

# 構造物・機器の損傷調査と余寿命評価

## 1. はじめに

機械、構造物を安心・安全に運用するためには、「保守に対する検査の役割といくつかの対応」で報告したような検査技術、モニター技術を駆使して装置の健全性を評価しながら運用していくことが重要である。しかし、これらの装置はしばしば種々の原因で損傷（注：損傷の類義語として不具合、トラブル、故障、事故、破損、き裂、割れ、ガタ、などの用語が用いられるが、これら全てを総称して以後損傷と呼ぶ。）が発生する。損傷要因には、装置に内在していた場合と操作ミスによる人為的な場合があるが、調査、損傷対策が必要になるのは前者の損傷内在要因である。

損傷が発生した場合には、機器の重要度、被害の大きさ、機器、部品の価格などによって対応は異なるが、損傷リスクが高くなるほど損傷の発生原因究明の要求が高くなる。損傷再発の可能性が高い場合には、迅速で的確な原因究明と適切な対応が要求される。場合によっては、市場に出回っている該当機器全てを回収・無償修理（リコール）が必要となる。メーカーは安心・安全に使用できることを保証しているが、この信頼をなくした場合には、企業の存続を左右しかねない事態に陥ることがある。したがって、損傷が発生した場合に、いかに対応するかは、当該企業経営者の重要な判断事項である。

損傷の原因究明には、使用環境条件（運転状況、操作状況、運転累積時間）、設計製造条件、材料調査など所定の手順を追って損傷原因を調査し、その中で一次損傷原因を明らかにしなければならない。その損傷原因究明の有力な手法として、破

損部品を調査し、破損した過程を明らかにする損傷調査技術が要求される。

一方、機器設備は経年使用による寿命消費、部材劣化等が問題になるので、安心・安全に運用するためには機器設備の健全性評価、寿命評価が重要となる。また、経済的な設備更新時期の決定、設備の高効率化をはかるための運用条件変更時の安全確保には、健全性評価、余寿命評価が用いられる。これらの評価は、該当部材の寿命消費要因を明らかにし、寿命消費過程、寿命消費後の損傷発生事象を理解して、はじめて可能となる。つまり、寿命診断技術は損傷調査技術を発展させたものであり、将来の損傷発生箇所、時期を予想し、必要に応じて補修、補強、更新時期などの対策を提案、実行することにその意義がある。設備のメンテナンスは、これら健全性評価、寿命評価を常に考慮しながら、安心・安全を確保し、かつ経済的効果も含めた判断に基づいて実施しなければならない。

建築物や橋梁の基礎にコンクリート構造物が採用されているが、これらの構造物も経年劣化している。特に、日本国内では戦後の昭和時代に多くのインフラ構造物が建造されたが、それらの経年対策が必要な時期に来ており、コンクリート構造物の健全性評価の要求が高まっている。

本章では、これら損傷調査、余寿命診断技術に関する調査（検査・計測）、補修工事、コンクリート構造物の健全性に関する当社の取り組み状況を紹介する。

## 2. 損傷調査と対策

機械は種々の原因によって損傷が発生する。技

術の発展や合理化の進展に伴って設備自体の大型化、高速化、システムの複雑化が進んでおり、安心・安全に運用するためには損傷が発生しない信頼性の高い設備が要求される。万が一損傷が発生した場合には、徹底的に損傷原因を究明しなければならない。損傷が発生しても何の対策も打たずに、原因不明のまま運用されることは安心・安全の見地からは許されないことであり、損傷原因が明らかになれば、経済的で的確な対策も立てられる。

損傷の原因究明には、外観表面上の破損箇所にとらわれない、一次損傷要因を見つけ出すのが最も重要である。ロケットの爆発事故、航空機墜落事故のように甚大な災害が発生する場合でも、一次原因はシールパッキンの不具合、信号線の焼失、補修の不手際、操作ミスなど単純なミスが原因となつて致命的な問題になる場合が多い。例として、航空機事故で最大の犠牲者を出した日本航空機の御巣鷹山墜落事故では、墜落の直接原因は垂直尾翼消失（二次損傷）による操縦不能で山に激突したが、垂直尾翼が消失したのは、客室内の圧力隔壁が破損（一次損傷）し、客室内の空気が高速で膨張し、圧力隔壁の後ろにあった集中油圧制御装置と補助エンジンを破壊し、さらに垂直尾翼のボックスビームを破壊したからである。この圧力隔壁が破損さえしなかったなら、無事定刻に大阪伊丹空港に着陸したはずである。事故調査ではこの圧力隔壁が破損したことが一次原因であることは比較的早く明らかになった。しかし、なぜ圧力隔壁が破損したかの原因が明らかになるまでにはかなりの調査期間を要した。事故機は事故の7年前の1978年6月に大阪空港着陸の際、尾底部を滑走路面にぶつけて中破したために（いわゆる「しりもち事故」）、機体を羽田空港整備場まで曳航して修理した。圧力隔壁の疲労破壊はそのときの修理ミス（修理指示図どおりに実施されなかったこと）に原因があり、局部的に過大な荷重と与

圧の繰返しによって疲労き裂が発生進展し、急速な破壊に至ったものであった。この圧力隔壁が破損した原因を明らかにすることが、当社で実施している損傷調査に該当する。この損傷原因によって、損傷対応策は全く違ったものになる。例えば、圧力隔壁の破損原因が基本的な設計ミスであった場合、対策は急を要し、全世界で就航している同型航空機を即刻使用禁止にする必要がある。材料、材質、製造欠陥であった場合、該当機の製造年月日から、そのときに資材購入、製造した航空機を明らかにして、同じ欠陥を持つ該当航空機を使用禁止して、部品交換、修理すればよい。また、テロによる爆発物持ち込みで爆発したのであれば、航空機の問題ではなく、空港のセキュリティーチェックの問題となる。

このように航空機墜落事故の例で一次原因が明らかになったとしても、多くの墜落原因が考えられ、その原因によって対策も変化する。ただ、いえるのは正確に真の原因を明らかにすることが重要であり、その原因に基づいた的確な対応策を立てる必要がある。対策が間違えば、事故は再発する。

事故の損傷原因を明らかにするには、破損品、損傷品を回収し、詳細に調査しなければならない。H2 ロケット8号機の失敗では、ロケットエンジンを太平洋の海底3000mから引き上げて調査した。その結果、損傷原因が推定の域から、現物調査で損傷原因（液体水素ポンプのキャビテーション発生）が明確になり、的確な対策が打つことで問題を解決できた。このように、損傷調査には、損傷該当部品の調査が必要不可欠である。また、調査担当者は対象物に応じて高度な専門的技術、卓越した技能、経験が要求され、調査は慎重に手順を踏んで実施していく必要がある。

## 2.1 損傷調査の手順

機器に損傷が発生した場合、その原因を明らか

にするには一定の手順が必要であるが、調査対象物、調査手法を臨機応変に対応しなければならない。簡単な例として、自転車の車輪で空気が抜けた場合を考えてみる。復旧には、以下のような手順を踏む。

①単に空気が入っていなかった場合（メンテナンスミス）

まず、空気入れで空気を入れる。問題なければ、そのまま使用でき、対策完了。

②空気が入らない、すぐに空気が抜ける場合（経年劣化）

経年劣化による空気入れ口の弁、虫ゴムの不良、劣化が考えられる。この場合は新しい虫ゴムに交換する。

③タイヤの摩耗、チューブのパンク。（釘など外部要因、経年劣化）

簡単なパッチ貼りのパンク修理でよいか、チューブ、タイヤを交換するか検討する。

④衝突などによる車輪（リム）の変形、破損。（空気が抜けたのは二次的損傷）

この場合は車輪の交換か、自転車を廃棄処分するかは、部品交換費用との大小で判断する。

これらの手順を踏み、損傷原因を明らかにして対策を打たない限り、正常な状態には戻らない。対策にも使用者の運用状況、費用の兼ね合いがある。チューブがパンクした場合、パンク部の補修によるのか、チューブ交換するかは、経験者の事象に基づく判断が必要である。ゴムチューブが劣化している場合には、補修よりもチューブの交換を選ぶ。釘などによる単純なパンクの場合には、安価なパッチ当てによる補修で十分である。このように対策手段は一義的に決まるものではなく、状況判断が必要である。自転車のような単純な装置でも、損傷対策にはこれだけのステップが必要であり、自転車屋のおじさん（専門家）が必要である。ママチャリに乗っているママさんでは対応

は難しいといえる。

これが複雑な機械に損傷が発生した場合には、その原因の調査、対策を立てるには高度な専門的知識が要求される。例えば、火力発電用ボイラが突然停止した場合、送風機停止⇒送風機駆動用モーター停止⇒モーター動力ケーブル過熱・焼損⇒動力ケーブルサイズ選定ミス⇒ケーブルサイズ計算時の電流値過少（設計者の誤認識）…というように真の原因まで遡らねばならない。対策、対応を間違えたために、甚大なる事故が発生した例は枚挙にいとまがない。

損傷の発生確率、頻度分布を示す場合、**図1**に示すバスタブ曲線が使われる。損傷が発生した場合、図のバスタブ曲線でどの位置に該当するのかを検討しながら、損傷発生に至った事情聴取は以下のような手順を踏む。

①人為的操作ミスの可能性について

操作ミスの場合は、設備が問題ではなく、ヒューマンエラー対策が必要になる。

②装置の実績（損傷が頻発しているかどうか）

新製品の初号機であれば、初期故障の可能性大である。

③運転時間

運転時間が長く、ある時突然破損した場合は、経年劣化による末期損傷の可能性が高い。

④使用環境変化、運転条件変化

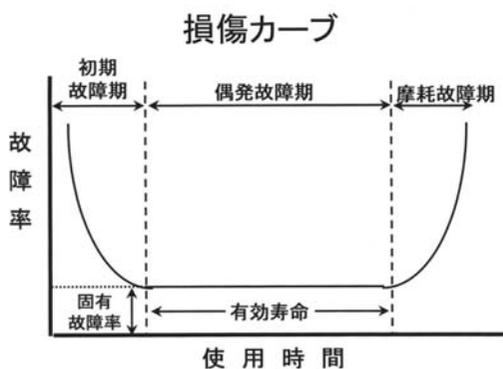


図1 設備の損傷バスタブ曲線

環境が変化した場合、運転モードが変わった場合など。これは、偶発事故で常時可能性がある。

#### ⑤ 損傷被害の大きさ、部品の価格

原因究明には費用が発生するので、調査規模を決めるときに、費用の概算を検討する。損傷調査には必ず費用対効果を勘案しながら対応する。例えば、自転車の故障に修理、調査費用に数万円もかけることはあり得ない。反面、被害額が数100億円になるような大型設備の損傷には、当面の費用の多寡にこだわらず真の損傷原因が明らかになるまで徹底した原因究明と対策の立案を実施する。

損傷の原因調査は、当該設備の運用状況、背景を聞きながら、損傷部位を観察、記録する。調査にあたっては、原因が明確な場合以外は予め原因を特定せずに、可能性のある要因を広く検討しつつ、その中から可能性のないことが立証できる項目を排除して調査項目を絞り込んでいく。この過程を合理的に進めなければ、多大の時間と費用の浪費になりかねず、損傷に関する専門知識を有すると共に問題解決の知識と豊富な経験を有する人材が調査に当たることが有効である。当社では各技術分野の専門部家や損傷調査の専門知識と経験者を擁しており、さまざまな損傷事象に対応できる。以下に損傷の調査項目、対応について紹介する。

## 2.2 材料の問題

機器や装置に使用する材料に起因して発生する損傷の原因は、その材料選定から調達、製造、加工・組立のいずれの段階においても潜在しており、次のようなものがある。

#### ① 仕様決定時のミス

材料の仕様選定時には、使用する条件や環境、例えば、温度、圧力、雰囲気、取扱流体、負荷応力、使用年数等（耐久年数）を正しく設定しなければ、適正な材料が選定されないことにな

る。

#### ② 調達ミス

発注時に正しく注文されなかったり、発注した材料と異なるものが納入されているにも拘わらず損傷が発生するまで気づかないことがある。

#### ③ 材料製造ミス

材料メーカーが材料組成、製造方法を間違えた製品を納入し、発注者側も気がつかずに使用し、損傷が発生するまで気づかないことがある。

#### ④ 加工・組立ミス

多数の部品や素材を使用して加工・組立てる場合、設計仕様で指示された材料と異なるものを使用してしまうことがある。一部に異なる材料が混入する、いわゆる、異材混入が生ずると正規の材料より低級材を使用した部分に損傷が発生する。

損傷が発生した場合、損傷部の材料を分析し、正しい材料が使用されていたかどうかを確認しなければならない。材料成分を分析するには、化学分析による調査が確実である。サンプルは分析する元素数によって変わるが、10gもあれば十分である。また、部材を破損することなく非破壊で検査する場合には、PMI（Positive Material Identification）装置を使用すれば、材料を切り取らずに現場でも分析可能である。最近では海外からの輸入材料を使用するが増加しており、所定の材料仕様であるか確認の業務が増加している。

材料の機械的特性を評価するには、サンプルによる引張機械試験を実施する必要がある。同じように、非破壊的に強度を評価するには、エコーチップやショアー硬さ計等の硬さ計測器を使用する。また、鋳物などの製品の内部欠陥検査にはRT検査（X線、放射線検査）が有効である。また溶接部の非破壊検査では、RT以外にPT（浸透探傷試験）、MT（磁粉探傷試験）、UT（超音波探傷試験）などの非破壊検査手法がある。

## 2.3 設計・加工の問題

これは機器製造メーカーの問題であり、以下のようなものがある。

### ①設計ミス

設計ミスに起因する損傷は、当該製品のみにとどまらず、同型品・同種品にも内在している可能性があり、波及範囲が広く技術上の信頼を低下させることになりかねない。自動車や家電製品のように量産品であれば、リコール対象となる可能性がある。

### ②製造時の加工ミス

製造上で、機械加工、溶接、異材混入、不具合品混入、誤熱処理、塗料選定ミス、などがあり、製造過程の検査で漏れた物が対象になる。製造上のミスはメーカー責任であり、家電、自動車等の量産品でリコール対象となれば、無償修理や交換が実施される。量産品では、量産に入る前の品質管理を厳密に行い、不良率を下げる努力がされている。それでも、設計変更、加工担当者の変更、外注業者の変更、材料購入先の変更等があった場合など、初期故障が発生する確率が高くなる。一般的に初期故障は、設計ミス、製造・施工時の問題など単純なミスの場合が多く、原因、対策は容易に突き止められる事が多い。しかし、設計施工時の単純ミスでなく、技術的に把握できていない未知の問題に起因する損傷であれば、対策が難しくなる。例えば、予期しない振動・応力の発生、発熱・加熱、時間依存型損傷、特殊な複合環境下で発生する、などの損傷は原因が既存技術で特定できないことがある。この損傷に対する原因究明には、実機運転中の応力計測、振動計測、温度計測、実機環境計測などの実機計測が有力な手段になる。高温回転機器で損傷が発生した場合、使用温度が問題なのか、振動が問題なのか、動的な振動による発生応力が問題なのか、実際に計測して原因を究明する必要がある。

## 2.4 環境（腐食）の問題

環境要因による損傷は、損傷原因別の分類では、常時1位であり、環境（腐食）の原因としては以下のようなものが考えられる。

- ①冷却水の問題
- ②潤滑油の問題
- ③塩害、ダストなど雰囲気の問題
- ④異種金属
- ⑤迷走電流による電食
- ⑥もらい錆び腐食の問題
- ⑦応力腐食割れ（SCC）

など、設備の環境が悪くなれば損傷が発生する。腐食の問題も他の損傷事例と同様に真の一次要因を正確に把握するには、詳細な調査が必要である。腐食の原理は金属材料特有の電気化学反応であり、環境の影響が大きく、材料自体の調査と共に環境も同時に調べなければならない場合が多い。冷却水が問題になった場合でも、水処理に問題があるのか、配管に問題があるのか、水と共に腐食生成物を分析する必要がある。損傷部位を水で洗い流したり、付着している汚れ、泥、錆びを吹き飛ばしたら腐食の元凶を見逃す場合がある。図2は、泥中にいた微生物による微生物腐食によって生じた配管腐食の例である。

同様に、潤滑油による腐食、塩害などの環境問題が発生した場合も、油の採取、スミヤ（表面付着物の拭き取り採取）によりサンプリングしたり、環境の排気ガス、大気の採取、ガス分析が必要になることが多い。

サンプリングには状況に応じた細心の注意が必要であり、経験に基づいた採取技術が要求される。分析目的とする物質をある程度特定し、対象物の予想測定濃度、精度などを把握しておかなければならない。これらを間違えば、被測定物の測定結果よりも誤差要因の方が大きくなり、正確な分析ができなくなる。

## 2.5 経年劣化による損傷

一般に機械・設備には耐久年数があり、この耐久年数を超えて使用すれば当然故障頻度は高くなる。老朽化した機械に「ガタがきている、もう寿命である」と言うようになれば、損傷が発生しても修理して使用するか、更新するかの検討が優先し、損傷原因、対策にあまり注意を払わなくなる。これが経年劣化の事象であり、図1の損傷バスタブ曲線で右側の発生頻度が急に高くなる領域である。この末期での損傷要因には以下のようなものがある。

### (1) 腐食・摩耗

腐食・摩耗は、目視検査で見つかりやすく、進展も一般的に遅く、比較的管理しやすい。腐食・摩耗が問題になって損傷する場合は、急激な環境変化が大きな要因である。通常の経年による腐食は管理が容易な部類にはいるが、応力腐食割れ（SCC）の場合は、き裂進展評価が難しく、ある時突然に発生する場合がある。図3に溶接時の残留応力によるSCC割れのマイクロ観察結果を示す。以前はSCCの割れが見つかった場合には全て補修の対象としていたが、最近では、板厚方向の応力分布を評価し、正確な引張応力分布から、き裂を許容する評価法、超音波

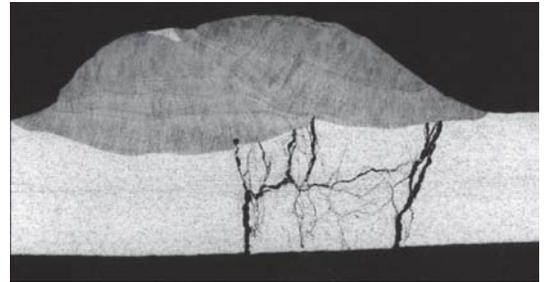


図3 溶接時の残留応力が原因で発生した応力腐食割れ（SCC割れ）

でき裂の進展速度をモニターする手法などが採用されている。SCCは、発生 の 3 要素である材料・応力・環境が共存した場合に発生するので、その3要素のいずれかを改善することが防止策となる。

### (2) 疲労

材料は降伏応力点以下の弾性域で使用されていても、繰返荷重によりき裂が発生、伝播する場合があります、疲労損傷と呼ばれる。一般的には、弾性域内の応力範囲で繰返数が数十万回以上の疲労を高サイクル疲労、塑性変形が含まれて繰返回数が数万回以下の疲労損傷を低サイクル疲労と区別される。一般機械の疲労設計基準では、部材に発生する繰返応力が、疲労寿命が無限である疲労限以下で設計される。また。

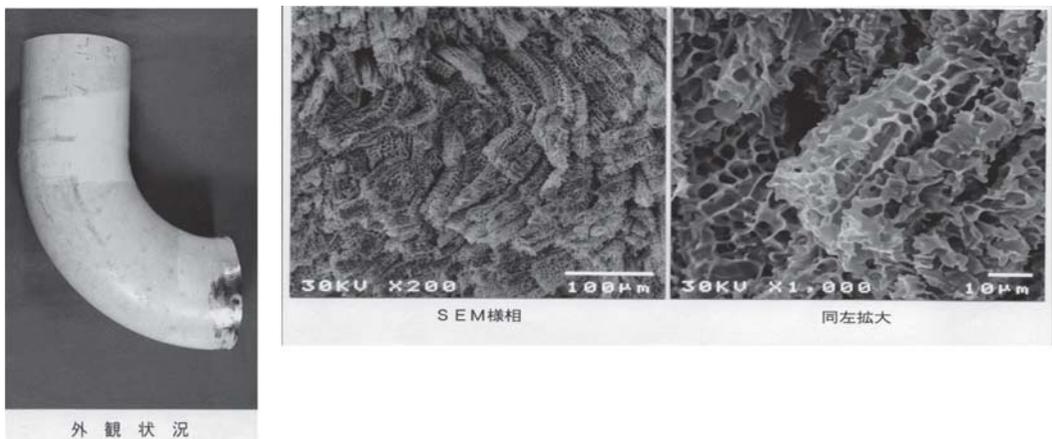


図2 ステンレス鋼管の微生物腐食（SUS304配管）

ASME 基準では、疲労強度曲線（応力振幅と破断回数の関係）で想定寿命中に負荷される回数－応力振幅点よりも回数で 20 倍点、応力範囲で 1/2 点で、低い寿命の応力振幅値を許容設計応力値とする。図 4 に代表的な疲労損傷破面を示す。破面は一般的に平坦であり、貝殻模様（ビーチマーク、シェルパターン）の形態、ミクロ観察でストライエーションが観察される。

長年使用中に、初期設計条件よりも過酷な仕様環境変化、経年による疲労寿命の累積、腐食による部材減肉による応力増加、腐食ピット形成による応力集中部位の発生などにより、疲労き裂が発生する。ひとたび疲労き裂が発生すれば、それまでの疲労強度評価とは全く異なる「疲労き裂伝播」による評価が重要になる。疲労損傷は、き裂発生までには時間がかかり、き裂が進展し出すと進展速度は加速度的に早くなる。したがって、疲労損傷は、き裂発生直後の微小き裂を発見することが重要である。

図 5 は水車のき裂進展解析結果例であるが、き裂（または欠陥）が形成されてから、時間経過と共にき裂進展速度は速くなる。疲労損傷には、この微小な初期き裂を見つけることと、今

後のき裂伝播対策を立てることが重要である。

き裂が発生した場合の対策としては、部材にもよるが、発生した疲労き裂を削り取れば再使用できる場合、き裂を溶接補修すれば良い場合、き裂先端が鈍化して無視できる場合、き裂先端に穴を開けてき裂進展を止める場合、疲労寿命消費による新品と交換する場合、等の対策が取られる。これら疲労の評価と対策には、設計的な判断、補修による材質変化と残留応力の影響、疲労き裂からの脆性破壊の可能性の検討、など高度な判断技術が要求される。

### (3) クリープ

クリープは、応力、温度、時間の 3 要素で寿命が決まる。クリープ設計基準は ASME 基準では以下のように決められる。

- ・設計応力が使用温度で 10 万時間クリープ破断強度平均値の 2/3 の値
- ・設計応力が使用温度で 10 万時間クリープ破断強度最低値の 4/5 の値
- ・設計応力が使用温度でクリープひずみが 10 万時間で 1% 以下の値

したがって、高温高压部材は、このクリープ損傷にたいして 10 万時間クリープ強度を基準とし

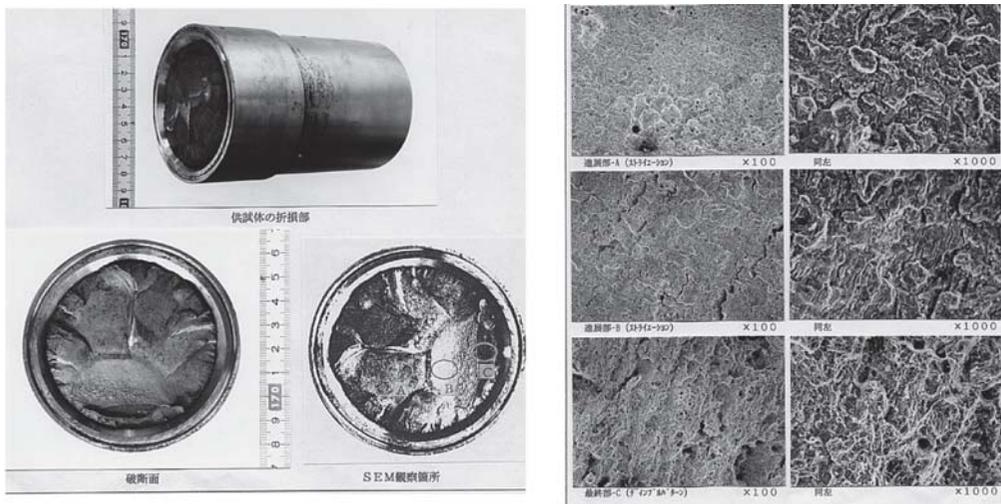


図4 代表的な疲労損傷と疲労破面（シャフトの疲労損傷 SCM435）

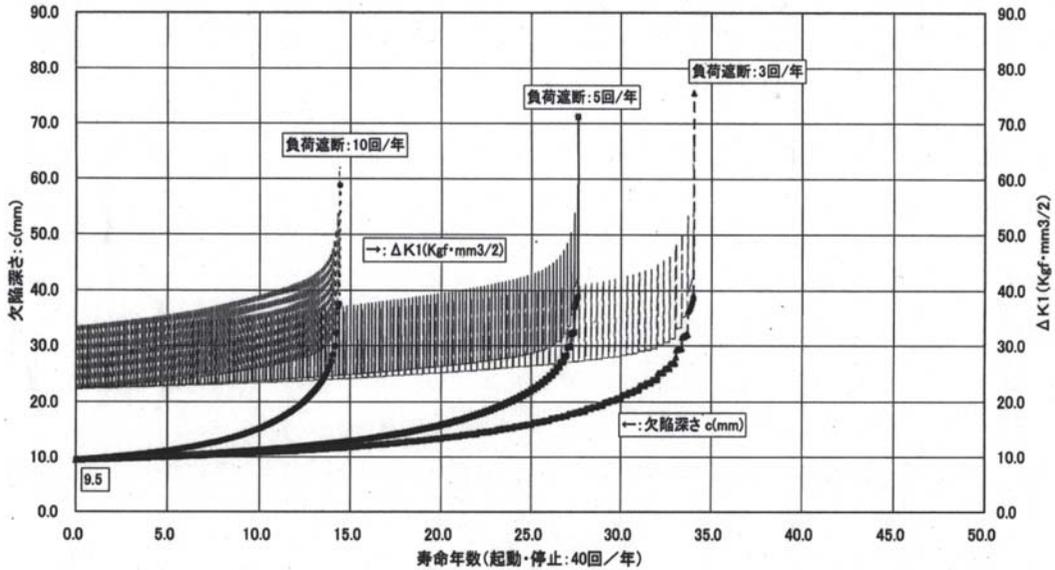


図5 水車ケーシングのき裂進展解析結果

て寿命が決まる。しかし、多くの石油化学プラント、火力発電設備はこの10万時間を経過しても運用されている。これは設計基準値に上述の安全余裕値（安全係数）が含まれているので、10万時間経過しても即寿命にはならない。さらに実機使用条件では、設計基準の温度・応力に対して安全側レベルで運用されている場合が多く、さらに寿命は延びる。したがって、クリープ損傷評価は、現状の対象部位がどの程度クリープ寿命を消費しているかの評価が重要になる。

クリープ損傷が発生した場合には、その損傷が経年によるのか、局部加熱による部分的な損傷なのかの判断が重要になる。局部的な損傷であれば、該当部位だけの交換でよいが、経年による場合は、応急的な処置は難しく、該当部材の全数交換を検討しなければならない。図6にSUS316主蒸気管のクリープ損傷事例を示すが、クリープポイドの生成による損傷は管断面全体に広がっている。クリープ損傷評価は、材質の劣化、クリープポイド形成などのミクロな損傷形態であり、目視による評価は難しく、レプリカ法（SUMP法）などの特

殊な検査方法が用いられる。

#### (4) 脆化、材質変化

脆化・材質変化は金属材料であれば使用温度（特に高温）による時間依存性、高分子材料であれば紫外線による劣化などがある。これら材料が劣化すれば、いわゆる脆くなり、ちょっとした衝撃荷重が負荷されることで破損する場合がある。また、脆くなった材質は、補修も難しくなっている場合が多い。これらの損傷調査は難しく、実態からのサンプリングによる材料試験が主な調査事項になる。特殊な事例としては、原子力発電設備における照射脆化に対して、モニター用テストピースによる破壊試験による脆化評価などがある。

これら経年損傷で、(1)～(3)の3項目は、高温機器構造部材の損傷原因で3大要因と呼ばれ、特に火力発電用ボイラの機器損傷で90%以上が該当する。

#### 2.6 損傷材料調査手順（腐食、疲労、クリープ）

これらの損傷原因を調査するには、損傷部材のミクロ観察が必要である。損傷状態を観察すれば、

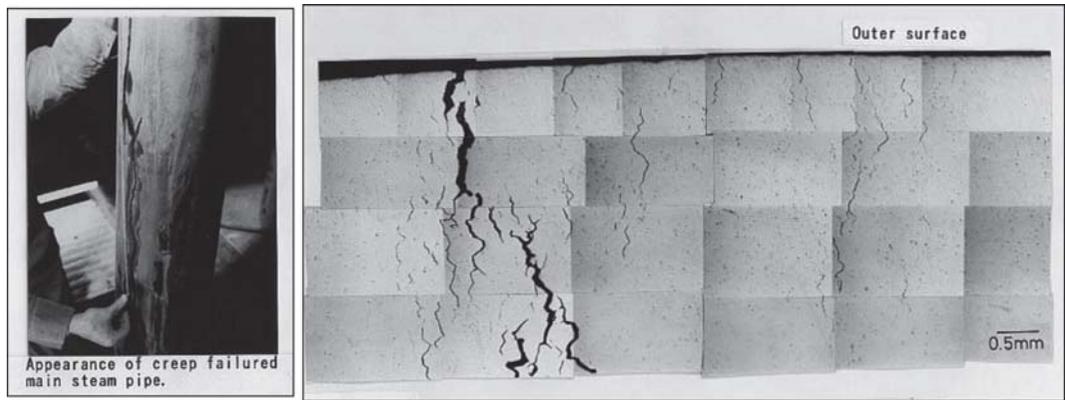


図6 火力発電ボイラ主蒸気管のクリープ損傷 (SUS316)

ある程度原因が特定できる場合が多いが、複合的な要因の場合もあり、先入観にとらわれることなく詳細な調査が必要である。破損部位の損傷原因となり得る可能性の幅を広げた調査項目を最初リストアップし、そこから順次要因、調査項目を絞り込むようにしなければならない。

損傷調査の手順としては、

(1) 外観観察

外観調査は基本であり、必要に応じて拡大鏡、マイクロスコープなどを用いる。まず、外観での腐食状況、腐食生成物、摩耗・減肉状況の状態把握が重要である。損傷部材の調査開始に当たっては、損傷部材を受入れた時の状態が説明できるように外観写真を記録に残す。

(2) 損傷部位の特定、形状測定

損傷部材と当該部材の健全状態とを比較し、損傷部材の変形状況、破損状況を確認する。破損状況から、荷重方向、変形方向などを明らかにしておく。また、き裂の発生状況、発生箇所が特定できない場合には、PT,MT,RTなどの非破壊検査によるサブき裂の発生、伝播状況を確認し、それらの分布状況と破断形状から主き裂発生箇所を明確にする。

(3) 破面開放、破面観察

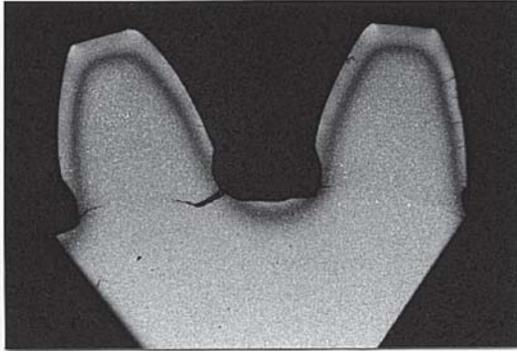
破面形態、き裂伝播状況の観察から、起点と

なった箇所を検討する。き裂が停止して開口していない場合には、き裂の開放を検討する。き裂の開放には、既存のき裂を痛めないように周囲の母材を切断、開放のためのスリットを入れる。さらに、開放時に部材が変形しないように鉄鋼材料では、-196℃の液体窒素中に入れ、脆性破壊で開放する。

破面は、汚れている場合は洗浄し、腐食している場合はリン酸系の錆取り材（ネオス）を用いて表面をきれいに洗浄する。破面を洗浄後、走査電子顕微鏡（SEM）で観察する。代表的な破面形態を観察し、破面が延性破壊、疲労破壊、脆性破壊のいずれであるかを判断する。破面観察では、き裂の起点と伝播過程では破面模様が異なる場合があるので、代表的部位を観察し、き裂の発生原因を特定できるような箇所を観察する。

(4) 損傷部材の断面マクロ、ミクロ観察

破面観察と同じように重要な調査項目として、断面金属組織観察がある。損傷箇所の断面金属組織観察から、き裂が伝播したときの伝播状況が確認でき、材料学的な問題点などはこのミクロ組織観察で明らかになる。図7は歯車の損傷事例であるが、熱処理が入っていない箇所からき裂が発生、伝播していることが明らかで



断面マクロ組織

図7 歯車の断面観察  
(歯底部に表面熱処理不完全部から破損)

ある。同様に、表面の腐食状況、孔食、き裂伝播過程などは、損傷部位の断面観察により情報が得られる。

(5) 硬さ計測

金属組織と合わせて硬さ計測も実施する。特に鉄鋼材料であれば、この硬さから引張強度が推定できるので、有力な情報となる。また、塑性加工、溶接継手部の硬さ分布、SR (Stress Relief) 条件、表面処理状態、などの材料の機械強度特性、熱処理履歴の特性が確認できる。

(6) 表面粗さ計測

疲労などの表面仕上げ状態が問題になる場合には粗さ計測も有効である。また、摩耗している場合には、元の機械加工面との比較で摩耗量が定量的に計測できる場合もある。

(7) その他

材料自体が問題の場合、材料の特徴を把握し、材質を特定するために化学成分分析、機械的試験などを実施する場合がある。化学成分分析では該当規格の成分を分析する場合と、損傷に注目した特定元素だけを分析する場合がある。同様に、機械試験でも規格試験のみの場合と、構造解析に使用するために、実機使用温度で試験する場合がある。

これらの調査を実施するには、単に部材を調

査だけでは不十分であり、使用状況、損傷原因の推定、応力負荷状況、材料などを確認した上で、調査手法を決定する必要がある、専門知識、経験、推論能力、技能が要求される。

3. 健全性評価と余寿命診断

重厚長大設備を初めとする耐久年数の長い設備を安心、安全に運用して行くには適切な健全性評価、余寿命診断が要求される。特に、発電プラント、化学プラント、橋梁などの大型設備で損傷が発生した場合には、設備自体の損害に止まらず社会的にも大きな影響を与える場合があり、的確な診断方法が必要となる。

代表的な設備の概略耐久年数を表1に示す。この表で示されるように、当然のことながら、寿命は設備によって異なる。橋梁など100年以上の長いものからロケットの約5分までと極く短いものがある。

設備の寿命は以下のような要因できめる。

- ①腐食・摩耗
- ②疲労
- ③クリープ

表1 各種機器の寿命

代表的機器設備・装置	標準耐用年数・耐久時間 (累積運転時間)
・鉄、鋼の寿命	2000年
・橋梁、クレーン、一般構造物	100～150年 100万時間
・水力発電設備	50年～ 50万時間
・原子力発電設備	30年～60年 40万時間
・火力発電設備	30年～40年 20万時間
・石油化学プラント	10年～20年 10万時間
・船舶	20年～ 10万時間
・航空機	20年～ 5万時間
・自動車	2000時間～ 4000時間
・家電	1000時間
・時計	10年
・おもちゃ	100時間
・ロケットエンジン	5分

- ④脆化、材質変化
- ⑤機能低下（技術革新による設備の陳腐化）
- ⑥修理コストと交換コストの比較

ここで、①から④は部材の材料劣化であり、機械の経年による損傷要因も、前述したようにこの①～④である。⑤は製品の機能劣化で、パソコン機器のように装置自体の寿命よりも性能の陳腐化で、新機能品と交換する。⑥はコスト劣化で、一般家電商品や自動車等の大量生産品で、部品交換、メンテナンス等によって長期間使用することを前提にしていないものである。

公共設備のような社会資本、製鉄設備や大型発電設備のような重厚長大設備は大型の耐久製品であり、例えば、築地の勝ちどき橋は1940年完成で68年経過しているように、水門、橋梁、クレーンでは50年以上使用されている設備が沢山ある。これら寿命の長いものについては、損傷が発生してから補修するのではなく、定期的なメンテナンス管理による健全性確保（リスク管理）が重要である。また、経済性とリスクを考慮したリスクベースメンテナンスも利用して、メンテナンス効率を高めた手法も採用されている。

構造部材としての材料寿命の傾向は石、木材、金属の順で寿命が短くなる。ピラミッドの石造物、法隆寺の木造建築、エッフェル塔（1889年完成）の鉄骨構造物などが各材料を使用した年代物の代表的な建築物であるが、この中で、もっと年数が短いエッフェル塔は既に耐久年数越えており、主要鉄骨部材は100年経過して交換されている。

日本国内では、建物、橋梁、発電設備、化学プラントなどのインフラ設備の老朽化が進行している。既に火力発電設備のように国家プロジェクトとして経年対策、検査技術が開発、実用化されているもの、原子力発電設備のように維持基準の見直し、改善が行われている設備もあるが、建物、橋梁、コンクリート構造物などの評価は今後の重

要な課題である。

設備の耐久性の評価には、健全性評価、寿命評価、余寿命評価などの言葉が使用されており、これらの言葉が持っている意味は似ているが、正確には異なる。個々の言葉について簡単に説明する。

#### (1) 健全性評価

設備を運用していく上で問題ないこと、少なくとも次回点検（定期点検）までは問題ないことを評価する。そして、次回点検まで安全に運営できないと考えられる場合には、部品交換、補修などの手当が必要である。

#### (2) 寿命評価

寿命評価は、現在の劣化状況を把握し、寿命をどの程度消費しているかを判断することであり、部品交換時期、設備更新計画など運営上の計画を立てるために必要である。問題は、この寿命消費率をいかに正確に算定するかである。寿命は装置、個別の部品によって個体差があり、評価技術はメーカーのノウハウであり、一般的に公開されていない。消費寿命を計算するには、その部材の寿命評価が何で決定されるのかを明確にし、評価する必要がある。この評価には前2項の損傷調査と関係が深く、主要な損傷が腐食、摩耗、疲労、クリープ、脆化および複合損傷であることを紹介したが、寿命評価にはこれらの損傷項目毎に個別に評価し、積算して損傷率D（寿命率）を求め、余寿命R（時間）はそれまでの使用期間T（時間）から以下の式で求まる。

$$D = N/N_f + T/Tr + Dt/ta + F \cdot T$$

D：損傷率（ $0 < D < 1$ ）

N/N<sub>f</sub>：疲労損傷率 N：使用回数

N<sub>f</sub>：疲労破断回数

T/Tr：クリープ損傷率 T：使用時間

Tr：クリープ破断時間

Dt/ta：腐食・摩耗消費率

Dt：腐食・摩耗減肉量 ta：許容減肉量

F：脆化率（単位時間材質劣化係数）

T：使用時間

$$R=T \cdot (1/D-1)$$

R：余寿命（時間）

### (3) 余寿命評価

今後、何年使用可能（残存寿命）かの評価であり、(2)の寿命評価（損傷比D）と余寿命評価（R）を加算したのが寿命であり、(2)と(3)は相関関係がある。しかし、余寿命診断は別な目的で使用する場合がある。それは、運転方法を長期連続運転から頻繁な起動停止を伴う運転に変更したり、生産性向上のために温度・圧力の上昇など使用条件を変化させた場合、耐久年数がどの程度短くなるのか、余寿命を計算する必要がある。使用環境が変わった場合の損傷率計算は、疲労損傷であれば、線形損傷則、マイナー則、グッドマン線図などの評価手法を適用し、クリープ損傷であればLarson-Millerパラメータなどのパラメータ整理で評価する。腐食・摩耗、脆化に関しては確立された手法はないが、経年変化による評価などを採用する。

本項では、当社が幅広く実施しているこれら機器の寿命評価関連技術について紹介する。

## 3.1 非破壊検査方法

部材の定期検査は非破壊検査が主体となるが、健全性評価、寿命評価には、き裂の発見、腐食減肉だけの調査には終わらず、微小き裂、クリープポイドの検出、材質劣化、応力発生状況などの検査・計測が必要になる。当社で実施している個別の損傷に対する手法を紹介する。

### (1) 腐食の問題

腐食の問題には、全面腐食、局部腐食（孔食）、応力腐食割れ、ボイラ管の高温酸化スケール（含む水蒸気酸化スケール）などがある。全面腐食は目視検査が主であるが、配管内部の腐食量な

ど見えないところの検査には超音波厚さ計が使われる。また、孔食などの小さい欠陥を評価するにはET（渦流探傷試験）が有効である。応力腐食割れに対しては、材料、環境、応力の3要素についての評価が必要であるが、材料に関しては、ステンレス鋼材の鋭敏化を計るDOS（Degree of Sensitization）テスター、材料成分分析を現場で実施するPMI装置（炭素元素分析可能）、応力を計測するX線応力計測器を利用して評価している。また、高温酸化スケールでは、超音波厚さ計に波形処理機能を持たせ、内面の酸化スケールを差し引いた有効肉厚計測技術などが開発されている。

### (2) 疲労損傷

疲労損傷評価は、

a：き裂発生前の損傷評価、（き裂が生ずる前の損傷進行程度を評価する）

b：き裂発生または微小き裂の検出、

c：き裂伝播評価

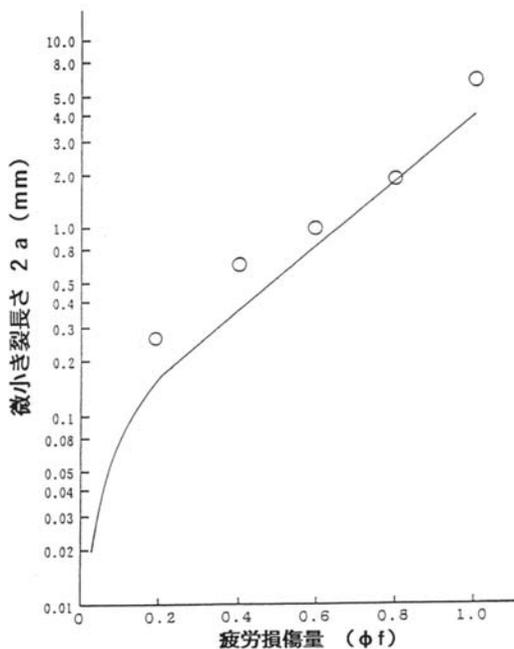
の3つに分類される。

aのき裂発生前の評価では、硬さ計測、X線残留応力計測、X線半価幅計測、転位組織変化、陽電子消滅などの手法が研究開発されてきたが、定量的評価が難しく、コストメリット面での優位性がなく、まだ汎用的には採用されていない。最近は、き裂の発見精度を高めること、き裂伝播評価、き裂の容認などの方向に技術開発が進展している。

bの微小き裂の検出に関しては、PT、MT、ETなどの表面検査方法、マイクロ스코プによる目視検査、内部の欠陥に関してはUT法が有効であり、画像可視化のためにTOFD（Time of Flight Diffraction）法、フェーズドアレイ法、ウェーブレット波形解析による信頼性向上などが利用されている（「保守に関する検査の役割といくつかの対応」参照）。疲労寿命評価には、

微小き裂の検出以外に、き裂の形状、分布、発生場所など、発生したき裂の特性を評価することが要求される。特にき裂先端の形状に着目し、き裂先端が生きている（き裂先端が鋭く、成長している）のか、死んでいる（き裂先端が開口、鈍化、腐食して停滞している）のか判断する必要がある。そのためにはき裂の形状を拡大して観察しなければならず、レプリカ法、マイクロスコプを用いて観察する。き裂が単独で発生しているのか、複合的に発生しているのか、き裂をどの様に評価するかが問題になる。き裂のサイズが確定できれば、**図8**に示すようなき裂サイズで疲労寿命評価したり、荷重変動数または応力拡大係数とき裂伝播式の関係から、残存寿命を評価する。

cのき裂伝播では、**図9**に示すような応力拡大係数振幅  $DK$  とき裂長さ  $a$  の関係式を用いて評価する。応力振幅は、FEMによる構造解析、ひずみゲージ貼り付け、加速度計取付による実



**図8** 微視き裂測定によるき裂長さとき裂伝播の関係 (2.25Cr1Mo鋼)

機部材で計測する場合がある。高温機器の場合には、さらに熱電対と高温歪みゲージによる温度、ひずみ計測結果から、熱応力解析を実施する場合もある。

### (3) クリープ損傷

クリープ損傷は、高温機器における最重要課題である。クリープ損傷には、変形（クリープ変形）、クリープポイドの発生や微小き裂の発生、材質の組織変化などがある。これらの損傷形態は使用条件、部位によって異なるので、個別の部材に対して損傷形態を明らかにして評価する必要がある。

クリープが問題になる場合には、疲労におけるき裂よりも小さいクリープポイド観察が主体になる。疲労は局所的な損傷であるのに対して、クリープは部材全体の損傷になっている場合が多く、クリープによる損傷が認められた場合には直ちに部品交換を検討した方がよい。クリープポイドは、ポイドが繋がってき裂になる前の状態であり、0.1mm以下のサイズを見つけるマイクロな調査が要求される。通常、クリープポイドは応力に依存して発生するので、例えば、厚肉管の場合、応力の高い箇所、材質的に弱い場所から発生する。特に、2.25Cr1Mo鋼や、Mod.9Cr1Mo鋼、12Cr鋼などのフェライト系耐熱鋼管では、溶接継手熱影響部（HAZ）軟化層でのクリープ損傷が問題になる。**図10**にMod.9Cr1Mo鋼溶接継手部のクリープ試験後のマクロ観察結果を示す。この部位の損傷は、Type IVクラックと呼ばれており、大型火力発電用ボイラの大径管で重要な問題になっている。また、クリープポイドは表面に出るとは限らず、内部から発生する場合があり、内部の評価をする必要がある。内部の評価には超音波を用いたノイズ分析法が有効であり、この手法はIHIグループ独特の技術である。

(1) 応力拡大係数の基本式

$$K_I = \sigma (\pi a)^{0.5} \cdot F(a) \quad \dots(2.1)$$

a : 欠陥の大きさ σ : 作用応力

F(a) : 部材の形状、欠陥の長さ、  
 負荷の種類で定まる補正係数

(2) 破壊に至るまでの現象と残存寿命

第1段階: 変動応力を受けて、初期欠陥 a<sub>i</sub> が疲労により成長する。

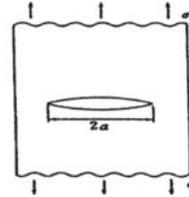
第2段階: 成長した欠陥は、限界き裂長さ a<sub>cr</sub> に達すると脆性破壊を生じ、破壊に至る。

\* 脆性破壊の条件

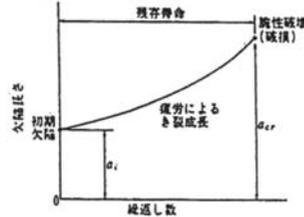
$$K_{IC} \leq K_I \quad \dots(2.2)$$

K<sub>IC</sub> : 欠陥寸法、部材形状、負荷種類で  
 決まる応力拡大係数

K<sub>I</sub> : 材料の破壊靱性値



部材中の欠陥



破損までの挙動

$$da/dN = C \cdot (\Delta K_I)^m \quad \dots(2.3)$$

a : 欠陥の大きさ

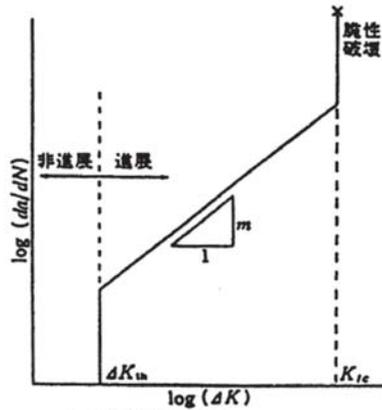
N : 変動応力の繰返し回数

C, m : 材料によって異なる常数

ΔK<sub>I</sub> : 応力拡大係数の変動範囲

ΔK<sub>th</sub> : K が、これ以下では欠陥が成長しない下限値

注) き裂伝播量は(2.5)式を積分して求まるが、K<sub>I</sub>は(2.1)式で示すように、欠陥の形状係数:F(a)を含むため、数値積分を行って求める。



き裂進展挙動

図9 疲労き裂伝播解析による寿命評価

(4) 材質劣化

金属材料を高温で長時間使用していると材質劣化、組織変化が生ずる。ステンレス鋼であれば炭化物の析出による鋭敏化、σ相などの金属間化合物の析出、低合金鋼であればパーライトの球状化が問題になる。また、高温酸化による結晶粒界酸化が問題になる場合もある。これらの検査には、レプリカ採取が簡便でもつぱら利用されている。最近では顕微鏡なども利用されつつあるが、写真の解像度が十分とは言えず、改良が望まれる。利用の仕方では、図

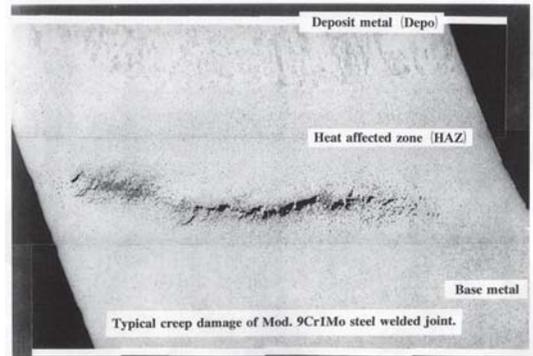


図10 高Cr鋼溶接継手部の内圧クリープ試験後のミクロ組織

11 に示すように時間、温度別に分類して、使用時間と組織から運転温度が推定できる。

### 3.2 破壊試験法

破壊試験法はもっぱら疲労とクリープの評価に用いられる。破壊試験法には表 2 に示すように、サンプル材から損傷形態と同じ機械的加速試験による場合と、サンプリング材自体の内部組織変化に注目した評価手法が開発されている。また、試料のサンプリング技術も進歩しており、従来の抜

き取りによる破壊試験に変わって、図 12 に示すような放電加工で微小サンプルを採取し、部材はサンプリング後も使用できる準非破壊検査方式（ミニチュアサンプリング装置）も開発された。このサンプリング装置は小型化されて従来のものよりも使いかたが良くなっている。

これら微小サンプリング材に対する機械試験として、ミニチュア試験片による加速機械試験、スモールパンチング試験方法などが開発、実用化さ

表 2. 2.25Cr1Mo鋼の高温時効による組織変化の分類

段階	組織の特徴
I	新材、フェライト、パーライト組織
II	結晶粒界で小さい炭化物の球状化が進む
III	パーライト中の球状化が進むが、板状の炭化物は残っているフェライト粒内、粒界で炭化物の析出が進んでいる。
IV	炭化物の球状化がほとんど完了するが、これらの炭化物は旧パーライト粒内にとどまっている。
V	炭化物の球状化は完全に終了する。炭化物は旧パーライト粒から少し分散しはじめている
VI	炭化物の部分的な合体による粗大化がみられる。
VII	炭化物の消滅

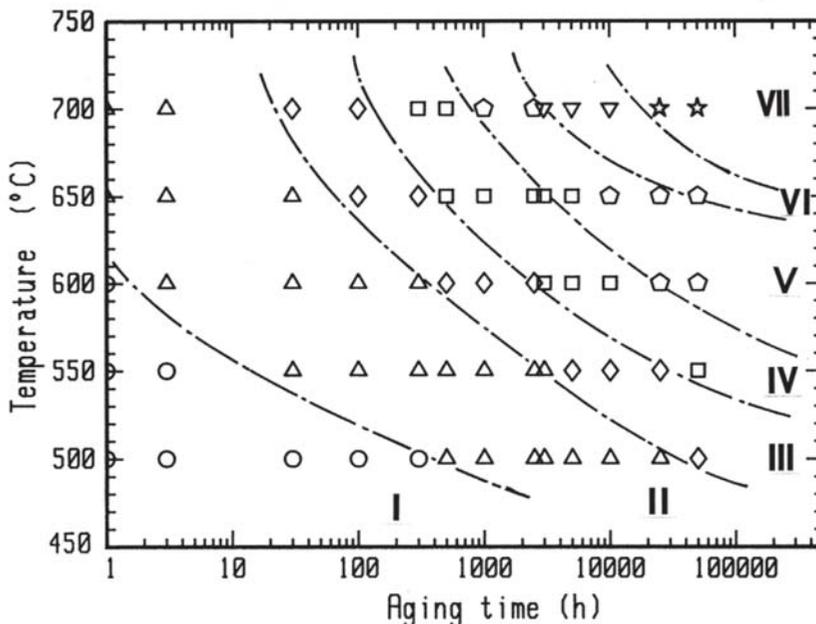


図11 2.25Cr1Mo鋼の時間と組織変化の関係

表2 破壊試験法による余寿命評価試験法

種類	計測手法	検出項目
破壊試験法 (標準試験片)	応力加速試験 温度加速試験 $\theta$ プロジェクション法	クリープ
小型試験法	小型試験法	クリープ 疲労
	密度法	クリープ
	パンチング試験	脆化 クリープ
マイクロ観察法 (電子顕微鏡観察)	SAD法 菊池線法	疲労 クリープ

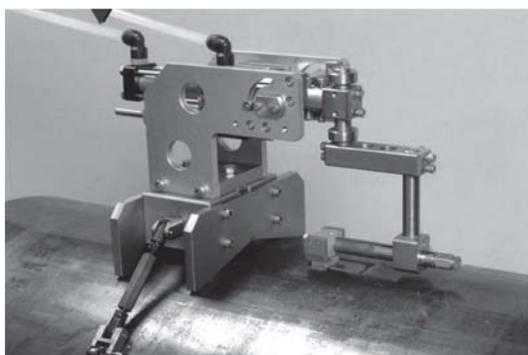


図12 現地における微小サンプル採取装置

れている。また、微小サンプルから、透過形電子顕微鏡 (TEM) によるマイクロ観察で金属結晶構造内部の転位密度、サブグレインの結晶方位差などによる評価技術も開発、実用化されている。

破壊試験は、サンプリングにコストがかかること、補修技術が必要なこと、クリープ試験のように試験時間がかかることなどの不利な点があるにも拘わらず、寿命評価精度が他の手法とあまり差がなく、優位性が低下している。一方、非破壊検査技術や解析技術の信頼性向上とコストダウンが図られ、余寿命評価技術としての破壊試験は、非破壊検査、解析法の実証的な手法になっている。

### 3.3 解析による寿命評価

余寿命評価は、解析による残存寿命評価が主体になる。余寿命の評価精度を高くするためには、部材の非破壊検査、破壊検査、運用上の情報 (使

用圧力、温度、応力、振動数) が必要である。解析にはバランスが必要で、細かく評価しなければならないところと、マクロ的な評価が重要になる場合がある。マイクロ・マクロ的な解析手法を適切に組み合わせることにより評価精度を落とすことなく、安価に評価できる。

余寿命を解析で評価する場合には以下のような手順で進める。

- ①既存の損傷状況 (腐食による減肉、き裂の有無、材質の劣化の有無)
- ②運転時間の評価
- ③損傷、劣化状況の定量化
- ④今後使用していく過程での損傷率、寿命消費率
- ⑤余寿命計算
- ⑥次回定検時期、検査項目、補修・交換部品の決定、などである。

したがって、解析といえども現状の使用状況をいかに正確に把握するか、損傷、劣化状況の把握、使用開始から現時点までの寿命消費率の計算、等に基づいて解析、計算する必要がある。工業製品は生まれが同じでも運用によって寿命、寿命消費率は大幅に変化する。寿命評価は個別の機器で実施する必要があり、個別に実施する方が誤差が少なく、信頼性が高くなる。検査を省略すればするほど評価のバラツキが大きくなり、安全側の評価をする上で最短寿命を選択することになり、誤差が大きくなる。

## 4. 補修技術 (溶接補修)

### 4.1 溶接補修

構造部材の経年劣化対策として最も経済的で有効な手段に補修溶接がある。特に大型の構造物では、設備を更新する場合には工事が大規模となり、最適な設備更新時期の見極めと共に、補修による延命化が望まれている。中でも、一般構造物

の主要な損傷形態である腐食、疲労に対して特に補修技術が有効である。腐食の場合は、腐食減肉部にパッチ当ての補強板を溶接すれば多くの問題は解決する。疲労損傷の場合は、まず発生したき裂に対して、き裂先端にき裂停止キリ穴を開ける場合、き裂を取り除く場合、き裂除去後補修溶接する場合などの対策が取られている。この中で、最も安心して使用できるのは、やはり補修溶接である。しかし、溶接補修は部材の加熱による熱影響部、溶着金属部が形成され、残留応力の発生など、少なからず部材本体に影響を与え、安易に修理した場合には構造部材の寿命を縮める可能性もあり、経験と技術が要求される。当社では、溶接施工技術の開発と併用して、これら補修技術も開発している。

補修を必要とする構造物は、供用開始後長期間の使用による経年劣化や欠陥（き裂）の発生によるものが多い。この欠陥の検出は超音波探傷検査（UT）などの種々の非破壊検査を実施し、問題となる欠陥の位置、サイズを把握する。この欠陥については数値解析による応力拡大係数とき裂伝播式で余寿命診断を行い、精度の高い更新時期の選定が可能になった。その代表例として、水車のケーシングに関する補修溶接の取り組み状況を紹介する。

## 4.2 水車ケーシング材の補修技術

水力発電用設備はエネルギープラントの中で最も高経年設備であり、50年以上運用されている設備が多く、水車部品の多くは成型が容易な鋳物（鋳鉄、鋳鋼）で製作されている。一般的に鋳物の溶接技術は、比較的溶接が容易な鋳鋼であっても圧延材の溶接技術と異なる部分が多い。そこでこのような特殊材料の補修溶接技術の研究、開発を実施している。

水車部品は昭和初期に製造されたものが多く、特に鋳鋼製水車部品は、当時の製作、検査技術により製造されているため現在の JIS 規格とは異な

り、不純物や欠陥を含むものが多く、溶接性が劣ると考えられる。さらに、鋳鋼は溶接性を考慮せずに製作されている傾向があるため、溶接性を始め機械的性質を重視して製作された圧延鋼と同等の化学成分であっても溶接性が劣ると考えられる。すなわち、鋳鋼は鑄造組織であるため結晶粒が大きく、炭素量が大きいものは溶接の際に熱影響部が硬化し、低温割れが発生しやすい。また、溶接の予熱温度は、母材の化学成分により異なり、炭素量の増加とともに高くする必要がある。そのため鋳鋼の溶接方法、溶接材料、溶接条件の選定に当たっては、以上の点を十分に考慮する必要がある。このようなことから、鋳鋼の溶接施工方法としては、各施工法の長所および短所を調査し、さらに比較的機材準備が容易であるなど現地における施工を考慮して、被覆アーク溶接（SMAW）による補修方法を検討した。

溶接補修方法を確立するにあたり、補修対象である高経年の水車部品の成分分析は不可欠であり、また、溶接補修適用判断基準を確立するためにも、実機成分に即した試験体を製作して溶接試験を実施する必要がある。そこで昭和初期に建設された、いくつかの発電所の水車部品の成分分析を実施した。これら成分分析の結果より、溶接時の割れ感受性を示す割れ感受性組成（ $P_{CM}$ ）は 0.4% 以下であることと、不純物であるリン（P）および硫黄（S）が現在の JIS 規格をオーバーしているものが存在することが確認された。なお、 $P_{CM}$  は式 1 で表される。

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} 5B$$

……………式 1

これらの結果から、実機の成分分析結果に基づき  $P_{CM}$  を基準に成分の異なる試験体を 5 種類製作し、割れ発生防止予熱温度を選定するため y 型割れ試験片（JIS Z3158）を採取し、試験を実施した。

その試験結果から、母材成分および予熱温度による溶接補修適用基準を確立することにした。

溶接割れ感受性組成 ( $P_{CM}$ ) をパラメータとして、一般的な炭素鋼の値から実機成分分析で明らかになった高めの値までを網羅するように、 $P_{CM}$  が 0.1% ずつ異なる、0.1、0.2、0.3、0.4% を目標とする 4 種類の鋳鋼製試験体を製作した。さらに、これらのうち一般的な炭素鋼に多い  $P_{CM}$  が 0.2% のものについては、P および S をそれぞれ 0.1% 含有させた試験体も製作し、不純物が溶接性に与える影響を調査した。

割れ防止に大きな影響を及ぼす予熱は、予熱なし、50℃、100℃とし、それ以上は周辺機材への影響、変形、さらには狭隘部での溶接環境などを考慮し対象外とした。被覆アーク溶接用の極低水素系溶接材料が最適な溶接方法であることが事前試験により確認されており、本溶接材料を用いた場合、 $P_{CM}$  が 0.3% 程度までは予熱なしでも割れが発生することなく溶接可能であり、 $P_{CM}$  が 0.4% 程度になると 100℃ 以上の予熱が必要であることがわかった。さらに、 $P_{CM}$  が 0.2% 程度である場合、不純物の影響により溶接性が大きく変わらないことを確認することができた。

本試験の結果より、鋳鋼製水車部品を補修溶接する場合の溶接補修適用基準を以下に示すとおりとした。

溶接方法：被覆アーク溶接

溶接材料：JIS Z3212 D5016、AWS A5.1 E7016、極低水素系溶接材料

予熱温度：100℃以上

溶接補修対象：鋳鋼製水車部品（ただし、 $P_{CM} \leq 0.4\%$ のみ）

予熱温度について、 $P_{CM} \leq 0.3\%$  では予熱なしでも施工可能であることを確認したが、補修対象が水車のケーシングおよびステーベンであることから、残存する水分を確実に除去するために

100℃以上とした。

この評価結果に基づき、鋳鋼製水車部品の経年材（経年 70 年以上、 $P_{CM}$  値 0.3% 相当）を入手し、前述の施工条件にて溶接試験を実施した。その結果、溶接性に問題はなく、硬さ試験、引張試験でも問題のないことを確認した。当社では一般的な溶接補修から特殊材料である鋳鋼製高経年の老朽化した水車部品の溶接施工方法、溶接補修適用基準を確立するなど、多岐に亘り溶接補修技術についての研究・開発を実施している。今後、これら手法に基づいた溶接補修技術の向上を図り、残存寿命の延命化を図ると共に、長期にわたる信頼性の維持向上を図っていく。

## 5. コンクリート構造物の健全性評価

### 5.1 コンクリート構造物の特徴

当社では従来、鉄鋼材料を主体とした損傷調査、経年劣化診断、補修技術の開発を実施してきたが、社会的インフラや建築構造物においては、コンクリート材料を使っていないものを見つけるのが困難なほどコンクリートが多用されている。コンクリート単体としての圧縮強度はおおよそ 20 ~ 100Mpa で引張強度はその約 1/10 程度という特徴からほとんどがその弱い引張部分に鉄筋を埋め込んで合成された鉄筋コンクリート (Reinforcement Concrete) 構造がほとんどである。

鉄筋とコンクリートの線膨張係数はほとんど一致していること、鉄筋はコンクリートの強いアルカリ性に守られて防食されているなど、非常に合理的な組み合わせとなっている。さらにコンクリートの引張に弱い弱点を解消すべく、PC 鋼材でコンクリートを締め付け、予めコンクリートに圧縮応力 (プレストレス) を作用させた構造 (プレレストコンクリート構造) も開発実用化された。以上の特徴とコンクリート単価が安いことも相まって高度経済成長時にはかなりのコンク

リート構造物が築造され現在に至っている。ただ過去には半永久的と思われてきたコンクリート構造物の劣化が近年顕著になっており、その評価技術、補修技術などの維持管理技術の必要性が高まっている。以下にコンクリートに関する当社の取り組み状況を紹介する。

## 5.2 コンクリートの劣化機構

コンクリートの劣化機構としては塩害、中性化、アルカリシリカ反応、凍害、化学的腐食、疲労、風化・老化、火災などがあるがその代表的なものとして塩害、中性化が挙げられる。

### (1) 塩害

海岸近傍や凍結防止剤散布などによりコンクリート構造物は塩分にさらされる。コンクリートそのものは塩分に弱いわけではないが、その塩分が内部に侵入することにより鉄筋やPC鋼材が腐食することによりコンクリート構造物の性能を失う。コンクリートは緻密で塩分を進入しにくいように配合され、また、かぶりを確保することにより鉄筋までの塩分到達時間を抑制しているが、低品質のコンクリートの使用やかぶり不足、もしくは初期ひび割れを発生させてしまった場合には内部鋼材の腐食が進行する。コンクリート表面に錆び汁が露出してきて変状が発見された時点では手遅れとなる場合もあり、表面塩分量、浸透塩分の把握、ひび割れの有無およびひび割れ深さの把握が重要である。

### (2) 中性化

コンクリートはアルカリ性であるが大気中の二酸化炭素により徐々に中性化していく。この現象により強アルカリ中の不導体皮膜で覆われていた鉄筋が腐食し、鉄筋の腐食膨張によりひび割れが進展し、さらに二酸化炭素が供給され劣化が加速される。コンクリートの劣化は、塩害と同様にコンクリートの密実性やセメントの種類に影響を受ける。また、ひび割れやジャン

カ（空隙の多いコンクリート構造物の不良部分のことをいい、「豆板」とも言う。）などにより加速的に進行し、塩害との複合作用によりさらに劣化が進行する。

## 5.3 コンクリート構造物劣化状態の把握

コンクリート構造物維持管理の必要性が高まり、管理者のニーズはいかに効率良く点検・調査・劣化予測・評価・対策の要否判定・対策の実施をできるかである。ただし、橋梁一つとっても全てのコンクリート部位を調査するのは困難で、どこから手をつければよいのか判断がつかない様である。ただ鉄筋腐食で錆び汁が出てしまってからでは手遅れになってしまうことも多く、最悪の場合には橋の架け替えという多大な経済損失となる場合もある。そのため塩害や中性化の劣化状態の把握においても、すべての部位でどの程度塩分が存在しているのかを簡易的に計測できる技術が必要である。これらの分析要求、劣化管理技術として分光分析技術を利用したマルチスペクトル法が開発されており、さらに中性化やアルカリシリカ反応の計測も可能である（「研究開発支援のための技術」参照）。

## 5.4 ヘルスモニタリング

コンクリート構造物を竣工時の状態で維持することは不可能であり、いずれ劣化が進み構造物性能が低下し、必要な性能レベルを下回り更新時期に至る。それを把握しないで供用されている構造物は破壊・崩壊など重大な事故を起こしてしまう。ヘルスマニタリングはスマートなデバイスで、センシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価などを即時的に行うことである。当社でもSOFO センサ（光ファイバーを用いた構造物計測センサ）によるヘルスマニタリングを実施している。SOFO は長期安定性が高く、動的にも静的にも一つのセンサで計測可能な特徴を有しているため、長期にわたり構造物の様々な情報を得ること

が可能である。図13にSOFOセンサーの施工例を示す。

## 6. まとめ

本章では、種々の設備で損傷が発生した場合のその調査方法、原因究明と対策について、当社が取り組んでいる状況を紹介した。部材の健全性評価は主に検査が主体になるのに対して、損傷調査は計測、試験が主体となる。また、損傷調査技術、健全性評価技術をさらに発展させた余寿命診断についても紹介した。これらの技術は個別の単独技術で対応できるものではなく、IHIグループ全体の設計・製造・研究開発力の総合技術力を背景に、当社独自の検査・計測、分析試験技術を合わせた総合力で各分野のニーズに対応していく所存である。

## 文責

計測事業部 技師長 工学博士 技術士  
(金属部門・総合技術監理部門) 中代 雅士  
計測事業部 計測技術部 構造物グループ  
次長 河野 豊  
研究開発事業部 生産技術部  
次長 石井 順

## 参考文献

- 1) JST 失敗知識データベース (<http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>、航空・宇宙)
- 2) JST 失敗知識データベース (<http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>) JENES 規格基準部セミナー「応力腐食割れき裂進展評価と検出技術」



図13 鉄筋に配置したSOFOセンサ

(<http://www.jnes.go.jp/katsudou/topics/ouryoku/pdf/nakata.pdf>)

- 3) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2002年改訂版) JSME S NA1-2002
- 4) 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編 フラクトグラフィ「破面と破壊情報解析」丸善
- 5) 木原、富士「リスク評価によるメンテナンス RBI/RBM 入門」日本プラントメンテナンス協会
- 6) 中代、三橋、中村：「陽電子消滅による疲労損傷評価」IIC レビュー 2001/4 No.25
- 7) 福岡、木原、中川、吉田；「マイクロ組織による疲労損傷の評価」石川島播磨技法 第33巻第5号 (1993)
- 8) 「材料の評価とモニタリング小特集」IHI 技法 第47巻 第4号 (2007)
- 9) 北川、金谷、楠元、岡本、小林；「放電サンプリング装置の開発」日本材料学会 第57期学術講演会講演論文集 P331