボイドが発生しにくい場合に適用される。このような場合には結晶粒が応力の方向に細長く変形するので、変形を定量化し損傷率との関係を求める。このパラメーターとしては、結晶粒の長径軸の応力軸に対する方位角、長径と短径の比などが用いられる。

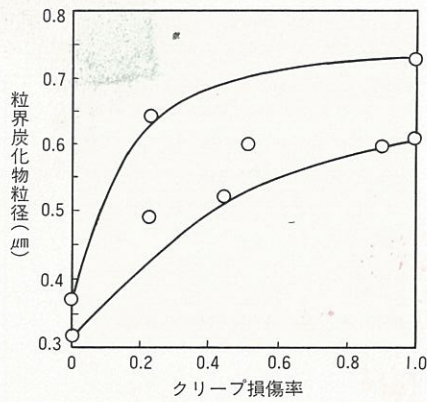
いずれにしても組織内の結晶粒の変形は均一でないため、画像処理などの統計的手法により整理する必要がある。第4図は結晶変形の寿命検定曲線の一例である⁵⁾。ここで、変形係数とは長径軸の応力軸に対する方位角の分布における標準偏差である。



第4図 結晶粒変形法の寿命検定曲線 (2¼Cr-1Mo鋼)

③炭化物法

クリープ損傷の進行にともなって、炭化物の形状、分布、種類が変化するのを利用し損傷率を評

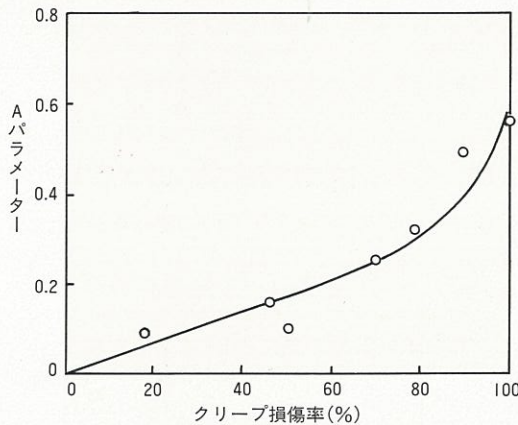


第5図 粒界炭化物粒径とクリープ損傷率の関係 (2¼Cr-1Mo鋼)

価するものである。その一例として、粒界炭化物粒径と損傷率の関係を第5図に示す⁶⁾。

④ボイド法

クリープ損傷の進行とともに粒界にボイドが発生する場合に、その発生量に基づく診断を行うもので、2¼Cr-1Mo鋼溶接部、Cr-Mo-V鋼、18Cr-8Ni系ステンレス鋼などに適応されている。



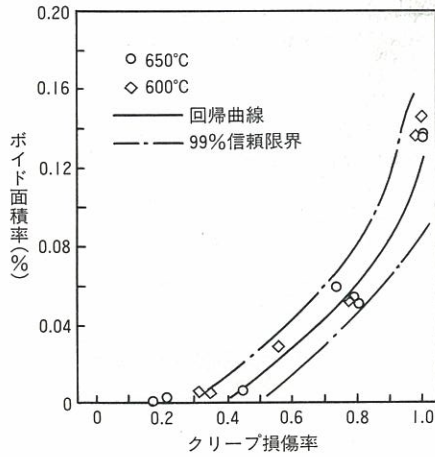
第6図 Aパラメーターとクリープ損傷率の関係 (2¼Cr-1Mo鋼溶接熱影響部)

ボイドの定量化法の一つがAパラメーター法(観察粒界数に対するボイド発生粒界数の比)であり、その例を第6図に示す⁷⁾。

また、溶接部などでは粒界の識別が困難なためAパラメーターを求めることが難しいので、ボイド面積率(観察面積に対するボイド面積の比)が用いられる。第7図にボイド面積率とクリープ損傷率の関係を示す⁵⁾。

このほかに、ボイドの生成、成長による密度の減少を測定し、ボイド量を定量化する方法も行われている。

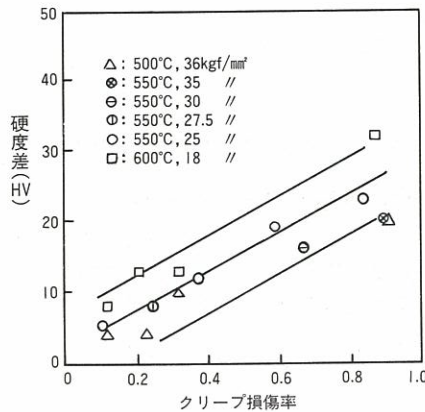
- 5) 坂口安英ら：火力原子力発電, Vol.39(1988), p.653
- 6) 中西直温ら：火力原子力発電, Vol.40(1989), p.1104
- 7) B.J.Cane et al: Proc. ASME Materials Seminar, Flaw and Fracture at Elevated Temperature(1983), p.279



第7図 ポイド面積率とクリープ損傷率の関係 (SUS321H)

② 硬さ法

高温長時間の使用による硬さの低下を利用して余寿命を求めるもので、初期硬さからの低下量、無負荷材と負荷材との硬さの差あるいは比などをパラメーターとしている。第8図は無負荷材と負荷材との硬度差とクリープ損傷率の関係を示したものである⁸⁾。

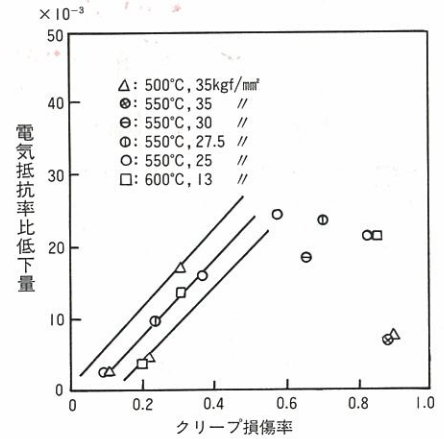


第8図 硬度差とクリープ損傷率の関係

③ 電気抵抗法

クリープ損傷による組織変化、ポイドあるいは微小き裂などの欠陥の発生によりその部分の電気抵抗が変化するので、この電気抵抗の変化を測定して損傷の程度を測定する。

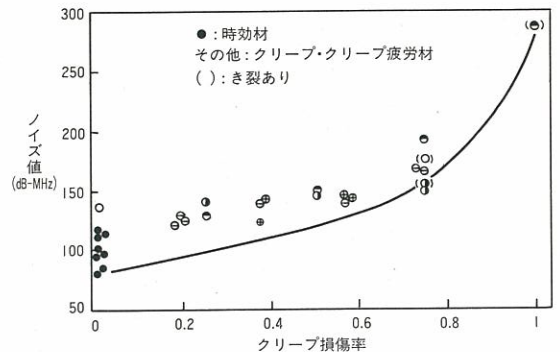
電気抵抗率比低下量とクリープ損傷率の関係を第9図に示す⁹⁾。



第9図 電気抵抗率比低下量とクリープ損傷率の関係 (Cr-Mo-V鋼)

④ 超音波探傷法

部材内部のクリープ損傷の計測を行う方法で、ポイドや微小き裂による超音波ノイズの変化により評価するため、比較的後期の評価法と考えられており、現在、開発段階である。第10図にノイズ値と損傷率の関係を示す⁶⁾。



第10図 超音波ノイズ値とクリープ損傷率の関係 (2 1/4Cr-1Mo鋼)

クリープ損傷による寿命消費、すなわち、余寿命評価技術について簡単に説明した。非破壊試験法に関しては、このほかの試験法も提案されているが、紙面の都合上省略した。十分な説明ができなかったことをお詫びする。

[受託研究本部 材料研究部 高野正義]

8) 村田肇ら: 火力原子力発電, Vol.40(1989), p.1170