技術資料

テーマ特集

構造物の余寿命評価技術

高温機器の余寿命評価* (劣化評価技術を中心として)

北 川 正 樹**

Assessment Techniques of the Degradation of High Temperature Plant Materials*

by Masaki Kitagawa**

キーワード：高温機器，余寿命，劣化，損傷，ボイラ，ボイド，評価技術

1. 高温機器の余寿命評価の特徴

高度成長期に建設された機器の中には経年プラントとして寿命末期に近付いた機器が多くなっているが、高温機器においても信頼性の向上や経済性の追求のため機器構成部材の劣化計測および余寿命予測の必要性が年々高まっていることは他機器と同じ状況である¹⁾。高温機器では、高温であるが故に部材に応力がかからなくても材質が時間と共に劣化することが常温機器の余寿命推定とは異なる点である。

使用中機器の余寿命推定はその時点までの材料の劣化程度の計測または残存強度の推定にはじまり、その後の運転予想履歴に基づく余寿命計算をするという2段階に分けられる。高温機器の余寿命推定においては、上記の熱活性に基づく劣化現象のために、劣化度や残存強度の推定、余寿命推定の両方に時間依存性評価が加わるので常温機器のそれらよりも複雑である。

以下に、劣化測定技術の現状と問題点を中心にその概要を紹介する。

2. 高温部材の劣化の種類

高温機器では使用中に材料に生じる劣化を応力を主因する劣化と上記の熱的活性を主因とする劣化に分けられる。ここでは前者のような応力が主原因の劣化を機械的

劣化と呼び、後者のような熱活性が主原因の劣化を組織劣化と呼ぶことにする。組織劣化はそれ自体進んだとしても力がかからない限り部位の破損に至らない。ただし、組織劣化が負荷状態で歪エネルギーによって加速されることはよく観察されることである。機械的劣化は運転時間と共に増加し、それがある限界値に達すると部位の損傷となり機器が使用不可能（寿命）になる。組織劣化は寿命の決定プロセスに許容上限値の減少や機械的劣化速度の上昇等の観点から影響を与えることになる。

機械的劣化の情報からは材料が破壊過程のどの位置にあるかがわかり、結果的に残存強度が処女材の何%位だという推定が可能である。組織劣化の情報からは材料が持つ金属学的特性がわかるので、それから従来の冶金学的知識を介して残存強度を推定できることがある。

高温機器における機械的劣化としては、変形やき裂の他にき裂の前段階であるキャビティ（またはボイド）があげられる。組織劣化としては、材料の軟化（または硬化）や脆化、高温腐食等があげられる。また、それらの原因である各種の組織変化も組織劣化のパラメータであると言える。

3. 劣化の非破壊的または準非破壊的計測方法と寿命の関係

現在提案されている高温機器材料の機械的劣化および組織劣化度および残存強度の測定方法を表1に示す。それらの概要と問題点等を以下に紹介する。

3.1 機械的劣化の計測法

a) ボイドの定量化と劣化レベルの関係

*原稿受付 平成2年3月3日

** 石川島播磨重工業株式会社
Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

表 1 高温機器材料の強度劣化及び残留強度評価技術

	項目	強度劣化		残留強度	
		非破壊計測法	準破壊的計測法	計測法	推定法
機械的劣化度	ボイド	レバ (面積率又は A/P 法) 超音波 (パルス分析) 形状計測		引-試験	
	変形	レバ (結晶変形法) 電気抵抗 超音波, レバ	PT, RT, ECT	小型 T.P	
組織劣化度	軟化硬化	組織炭化 (炭化物) 転位	直接的 方法 間接的 方法	レバ, 抽出レバ (炭化物) 電気抵抗, 線回折 レバ	電子線回折 炭化物分析法
		そのもの		硬度試験	硬さ法
	脆化	析出など (P.S 等)	直接的 間接的	メタなどの分析 電気化学的方法 (Ir, PS 法)	引-試験 破壊靱性試験
	減肉		肉厚計 (UT 型)		

高温損傷の典型的なものとしてキャビティ (またはボイド) がある。結晶粒界に発生, 成長し, やがて合体しき裂となって部材の肉厚を貫通することになる。後半のき裂進展は破壊力学的に定量化して余寿命予測をする技術が開発されている。ここでは, 寿命の大半を占めると考えられるボイド成長期の計測技術について述べる。

ボイドを観察する方法としてレプリカ法が古くから用いられている。ボイド量の定量化方法については, A パラメータ法と面積率法の二つの方法が用いられている。A パラメータはボイドの観察される粒界の全粒界に対する割合であるが, 光学顕微鏡で観察されることが多い。この方法は粒界の区別のつきにくい溶接部等へ適用が困難である。面積率はボイドの面積の全観察面積に対する割合である。この方法ではエッチの仕方によって測定値が異なるので注意を要する。図 1 は面積法による検定曲線の一例である²⁾。

もう一つの方法として最近開発された超音波法³⁾がある。超音波によるき裂探傷技術は古くから開発されていたが, その技術をボイドのような小さい欠陥にも適用できるように改良したものである。従来, 材質の変化が音波に及ぼす影響を背面からの反射波を分析して材質の変化に関する情報を得ていたが, 新しい方法では図 2 に示すようなボイドから反射してくる波を直接分析していること, および従来より高周波側の音波を用いている点が新しい。ボイドからの反射波は表面からの反射波の間に表れてくるが, この信号をフーリエ変換で周波数解析しその結果を定量化したもの (ノイズエネルギー) である。この方法の特徴は, ノイズエネルギーは時効等による材

図 1 2.25 CrMo 鋼の溶接部および熱影響部のクリープボイド量とクリープ寿命比の関係²⁾ 図 2 超音波法によるボイド測定法の原理³⁾

料の析出物の組織変化にはあまり影響を受けないことである。(結晶粒には依存性がある。) すなわちノイズエネルギーは主としてボイドや微視き裂等の機械的劣化を代表していると考えられる。図 3 に超音波法を微視き裂を含む 2.25 CrMo 鋼に適用した検定曲線の例を示す⁴⁾。

b) き裂の定量化方法と寿命の関係

ボイドが連結すると微視き裂になる。上記の 2 方法は微視き裂の計測にも適用可能であるのは言うまでもない。ある程度大きなき裂については RT や PT, 渦電流法, 電気抵抗法, またビデオスコープを用いた直接測定

等の測定方法が使われる。

き裂長さも直接破損までの段階を表現するパラメータとして用いることが出来る。図4は微視き裂の最大値と疲労寿命比との関係の一例である⁵⁾。微視き裂のうち最も長いものがき裂として成長し部位の損傷になっているのがわかる。

c) 変形の測定法と寿命の関係

材料はそれぞれ破断までに変形し得る歪が決っていて、その歪になれば部位は破損すると考えられる。(あるいは部位の機能上許容し得る変形には限界が存在することも考えられる。)伝熱管ではその直径を測定することにより変形量を推定し、材料がどの程度劣化を受けているかを判断する。多くの場合、伝熱管は製作当初にすでに外径のばらつきをもっているため、初期値が記録されていない限り歪値の測定値には誤差を含んでいる可能性がある。図5の例は伝熱管の破損歪のデータを引張りクリープ試験データや内圧試験データをベースにし、上記の製作時の外径のばらつきなどを考慮して提案されている判

図3 2.25 CrMo 鋼の超音波ノイズエネルギーとクリープ寿命比の関係⁴⁾

図4 最大き裂長さと疲労寿命比との関係⁵⁾

定基準である⁶⁾。

初期値が不明な場合に変形を推定する方法として結晶変形法が提案されている。一般に金属の結晶の形や方向は製作時にはランダム分布している。それが一方向に変形を受けることにより結晶の形が変形の方に伸びてくる。これをフェレ径比 (伸び方向の長さとそれと直角方向の長さとの比)⁷⁾や最長長さ方向の分布の標準偏差⁸⁾などで定量化して寿命との関係を求め、検定曲線としているものもある。この方法では応力状態が一軸の場合と多軸の場合では破断歪が異なること、また負荷応力レベルによって破断歪が異なること⁷⁾等適用上の注意が必要である。また、測定可能な下限歪率は10%に近い値である

図5 伝熱管直径歪とクリープ寿命比の関係⁶⁾

図6 結晶最長方向のばらつき標準偏差値とクリープ寿命比との関係²⁾

がもっと小さな歪が測定可能になるような改良も今後必要になってくるであろう。図 6 は最長長さ方向の標準偏差とクリープ寿命比を示す検定曲線の例である²⁾。

3.2 組織劣化の測定法

a) 硬さの測定と使用応力推定および残存強度推定への応用

材料の硬さは熱活性によって変化させられるものと、負荷によってそれが加速されたものが合成されて測定される (図 7 参照)⁹⁾。この加速の程度はクリープの場合負荷応力に依存することがあり、加速の程度を予め実験室のデータから検定曲線を作っておけば硬さ変化から使用応力を (一次近似的に) 推定することが出来る。

硬さが材料の強度と密接な関係がある場合には、硬さを測定することにより材料の残存強度を推定することが出来る。図 8¹⁰⁾ はタービンロータ材の疲労余寿命を推定するのに硬さ測定を巧く利用した例である。ここでは硬さから降伏応力も推定し歪集中係数評価の精度向上に役立てている。この方法が使えるには硬さと強度が密接に関係があること、さらに硬さの変化が大きいことが寿命推定を可能にする必要条件である。

b) 炭化物組織変化の定量化と劣化計測への応用

硬さ変化の一つの原因は炭化物の性状変化にあるので炭化物の変化を定量化することにより組織劣化度の推定ができる。実機では炭化物の変化は主として熱活性現象で支配されることが多いので、その場合炭化物の変化を図 9 に示すような顕微鏡写真見本と比較することにより、使用時間がわかれば使用温度を推定することができる。

炭化物が凝集粗大化すると母材のマトリックスの電気抵抗が減少する。この凝集粗大化は歪エネルギーによって加速されるので、その加速分を測定することにより材料の劣化度を定量化しようとする提案¹¹⁾がある。電気抵抗

抗はまた転位分布にも影響を受けるのでクリープ初期の電気抵抗の減少は炭化物の析出と転位密度の減少とによるものと考えられている。一方、電気抵抗は微視き裂が発生し成長すると逆に増加する傾向があるので、図 10 に示すように¹¹⁾ 寿命の中ほどで電気抵抗の変化傾向が反転する。このため劣化度の判定が困難になるので、この方法は単独で劣化度を決められないが、他の方法と並用して結果の確信度を上げることに用いることができる。

c) 析出物分析を用いた残存強度推定

炭化物の定量化に定量分析装置を用いる方法がある。広域分析装置で約 1 mm 四方の面積の材料を分析し、金属分子の濃度分布から炭化物析出の変化を読取り、図 11 に示すようにそれを余寿命と関連づけたものである¹²⁾。炭化物の析出は一般には熱活性で起こる現象なのでその状態のみで劣化レベルが決まるというのは理解しにくいのであるが、1 つの材料の強度変化を考えると特定の析出物の性状が残存強度と一対一に対応することもあり得ると考えられる。提案者によると 2.25 CrMo 鋼の溶接熱影響部については負荷応力レベルや温度に依存せず成立つと言われている。

d) 不純物偏析：電気化学的方法による脆化レベルの推定

材料の脆化は不純物元素の粒界等への偏析が原因であることが多いが、偏析が起こると腐食雰囲気中での不動態被膜が破壊しやすくなったり、または腐食電流が不規則になったりする傾向が大きくなる。この傾向を定量化したのが電気化学的方法で、再不動態化電流法と腐食電流スペクトル法と提案されている¹³⁾。図 12 に再不動態化電流法の測定装置とロータ材 CrMoV 鋼用の検定曲線の例を示す¹³⁾。

e) 転位構造変化の X 線回析像、電子線回析像、電気抵抗による定量化と劣化レベルの推定への応用

転位組織は材料の硬さとの関係が大きい、それを定量化する方法としては X 線回析像や透過電子顕微鏡像、電子線回析像などがある。上記のように電気抵抗値も転位密度に影響を受けるが炭化物の析出や微視き裂の成長にも影響を受けるので分離が困難である。現在、開発中である。

f) 酸化量の測定技術 (超音波厚さ計) と寿命の関係

耐圧部位にとって規定の肉厚を確保することは重要である。定検時には肉厚を測定し酸化によって肉厚が減少するとともに、規定肉厚を下まわる時期を推定する。密着性の悪い酸化膜の場合には時間に比例して酸化膜の厚さが増加し、密着性の良い酸化膜の場合には指数則で成長する。

図 7 タービンロータ材の硬さ変化と負荷応力推定への応用⁹⁾

図8 タービンロータ材の硬さ変化のクリープ疲労寿命推定への応用¹⁰⁾

3.3 破壊的計測法による残存強度の測定

a) クリープ試験

実機から少量のサンプルを採取できればその材料の強度試験による残存強度の推定ができる。厚肉部材の材料採取はトレパニングと言われる手法でポート形状（長さ約100 mm）の試料を採取することが多い。伝熱管では損傷を受けていそうな場所から代表として数メートル採取して出てくる。

トレパニングで採取した材料は量が少ないので直径2-3 mm程度の超小型試験片に加工して試験を行なう。酸化による減肉がないように注意すれば超小型試験片でも十分信頼の高い結果が得られる。

寿命延伸は供用中のプラントで行なわれるので、材料試験に多くの時間をかけられない。そこで、クリープ試験を加速する方法が必要であるが、その方法として

θ プロジェクション法

図 9 2.25 CrMo 鋼の組織変化の標準写真

図 10 電気抵抗値変化 (時効材との差) と寿命比との関係⁽¹¹⁾

Isostress 法

がある。

θ プロジェクション法ではクリープ曲線を(1)式

$$\epsilon = \theta_1(1 - \exp \theta_2 t + \theta_3(1 - \exp \theta_4 t)) \quad \cdots \cdots (1)$$

の形で近似し、そのパラメータを短時間高応力クリープ試験で求める。図 13 に示すように θ は応力依存性が単純であるので低応力長時間側へ外挿しやすい^(14,15)。

図 11 2.25 CrMo 鋼の熱影響部析出物分析結果から残存強度の推定検定曲線⁽¹²⁾

Isostress 法は、実機条件のクリープ強度を温度加速で求める方法であるが、応力は実機レベルの応力を採用し、温度のみ加速して短時間に結果を得ようとするものである。クリープ延性の高くない材料ではかなりよい推定ができるが、クリープ延性の高い材料の高温高応力試験においては実機条件より破断歪が大きくなることがおおいが、その分だけ加速試験の寿命が長寿命側を推定する側に出てくるので補正する必要がある。

b) 靱性試験

材料の脆化レベルを評価するために小形パンチテストと呼ばれる方法が提案されている。10 mm 角の薄い試料を実機より採取し、それを保持して鋼球で押して破壊エネルギーを計測しようとするものである⁽¹⁶⁾。破壊靱性値

図12 タービンロータ材の再不働態化電流と脆化度の関係¹³⁾

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \theta_1 \{1 - \exp(-\theta_2 t)\} + \theta_3 \{\exp(\theta_4 t) - 1\}$$

図13 θ パラメータ法の θ の応力依存性¹⁴⁾

との対応がつけば、裂進展寿命推定の最終段を決めるのに有用な情報になる。

4. 余寿命評価方法

4.1 クリープ破損寿命およびクリープ疲労破損寿命のクライテリアと問題点

クリープの破損クライテリアとしては(2)式の線形損傷則が用いられることが多い。

クリープ疲労の破損クライテリアとしては表2に示すように各種の方法が提案されている¹⁶⁾。(3)式の線形損傷則が使いやすいので用いられることが多いが、用いるクライテリアの寿命推定精度が重要なので良く検討しておく必要がある。

$$\Sigma t/t_r(\sigma) = 1 \quad \text{.....(2)}$$

$$\Sigma n/N_r(\varepsilon) + \Sigma t/t_r(\sigma) = 1 \quad \text{.....(3)}$$

(2)式を2.25 CrMo 鋼の歪保持型クリープ疲労試験結果に当てはめると図14のようにクリープ損傷が非常に小さい所で破損が起こることが最近報告されている。従

図14 2.25 CrMo 鋼のクリープ疲労寿命クライテリアにおよぼす繰返し軟化の効果¹⁸⁾

表2 提案されているクリープ疲労クライテリア¹⁵⁾

- (1) 線形損傷則(線形累積損傷則)
- (2) ひずみ範囲分割法(Strain Range Partitioning-SRP法)
- (3) 周波数修正疲労寿命則(Frequency Modified Fatigue Life式)
- (4) 周波数分離寿命則(Frequency Separation)
- (5) 周波数修正損傷則
- (6) 損傷速度説(Damage Rate Approach-DRA法)
- (7) ねじり成長則(Tomlkinsらの方法)
- (8) 修正ひずみ範囲分割法(Modified SRP法)
- (9) 変形機構反映延性消耗説(Deformation Map-Ductility Exhaustion)
- (10) 損傷力学的手法(Chabocheらの方法)
- (11) 破壊力学的手法
- (12) ナイキ-カリー-ブ破壊クライテリア

来、クリープ損傷の評価は寿命の半分のサイクルのリラクゼーション曲線を用いて行なわれていたが、繰返し軟化の激しい材料では結果的にクリープ損傷を小さめに評価することになる¹⁸⁾ので、図14に示すようにクリープ損傷の計算にはこの繰返し軟化の配慮が必要であろう。

また、保持時間の効果は一般には引張り保持の方が大きな損傷を与え寿命を短くするが、この材料では図15に示すように、ある特定の温度で特定の歪範囲において逆に圧縮歪保持の方が大きな損傷を与えることが報告されている¹⁹⁾。これらをみても、実機に近い条件でのクライテリアの精度を確認しておく必要があることがわかる。

4.2 実機計算例

図16にボイラTピース内表面角部の応力計算結果の一例を示す。この例のように寿命診断したい機器の運転履歴の代表的なものについて各事象の発生応力を計算し、その履歴に基づいてクリープ損傷や疲労損傷を計算

図 15 2.25 CrMo 鋼のクリープ疲労寿命におよぼす圧縮歪保持の影響¹⁹⁾ 図 16 ボイラ T ピースの応力履歴計算結果の例²⁰⁾

する。図 16 の例にもあるように高温機器の運転の遷移状態では熱応力が大きく発生し、降伏応力を越えることがある²⁰⁾。また、高温定常運転状態でも熱応力は時間と共に応力リラクゼーションを起こし変化しているので、その変化をあまり複雑にならないでかつ精度良く評価できることが重要である。この事例では熱応力の計算のために板厚内の温度分布を各種運転状態について測定し、表面での熱伝達係数を決めているが、正しい熱応力を求めるためには熱伝達係数を正しく評価することが不可欠である。

一般の実機の寿命予測について詳しく述べるスペースはないのでより良い精度の寿命推定を行なう上での留意点を列記するとどめたい。

- ・正確な運転履歴の把握
- ・非定常熱応力解析の必要性
- ・簡易解析法の開発
- ・寿命クライテリアの簡易化と精度向上
- ・長時間データの蓄積
- ・モニタリングの必要性

5. おわりに

寿命予測の技術はここ数年精力的に研究されており、データの蓄積も進んでいる。しかし、予測精度については今後更に向上させて行かなければならないと考えている。

ここでは劣化度の評価方法を中心にまとめたが、寿命推定手法や構造解析手法についても重要であるが紙面の制約上別の機会に譲りたい。

6. 参考文献

- 1) 大友 暁, 中代雅士他, 日本鉄鋼協会, 第 124, 125 回西山記念, (1988. 6).
- 2) 馬木秀雄, 松本誠一, 北川正樹, 野中 勇, 石川 島播磨技報, Vol. 29, No. 3, (1989. 5), pp. 162-169.
- 3) M. Nakashiro, and H. Yoneyama et al., Int. Conf. on Advances in Matl Tech for Fossil Plants, Chicago, ASM, (1987. 9).

- 4) 北川正樹, 富士彰夫, 米山, 中島, 服部, 馬木, 須貝, 石川島播磨技報, Vol. 28, No. 5, (1988. 9), pp. 1-7.
- 5) 桜井茂雄, 宇佐美三郎, 梅沢貞夫, 宮田 寛, 材料, Vol. 35, No. 389, (1986. 2), pp. 76-81.
- 6) 浅川幸一, 大友 暁, 雑賀喜規, 鉄と鋼, Vol. 65, No. 7, (1979), pp. 147-153.
- 7) 野中 勇, 北川正樹, 材料とプロセス, Vol. 3, No. 3, ISIJ, 1990.
- 8) 坂口安英, 田村広治他, 火力原子力発電, Vol. 39, No. 6, (1988. 6), pp. 75-86.
- 9) T. Goto, Y. Kadoya et al., Nondestructive characterization of materials II (Plenum Pub. Corp.), Vol., No. (1987), pp. 429-439.
- 10) K. Kimura, K. Fujiyama et al., Current Japanese Material Research Vol. 3 (Elsevier Publ.), Vol. 3, No. (1988).
- 11) 桐原誠信, 志賀正男, 佑川正之, 吉岡, 浅野, 材料, Vol. 33, No. 371, (1984. 8), pp. 1097-1102.
- 12) T. Sada, Y. Nanjou, 三菱重工技報, Vol. 24, No. 3 (1987/May), pp. 255-261.
- 13) 高橋秀明, 日本金属学会会報, Vol. 27, No. 8, (1988), pp. 657-663.
- 14) R. W. Evans, and B. Wilshire, Materials Science and Technology, Vol. 3, No. (1987. 9), pp. 701-705.
- 15) 丸山公一, 及川 洪他, 鉄と鋼, Vol. 73, No. 1, (1987), pp. 26-33.
- 16) 鷹友紹, 庄司哲雄他, 材料, Vol. 36, No. 402, (1987. 3), pp. 296-302.
- 17) 北川正樹, 大友, 雑賀, 機械の研究, Vol. 38, No. 4, (1986), pp. 458-466.
- 18) 野中 勇, IHI 内部資料, Vol., No., (1988. 6).
- 19) 野中 勇, 北川正樹他, 鉄と鋼, Vol. 73, No. 16, (1987), pp. 113-120.
- 20) Masaki Kitagawa, H. Hattori, et al., Int. Conf. on Life assessment and extension, Haag Holland, 1988-6.

社団法人日本工学会主催

第8回 国際会議のための準備セミナー

—英語によるプレゼンテーションの実際—

国際社会の中で, 日本人として講演, 研究発表, 新規プロジェクトの説明等, 英語で発表する機会が増えてきております。

このセミナーでは, 外国人を前にすぐれたプレゼンテーションを行うための効果的な説得の技術と方法を講義と実際のプレゼンテーションの体験を通じて習得します。

1. 対象者

- ・国際会議で発表する予定のある方
- ・英語によるプレゼンテーション能力の向上を図りたい方

2. 日 時: 1990年6月12日(火) 9:00~20:00

13日(水) 9:00~17:00

(集合: 6月11日(月) 18:00 現地)

3. 講 師: ・社団法人日本工学会 理事

- ・(株)ヒューテック代表取締役 肥田 良夫
- ・その他(国際会議参加経験者からの話題)

4. 会 場: 海外職業訓練センター研修施設

千葉市ひび野1-1 Tel: 0472-76-0211

5. 交 通: JR 京葉線 海浜幕張駅 徒歩5分

6. 参加費: 80,000円(資料代, 懇談会費等を含む)

7. 宿泊費: 15,000円(2泊, 食事付)

8. 定 員: 18名

9. カリキュラム

- (1)国際会議の概要 1) 参加の目的 2) 参加者の心掛け 3) 日本人に多い問題点の整理
- (2)国際会議参加の準備 1) オーラルペーパーの書き方 2) 時間配分の心得 3) AVの用意と利用法
- (3)プレゼンテーションの実際 1) 話しかた(視線・発声・姿勢) 2) マイク・AVの使い方 3) 質疑応答の処理 4) 表現
- (4)プレゼンテーションの評価と練習法 1) 自己評価 2) 他者評価 3) 効果的練習法

10. 参加申込み方法

- (1)参加申込みを希望される方は下記に詳細パンフレットをご請求下さい。
- (2)申込締切は5月25日(金) 日本工学会必着です。

11. パンフレット請求先:

〒107 東京都港区赤坂9-6-41

社団法人 日本工学会

電話: 03-475-4621

FAX: 03-403-1738