金属組織学的クリープ寿命評価法(MLAS)の開発

増山 不二光^{*1} 西村 宣彦^{*2}

1. 開発の背景

我が国の火力発電プラントは昭和30年から40年にかけて集中的に建設されたため現在では全プラントの過半数が10万時間以上の長時間に亘って運転されている状況にある。従って、ここで使用されている耐圧部材にはクリープなどによる損傷が蓄積されていることがあり、これらのプラントを今後も安全に使用していくためには精度の高い寿命評価を行って信頼性の向上を図る必要がある。寿命評価の手法としては破壊試験が最も信頼性が高く、従来からよく用いられている。しかし、この方法では試験片を切断採取する必要がある、特に大径厚肉部材の場合には容易ではなかった。また、破壊試験で実施されるクリープ破壊試験は長時間を要し、多くの費用が必要であった。そのため、非破壊的寿命評価の手法の開発が強く要望され、種々の手法が試みられてきているが、実用性のある有効な手法は未だに見出されていない。このような状況の中で当社ではクリープ損傷の発生と組織変化との関係についての基礎的な知見に基づいて金属組織学的クリープ寿命評価法「MLAS: Mitsubishi Metallurgical Life Assessment」を開発した。この技術は推定方法の違いによって二つに大別される。

2. 組織対比法による寿命評価(MLAS-Phase I)

火力発電プラントの熱交換器管および配管に多用されている材料はCrMo低合金鋼であり、中でも2¼Cr-1Mo鋼は高温部に使用され、クリープ損傷の発生例も多い。これらの材料はフェライト-パーライト組織からなるが、溶接熱影響部は焼戻しマルテンサイトあるいはベーナイト組織である。通常、熱交換器管では減肉による応力上昇や過熱によって母材部が変形をともなうクリープ破壊する例が多い。これに対して、異材溶接継手や大径厚肉部材では溶接熱影響部にクリープ損傷が発生する例が多いが、この場合には変形はほとんどみられず、粒界にクリープボイドが生成し、それがき裂に成長する⁽¹⁾。そこで、この場合のクリープ損傷の進展と組織変化との関係をクリープ中断材や実機長時間使用材を用いて調査した結果、クリープ損傷と関係のある機械的損傷、顕微鏡組織および析出物分布はクリープの進展に対応してそれぞれ、図1に示すように大きく4段階あるいは3段階に区分できることが分かった。そこで、このような区分をクリープ破壊試験結果から求めたクリープ破壊寿命消費率と対比させると、図2に示すように組織状態は総合して7段階に分けることができ、これからクリープ破壊寿命消費率を範囲として推定できた⁽²⁾。すなわち、例えば機械的損傷をⅡ_D、顕微鏡組織をⅢ_M、析出物分布をⅡ_Pと区分した場合にはクリープ破壊寿命消費率は40～60%と推定される。この方法では非破壊的に採取し

図1 CrMo鋼熱影響部の損傷因子の区分。

損 傷 因 子			総合損傷	クリープ破断 寿命消費率 (%)
機械的損傷	顕微鏡組織	析出物分布	区分	
Ⅰ _D	Ⅰ _M	Ⅰ _P	A	0
	Ⅱ _M		B	10
Ⅱ _D		Ⅱ _M	C	20
	Ⅱ _P		D	30
		Ⅲ _M	E	40
	Ⅲ _D		Ⅲ _P	F
G		60		
Ⅳ _D				70
				80
				90
				100

図2 損傷区分とクリープ破壊寿命消費率との関係。

たレプリカや抽出レプリカを用いて寿命評価を行うことができ、すでに実機検証試験によってその実用性を確認し、図3に示すように比較的精度よくクリープ寿命を推定することが確認された⁽²⁾。このような手法が可能なのは溶接熱影響部がクリープ脆性を示し、母材部とはクリープ損傷の挙動が異なるからである。すなわち、溶接熱影響部では初期の炭化物、M₂₃C₆またはM₇C₃が加熱またはクリープの進行にともなうM₆Cに変化していくが、この炭化物と母材との境界には図4に示す薄膜を用いた分析結果から分かるように硫黄が偏析⁽³⁾し、これがボイド発生核となり、クリープ脆性を示す。従ってクリープ寿命の消費は線型消耗則に従い、加速試験による推定寿命消費率が実機条件におけるそれと同じになる。

3. 組織定量化法による寿命評価(MLAS-Phase II)

クリープの進行にともなう変化する組織あるいは損傷には種々があり、これらを定量化したパラメーターに

* 三菱重工業株式会社技術本部長崎研究所
1) 材料・溶接研究室主務 2) 材料・溶接研究室
Development of Metallographic Creep Life Assessment Technique; F.Masuyama, N.Nishimura (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)
1988年1月28日受理

図3 組織対比法とクリープ破断試験による寿命評価結果の比較。

図4 無析出粒界および M_7C_3 , M_6C 炭化物析出粒界における元素濃度分布。

よって予め実験室的に作成したクリープ破断寿命消費率との関係図から定量的な寿命評価が可能であり、すでに次の項目を定量化し、これによって寿命評価を行うことが可能になった⁽⁴⁾。

- (1) M_6C の全析出物に対する比率。
- (2) M_6C の球状化率。
- (3) クリープポイドの面密度。

この外に組織および損傷程度の定量化法として新たに CMA (Computer-aided X-ray Micro-Analyser) による濃度スペクトル法を開発した⁽⁵⁾。CMA は原理的には EPMA と同じものであるが、電算機を付加することによって多数点の元素濃度の定量分析を短時間で行うことができ、広い面積を超高速度で分析できる点に特徴が

ある。濃度スペクトル法は CMA で分析し電算機に記憶されたデータから濃度の最小、最大値を求め、その濃度範囲を任意の濃度単位 c に区分して、各区分内の分析点数 $N(c)$ の全分析点数 N_T に対する比 $X(c) = N(c) \times 100\% / N_T$ を c に対してプロットして求めるものである。従って、図 5 に示すように濃度スペクトルは析出物の大きさや分布状態、すなわち、組織状態によって変化し、析出物がないか、あるいは微細な析出物が均一に分布している場合にはスペクトルは幅が狭く、ピーク高さが高いものとなる。また、粗大な析出物を含む場合にはこれとは逆の形のスペクトルが得られる。このスペクトルのうち、主ピークと高濃度側のスロープは面積率を対数目盛でプロットすればそれぞれ式(1)および(2)のガウス分布式あるいは直線として近似できる。

$$X(c) = K_1 \exp \{-K_2(c-c_0)^2\} \quad (1)$$

$$X(c) = K_3 \exp(-\lambda c) \quad (2)$$

ここで、 $X(c)$: 面積率(%), K_1 : ピーク波高(wt%), K_2 : 分散度(wt%⁻²), c_0 : ピーク濃度(wt%), λ : 対数減衰率(wt%⁻¹)。

これらの式のうち、 K_1, K_2, λ は組織変化や損傷の程度に対応して変化し、クリープ破断試験によって求めた寿命消費率とよく相関がある。図 6 はボイラ過熱器管異材溶接継手として約 90000 時間使用され、クリープ破断試験によって 63% の寿命消費率が推定された $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼溶接熱影響部における Cr と Mo の濃度スペクトルである⁽⁶⁾。Cr 濃度スペクトルには 3 個のピークが現われたが、実線で示すピークは母相から、また点線で示

図5 析出物の生成した試験片の CMA 解析による濃度スペクトル。

図6 長時間使用した $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼における Cr および Mo の濃度スペクトル。

すピークはそれぞれ大きさと分布状態が異なる $M_{23}C_6$ あるいは M_7C_3 から得られたものと考えられる。一方, Mo については実線で示すピークと点線で示すスローブからなっていたが, ピークは母相から, また Mo の高濃度側へ傾くスローブは Mo を主体とした M_6C の析出状態から得られたものと考えられる。この外に長時間使用され, それぞれ損傷度の異なる試験片について同様の方法によって濃度スペクトルを求め, 各係数とクリープ破断試験による寿命消費率との関係を求めたのが図 7 である⁽⁶⁾。両者に良い相関関係がみられるので, 上述の濃度スペクトル法による組織の定量化によって精度の高い寿命評価が可能である。CMA による濃度スペクトル法はオーステナイト鋼の組織定量化にも有効である。図 8 は蒸気配管として約 630°C で 130520 h 使用された 316 型鋼とそれに再溶体化処理を施した試験片の Cr および

Mo の濃度スペクトルである⁽⁷⁾。再溶体化処理材には析出物がないために Cr および Mo の濃度スペクトルはそれぞれの平均濃度に単一のピークをもつ形状になったが, 長時間使用後には母相組織を示すとみられる主ピークは, いずれにおいてもピーク波高が低く, 半幅幅が広がった形となり, さらに Cr の濃度スペクトルにおいては Cr 欠乏相および σ 相を示すとみられる 2 つのピークが新たに現われた。このようなスペクトルの形状は顕微鏡組織ともよく対応し, 主ピークを前述の式(1)で近似した場合, その係数はクリープ破断寿命消費率と良い相関があり, これによって寿命推定を行うことができた⁽⁶⁾。

4. 実用化と将来性

図 9 は上述の金属組織学的手法による寿命評価の流れ図⁽³⁾を示す。組織対比法による寿命評価はレプリカと抽出レプリカを採取すれば, 非破壊的にかかなり精度よく行うことができる。すでにこの方法は昭和 62 年末までに国内電力会社の延 37 プラントの寿命診断に適用され, 組織検査による寿命評価の中心技術として今後とも実用されることになっている。また, 海外のプラントにも適用して, その実用性がすでに確認されている。この方法の特徴は極めて簡便な手法でありながら, 損傷を直接的に検出できる点で実用性が高く, 標準的な手法として世界的に広まっていくとみられる。一方, 組織定量化法による寿命評価法は寿命推定の精度をさらに向上させる方法として組織対比法と併用される。また, CMA による組織定量化法, すなわち濃度スペクトル法はここで述べた寿命評価への適用にとどまらず, セラミックスや複合材料等の組織解析法としても威力を発揮している技術であり, 他の分野においても広範な利用が期待される。

図 7 長時間使用した $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼の濃度スペクトルにおけるピーク波高 K_1 および対数減衰率とクリープ破断寿命消費率との関係。

OM: 光学顕微鏡 SEM: 走査型電子顕微鏡 STEM: 分析電子顕微鏡 CMA: 超高濃度領域マルチアナライザ

図 9 金属組織学的手法による寿命評価の流れ図。

5. 特 許

国内: 約 30 件を特許出願中。

海外: 米国他に 2 件を特許出願中。

文 献

- (1) 瀬戸口克哉, 増山不二光, 上原勝景, 高野勇作: 日本材料学会第 22 回高温強度シンポジウム前刷集, (1984), 82.
- (2) 須藤義悦, 田中元幸, 村山勝明, 河村友穂, 佐田哲朗, 増山不二光, 中島清幸: 第 1 回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウム論文集, 「構造物の安全性および信頼性」, 1(1987), 213.
- (3) 増山不二光, 西村宣彦: 日本金属学会講演概要, (1987・4月), 186.
- (4) 佐田哲朗, 南條房幸, 増山不二光, 西村宣彦: 三菱重工技報, 24(1987), 255.
- (5) 増山不二光, 西村宣彦: 日本金属学会講演概要, (1987・4月), 387.
- (6) F.Masuyama, N.Nishimura and K.Setoguchi: Proc. 3rd Int. Conf. Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, (1987), 879.
- (7) F.Masuyama, N.Nishimura and H.Haneda: 1st Int. Conf. Coal-Fired Power Plants, Palo Alto, CA, (1986).

図 8 長時間使用された 316 型ステンレス鋼の濃度スペクトル解析例。