

プラント機器の余寿命評価技術

—非破壊試験法による評価—

火力発電や石油・化学などのプラント機器に使用されている材料の経年劣化原因には、疲労、クリープ、ぜい化、腐食、水素侵食などがあり、機器の余寿命評価方法として、解析法、破壊試験法、非破壊試験法などがある。これらの方法を組合せ駆使して余寿命診断がなされるが、機器を破壊することなく評価が可能な非破壊試験法の確立と実用化が望まれている。

前報までに、主として破壊試験によるクリープ、疲労および腐食余寿命評価技術を紹介してきたが、ここでは非破壊試験法による余寿命評価技術を超音波法を中心に紹介する。



非破壊試験法の特徴

破壊試験法は、評価精度が高いという長所がある反面、評価に長時間を要し、またプラント機器からの試験片の採取が必要なために、適用範囲に制限があるという短所を有している。これに対して非破壊試験法は比較的短時間で評価でき、また調査部位選定の自由度が比較的大きいこと、しかも定期的に損傷度をモニタリングできることから、非破壊試験法による余寿命評価はプラント機器の寿命管理上非常に有利である。

一般に定期点検などに用いられる非破壊試験法には染色浸透探傷試験、磁粉探傷試験、渦流探傷試験、超音波探傷試験などがあり、これらは主に巨視的な欠陥や、き裂を検出する目的で用いられる。ところが余寿命評価に用いられる非破壊試験法はき裂が発生するまでの損傷度を評価する微視的な方法であり、損傷により生じる材料の組織的変化量や物性的変化量と損傷度の関係を非破壊的に捕えようとする方法である。したがって、広い意味でのいろいろの非破壊試験法が用いられている。

第1表にプラント機器の余寿命評価技術として実用化、あるいは開発中の各種非破壊試験法を示す¹⁾²⁾。

これからわかるように、組織試験法など材料の表層部の損傷度を評価する試験法は多いが、内部の損傷度が評価できる試験法は少ない。その中で内部評価の可能性を有する有力な試験法として超

音波法が注目されている。前報³⁾⁴⁾では、クリープおよび疲労余寿命評価技術の中で非破壊試験法をいくつか紹介し、非破壊試験法でえられた特性値からクリープおよび疲労損傷率を求め、余寿命評価する方法を述べたが、ここでは超音波法を中心とした非破壊試験法による余寿命評価技術について紹介する。

第1表 プラント機器の余寿命評価に用いられる非破壊試験法

非破壊試験法	損傷形態				検出、計測項目	
	クリープ	疲労	ぜい化	水素侵食		
1. 組織試験法	(1)組織対比法	○			機械的損傷、顕微鏡組織、析出物分布	
	(2)Aパラメーター法	○			クリープポイド発生粒界数/観察結晶粒界数	
	(3)クリープポイド面密度法	○			クリープポイド数/観察面積	
	(4)キャビティ法	○			クリープポイド面積/観察面積 クリープポイド平均長さ クリープポイド長さ統計/粒界長さ	
	(5)CMA濃度スペクトル法 (X線マイクロアナライザー)	○			濃度スペクトルのピーク波高、半価幅、対数減衰率	
	(6)M ₂ C炭化物析出率法	○			M ₂ C炭化物の数/全炭化物数	
	(7)炭化物球状化率法	○			炭化物の最長軸/最短軸	
	(8)粒界炭化物粒径法	○			粒界炭化物の平均径	
	(9)炭化物面積法	○			炭化物の平均面積	
	(10)結晶粒変形法	○			結晶粒長径軸と応力方向の角度	
	(1)微視き裂法		○		き裂長さ	
	(2)エッチ法(粒界腐食法)			○	粒界腐食による表面粗さ	
2. 硬さ測定法	(1)硬さ低下量、硬さ比法	○	○		硬さ低下量、硬さ比	
	(2)Gパラメーター法	○			硬さ変化	
	(3)直接法	○	○		硬さ値	
3. 電気抵抗法				○	電気抵抗率比	
4. 分極試験法					分極試験による最小電流密度	
5. 超音波法	(1)音速法	○	○		○	音速
	(2)減衰測定法	○	○		○	減衰係数
	(3)周波数分析法	○	○			B ₁ /B ₂ 周波数分布差
	(4)ノイズ分析法	○	○		○	ノイズ周波数分布
6. BHN法(バルクハウゼンノイズ法)	○	○				バルクハウゼンノイズ
7. 陽電子消滅法			○			γ線のエネルギー分布
8. MAE法(アコースティックエミッション法)			○			MAE信号
9. X線回折法			○			半価幅比
10. 変形計測法	○					動変形部の浮上り量

超音波法

クリープ損傷が進行すると、ポイドや微小き裂などの微小欠陥が発生し、その大きさや数が増大するとともに材料の軟化など物性値が変化する。また疲労損傷の初期段階では、すべりの繰返しにより材料表面に発生した凹凸を起点として微小き裂が発生、進展するとともに材料の微視組織が変化する。水素侵食損傷が進行した場合も、鋼中に侵入した水素と炭化物の反応によりメタンガスが

発生し、微小き裂(マイクロフィッシャー)が生じてその大きさや数が増大する。これらの変化は超音波特性に影響をおよぼす。超音波法はこの微視的变化を利用して損傷度を評価する方法である。

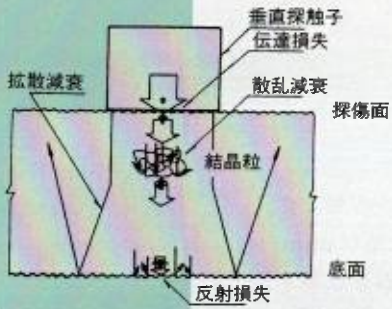
いっぽう探傷を目的としたいわゆる超音波探傷試験法は、損傷がさらに進行して現れたクリープき裂や疲労き裂、水素侵食割れをはじめ、腐食疲労き裂や応力腐食割れなどの巨視的なき裂の探傷に

A-1

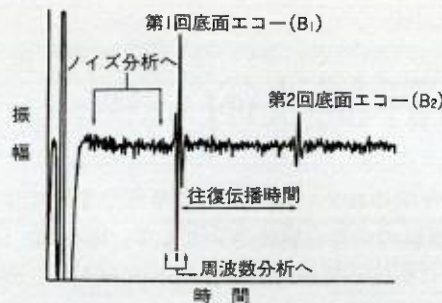
- 1) 火力原子力発電技術協会：火力設備の余寿命診断と耐力向上策，(1994)
- 2) 火力原子力発電技術協会：火力・原子力発電設備材料，(1993)，p.13

A-2

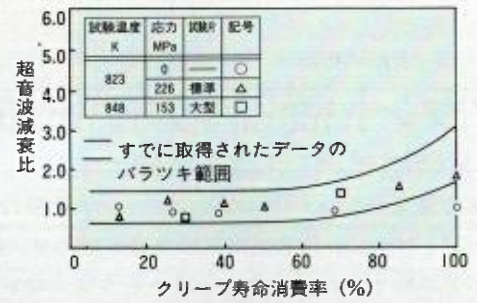
- 3) コベルコ科研：こべるにくす，Vol.4(1995)，Apr.,p.1
- 4) コベルコ科研：こべるにくす，Vol.4(1995)，Oct.,p.1



第1図 超音波の伝播にもなう損失と減衰



第2図 採取波形



第3図 超音波減衰比とクリープ寿命消費率の関係

用いられ、垂直探傷法や斜角探傷法、表面波探傷法などにより欠陥寸法や位置の評価が行われる。

超音波法では、探触子で発生した超音波が水や油などの接触媒質を介して材料中に伝播していくが、第1図⁵⁾に示すように、伝播の過程でいろいろの損失および減衰とノイズ(林状エコー)が発生する。すなわち超音波は探傷面を通過するときに伝達損失をとめない、試験体中を伝播するときの広がりにより拡散減衰が生じる。また結晶粒界やポイド、微小き裂などにより散乱減衰が生じるとともに、散乱してもどってくる信号、すなわち後方散乱ノイズが発生する。さらに試験体の表裏面で反射するとき反射損失をとまなう。その結果デジタルオシロスコープより採取した波形では、第2図⁶⁾のように、試験体の底面における1回目の反射によりもどってきた超音波(第1回底面エコー(B₁))は、2回目の反射によりもどってくる間に損失、減衰し、第2回目底面エコー(B₂)高さは低くなる。また伝播中に生じる後方散乱によるノイズが現れる。

損傷評価に用いられる超音波の減衰法、ノイズ分析法はこれらの超音波特性を分析、利用する方法である。ほかにも周波数分析法、音速法、臨界角反射法などがあり、いずれも現在研究開発段階のものが多いが、代表的な方法について紹介する。

減衰法

①減衰法によるクリープならびに疲労損傷評価

減衰法は、超音波が損傷により生じる微小欠陥などによって散乱され、散乱減衰が生じることを利用して損傷度を評価する方法である。散乱減衰はデジタルオシロスコープから読み取った第2図に示す波形で、B₁とB₂の高さと測定部位の肉厚から、肉厚が比較的小さい場合には(1)式により減衰係数を算出することができる。

$$\alpha = \frac{20 \log(h_1/h_2)}{2L} \quad (\text{dB/mm}) \quad \dots\dots(1)$$

ここに h₁: B₁エコー高さ(%)
h₂: B₂エコー高さ(%)

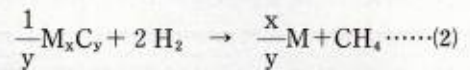
L: 測定部位の肉厚(mm)

高中圧タービンローター材(CrMoV鍛鋼)を用いてクリープ試験を行い、超音波減衰比(損傷材と非損傷材の減衰係数の比)とクリープ寿命消費率の関係を求めた例を第3図⁷⁾に示す。減衰比は寿命消費率が50%を超える寿命後半において顕著であり、タービンローターのクリープ損傷評価に対する減衰法の適用見通しがえられている。

いっぽう疲労損傷についても、前報⁸⁾に紹介したように、疲労寿命比が10⁻²を超える初期からB₁とB₂の減衰量の増加が著しく、これを用いた疲労損傷評価方法が開発されつつある。

②減衰法による水素侵食損傷評価

石油精製、アンモニア合成などの化学プラントの高温高圧水素環境下で用いられる鉄鋼材料は、水素を吸蔵して水素侵食を起すことはよく知られている。水素侵食は、鋼中に侵入した水素が(2)式に示すように、炭化物と反応してメタンガスを生成するとともに⁹⁾、マトリックスが脱炭され、生成したメタンガスが結晶粒界に集積して微視き裂を起させる現象である。



最近では超音波法を用いた水素侵食発生の予測法や深さの測定法が開発され、実機プラントに適用されつつある。

第4図¹⁰⁾は水素侵食を受けた炭素鋼板について、5MHz垂直探触子で測定した減衰係数(減衰率)と曝露温度の関係を示したものである。加熱保持温度(曝露温度)が上昇するにつれて減衰係数は増加するが、4.2dB/in以上では94%に水素侵食が発生しており、減衰係数を測定することによって水素侵食の発生を判断することができる。このことから、減衰法が実機プラントに適用されつつある。

しかし減衰法は底面エコーを利用するため材料の形状、内外表面の状態によっては測定が困難であるので、実機に適用する場合は定期的に減衰係数をモニタリングし、その計測値の変化から水素

5) 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験II, (1990), p.93

6) 米山弘志ほか: 石川島播磨技報, Vol.28(1988), p.306

7) 松原雅昭ほか: 火力原子力発電, Vol.46(1995), p.152

8) 椿野晴繁ほか: 鉄と鋼, Vol.71(1985), p.1070

9) N.O.Cross et al.: API 48th Midyear Meeting, Session on Unexpected Material Failures-Refinery Performance Impaired, May(1983)

侵食の発生を予測する方法が推奨されている。

ノイズ分析法

ノイズ分析法は、材料の結晶粒界や損傷により生じるボイド、微小き裂によって発生する超音波の後方散乱ノイズを分析することによって損傷度を評価する方法である。ノイズ分析では、第2図に示すように、 B_1 の前のノイズ波形にゲートをかけて観察対象範囲を設定し、この間のノイズ成分を取り出して周波数分析を行い、探触子を接触しないときのベースノイズ成分の周波数分析結果を差し引いた結果を求める。このノイズ成分は超音波が結晶粒界で散乱されて生じる後方散乱ノイズのほかに、もし損傷によりボイド、微小き裂が発生している場合には、これらから反射して生じた後方散乱ノイズが検出されるため、両者の周波数成分に変化が生じる。

第5図⁹⁾にはボイラー材における新材とクリープ損傷材のノイズ分析結果の模式図を示す。ある特定の周波数帯域で振幅の形状が大きく変化し、高周波数領域側で差がいちじるしい。ノイズ分析結果を定量的に評価するために、ある一定の周波数帯域幅で積分し、その値をノイズ値として表す。ボイラー材では、ノイズ分析法は測定値が他の方法に比較して大きく、かつ安定しているため、もっとも有効な方法として現在実機プラントに適用されている。

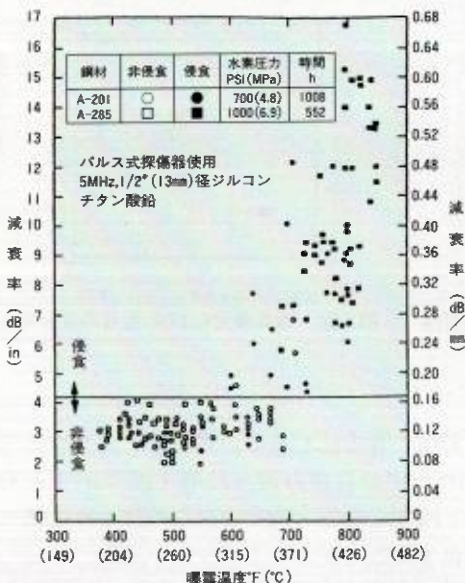
第6図⁷⁾は高中圧タービンローター材を用いてクリープ試験を行い、ノイズ値比(損傷材のノイズ値と非損傷材のノイズ値の比)とクリープ寿命消費率の関係を求めたものである。ノイズ値比も前述の超音波減衰比と同様にクリープ損傷の増加とともに増加し、ノイズ値比が2を超えると顕著な損傷があると判断されるので、これを目安としてノイズ分析法が余寿命評価に適用できる見通しがえられている。

ノイズ分析法は試験体の表面から計測でき、さらに底面エコーは使用しないので内面はどんな形状でもよい。実機への適用に有利である。

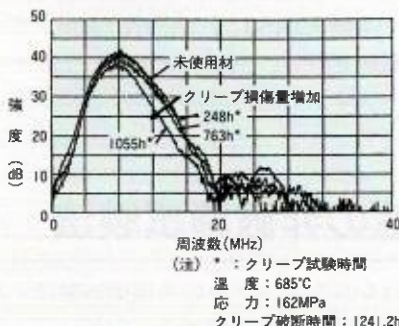
また疲労損傷についても同様の方法でノイズ分析を行い、損傷度の評価が試みられている。

周波数分析法

周波数分析法は、材料の結晶粒界や損傷により生じるボイド、微小き裂での散乱量が超音波の周波数によって異なることを利用して、底面反射波の周波数スペクトルを分析し、その分布状態やピーク周波数、周波数帯域などの変化から損傷度を



第4図 いろいろの温度の水素雰囲気中に曝された炭素鋼の超音波減衰



第7図 SUS321鋼クリープ試験時間による周波数分布の変化(反射法)(20MHz)

評価する方法である。

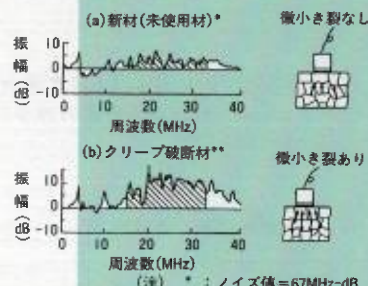
第7図⁶⁾には発電用ボイラー伝熱管に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼(SUS321鋼)において、クリープ試験を中断したときの B_1 の周波数分布結果を示す。クリープ試験時間が増加するにつれて損傷が増加するが、それにとまって高周波数成分が低下していく傾向が見られ、クリープ損傷評価への適用の可能性が見出されている。定量的評価方法の検討が今後の課題である。

また疲労損傷についても同様の方法で周波数分析を行い、損傷度を評価する試みがなされている¹⁰⁾。

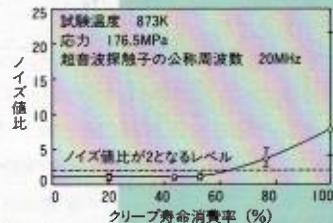
音速法

1 音速法によるクリープならびに疲労損傷評価

音速法は、損傷により生じる微小欠陥や物性値の変化が音速に影響をおよぼすことを利用して損

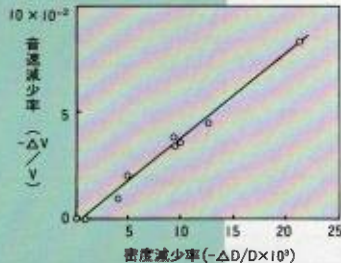


第5図 ノイズ分析によるクリープ損傷量の計測

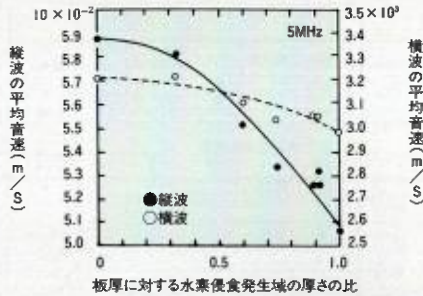


第6図 ノイズ値比とクリープ寿命消費率の関係

10) J.Fagenbaum : Mechanical Engineering, Vol.28(1982),p.28



第8図 クリープによる密度減少とそれによる音速の減少との関係



第9図 水素侵食による超音波の音速変化

- 11) 福原照明ほか：非破壊検査, Vol.40(1991), p.452
- 12) G.S.Pisarenko : 9th World Conf. on Non-Destructive Testing, 18-23 Nov.(1979), p.4A-23
- 13) 長谷川祐蔵ほか：配管技術, Vol.29[10](1987), p.117

傷度を評価する方法である。音速はデジタルオシロスコープから読み取った第2図に示す波形で、 B_1 と B_2 間の時間と測定部位の肉厚から(3)式により算出することができる。

$$V = \frac{2L}{t} \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに L : 測定部位の肉厚 (m)
t : B_1 と B_2 間の時間 (s)

ボイラー用鋼板 (ASTM A302C) を用いてクリープ破断試験を行い、クリープ損傷により生じた密度変化と、すぐれた分解能を有する10MHz広帯域探触子を用いて求めた縦波音速の変化率(試験

片つかみ部の非損傷材の音速に対する損傷材の音速の比)との関係を求めたものを第8図¹¹⁾に示す。これらの間には直線関係があり、縦波の音速変化量を測定して密度変化を求め、クリープ損傷度を推定することができる。

しかし、音速法の場合、他の方法に比べて変化量が非常に小さいため、試験片の平行面加工精度と肉厚測定精度を高くして測定誤差をできるだけ小さくする必要がある。

疲労損傷については音速変化を利用した臨界角反射法の適用が試みられており¹²⁾、材料への入射角が臨界角に等しいときに反射波が急激に減少する現象を用い、臨界角を測定することによって損傷度を評価できる可能性が見い出されている。

2 音速法による水素侵食損傷評価

第9図¹³⁾には水素侵食を受けた炭素鋼を用いて測定された5MHzの縦波と横波の肉厚方向の平均音速を示す。音速は水素侵食域が増すにつれて縦波、横波ともに低下を示し、その低下の割合は横波よりも縦波がいちじるしい。実機プラントでは肉厚測定を精度よく行うことは困難なことから、縦波と横波の音速の比を用いることによって水素侵食域の厚さを評価するのがよいとされている。

A - 3

その他の非破壊試験法

上記のほかにもいろいろの非破壊試験法があるが、電気抵抗法、陽電子消滅法、MAE法(アコースティックエミッション法)、X線回折法などは前報⁹⁾で紹介したので、ここではその他の試験法についてふれる。

分極試験法・エッチ法

高温部材は高温で長時間使用されると焼もどしぜい化が生じ、材料のぜい性-延性遷移温度がいちじるしく上昇することがあるが、主因はりんなどの不純物元素が粒界に偏析し、粒界強度が低下するためとされている。焼もどしぜい化が進行すると分極特性に変化が現れるため、分極試験法はこの分極特性の変化を利用して焼もどしぜい化度を評価する方法である¹⁴⁾。

また焼もどしぜい化度の評価には、粒界を選択的に腐食させ、りんの粒界偏析量を粒界腐食溝の深さ(粗さ)で計測することによって評価するエッチ法も用いられている¹⁵⁾。

強磁性体が外部磁場によって連続的に磁場変化を受けるとき、材料中の磁区の発生、成長過程で磁壁の移動によって磁化が進行するが、実際には材料内部に存在する析出物や介在物、微小欠陥(転位、空孔)などによって妨げられ、磁壁移動が不連続的に起る。この現象をバルクハウゼン効果といい、コイルを近づけると磁束の不連続な変化が雑音として検出される。これをバルクハウゼンノイズと呼ぶ。BHN法はこれを利用した方法で、バルクハウゼンノイズは鉄鋼材料の微視組織の状態に強く依存しているので、疲労損傷、照射ぜい化の評価に適用が検討されている¹⁶⁾¹⁷⁾。

プラント機器の余寿命評価技術の手段として近年注目されている超音波法を中心に非破壊試験法の概要を紹介した。実機プラントにおける余寿命評価は、破壊試験と非破壊試験の関係を結ぶデータベースをもとに、評価対象部材の特性と、非破壊試験法の特徴を考慮して適切な試験法を組合せて総合評価がなされるが、今後の課題として各種非破壊試験法の実機への適用と高精度化が期待される。

[受託研究本部 材料研究部 高田正良]

BHN法