

ボイラの予防保全に関する最近の取組み

(Recent Preventive Maintenance Measures for Boilers)

難波 一夫*・畠中 宏明*
(K. Namba) (H. Hatanaka)

はじめに

電力会社をはじめとする設備・装置産業では、設備投資の抑制を背景にして、いかに現有の設備を有効活用し、稼働率を向上させるかが、経営上、重要な課題となる。とりわけ、火力発電プラントでは、DSS 運用などの需要変動要請による過酷な運用が強いられるとともに、経年ユニットの増加が顕著となっており、適切な時期に適切な対策を講じなければ、設備機能低下による経済的損失が増大することになる。このような背景から、目標とする稼働率を達成するために、プラントに対して的確な予防保全を実施することが肝要となってきた。

本報では、火力発電プラントにおける損傷事例を紹介するとともに、非破壊検査技術および寿命評価技術をはじめとする、ボイラの予防保全に関する当社の最近の取組みを実例を含めて紹介する。

1. ボイラの保全方法

設備保全とは、高額な資本を投じた有形固定資産である設備が劣化して、性能が低下したり、故障停止したりする状態をなくし、調整や修復を行う活動である。設備の生産性を向上させるという目的を達成するためには、設備の生涯にわたり、最小のコストで設備の故障防止や休止時間を短縮し、稼働率の向上をはかる必要がある。このような、経済性を考慮する設備保全を生産保全と呼び、その手段は図1に示すように

① 事後保全

② 予防保全

③ 改良保全

④ 保全予防

に分類される。企業は設備の経年劣化状況や今後の運用を考慮して、これらの手段から最も経済的であり効果的な手段を選択しなければならない。

多くの部品から構成される設備の場合、故障率は使用時間に従って、図2のように推移することが知られている。火力発電プラント(ボイラ)では、設備の機能低下や機能停止による経済的損失が大きい。また、経年ボイラが占める割合が高くなってきていることから、部材の経年劣化が顕在化することが予想される。このような背景から、解析

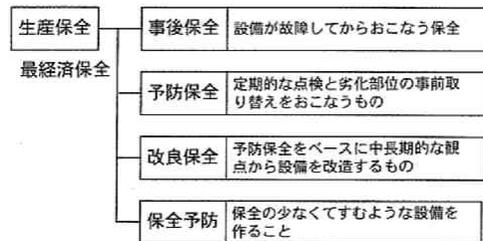


図1 生産保全の考え方

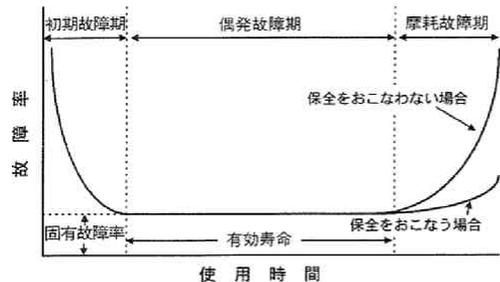


図2 寿命特性曲線(バスタブ曲線)⁽¹⁾

* 石川島播磨重工業株式会社

(Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

原稿受付 平成12年4月18日

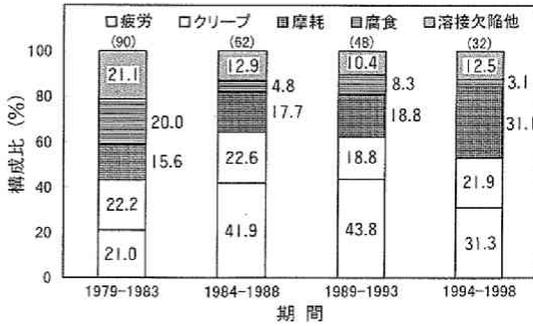


図3 ボイラ本体で発生したトラブル ()内:トラブル件数

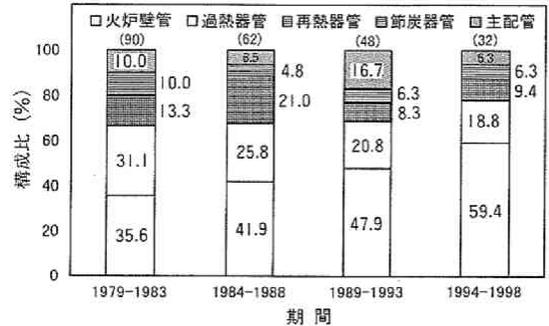


図4 ボイラ本体で発生したトラブル

→検査→改善のフローをベースとして実施される予防保全や改良保全など、損傷を未然に防止する保全対策が経済的に有利といえる。

2. 劣化状況から見た火力発電プラントの現状

1979年から1998年の期間(20年間)において、事業用ボイラ本体で発生した、プラント停止に至ったトラブル(当社調査実績)を、5年ごとに整理した。その結果を図3および図4に、それぞれ原因別・部位別に示す。

原因別(図3)では、1979年から1993年の期間において疲労に関するトラブルが増加傾向にあり、最近(1994年から1998年)でも、3割以上の高い構成比を占めている。また、クリーブ(SUSスケールなど異物の閉塞を含む)に関するトラブルは、時系列的に大きな変化はなく、構成比で20%前後発生している。なお、石炭焚ボイラ(流動層ボイラを含む)の増加により、最近(1994年から1998年)では、アッシュカットなど、摩耗による損傷が増加傾向にあることがわかる。

部位別(図4)では、炉壁管のトラブルが時系列的に顕著に増加しており、最近(1994年から1998年)では全体の約6割を占める。これは火力発電プラントへ中間負荷運用が課せられるようになったことが背景となっている。炉壁管の具体的な損傷としては、炉壁パネルに付着されているさまざまな金物(シール金物、ウォールボックス、バックステー等)取付部における熱疲労や腐食疲労(図5)などの疲労損傷が大部分を占める。これらの損傷は、ボイラの経年化が進行することにより、

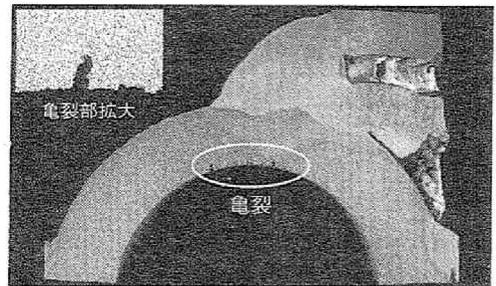


図5 火炉壁管内面に発生した腐食疲労損傷

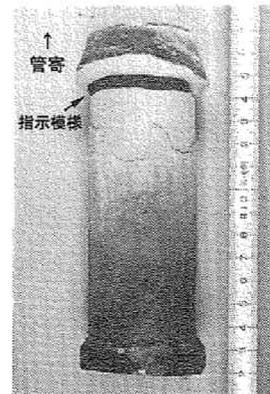
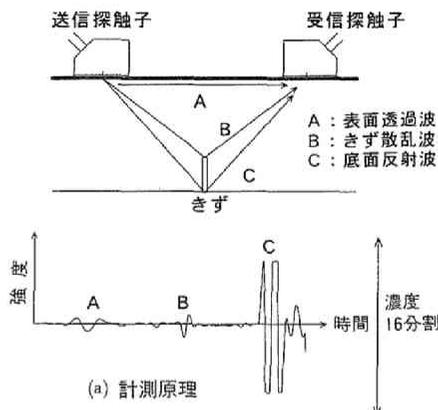


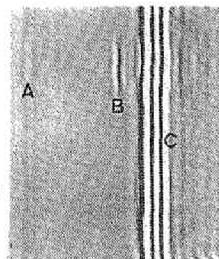
図6 過熱器管管台溶接部の割れ (PT後)

さらに顕在化してくるものと考えられる。一方、過熱器、再熱器は、時系列的に比率が低下傾向にある。しかしながら、中間負荷運用の増加により、管台(スタブ管)溶接部に曲げ応力が繰り返し作用する結果、当該部における疲労損傷(図6)が顕著となっている。

このように、設備や機器の損傷形態が疲労損傷支配型へ変化していることが最近の特徴といえる。また、図3(図4)に示すように、近年では運用条件が比較的厳しくなっているにもかかわらず、ト

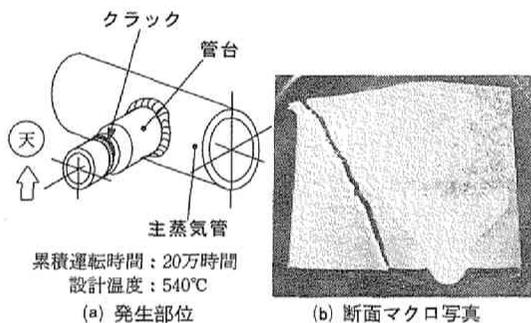


(a) 計測原理



(b) TOFD画像

図8 超音波TOFD法の概要



(a) 発生部位

(b) 断面マクロ写真

図7 タイプIVクラック

ラブルの発生件数は減少していることがわかる。これは、最近、高効率ガスタービンによる改良型コンバインド・サイクル・プラント(ACC)の増加など、プラント全体に占めるACC構成比率増加の影響等も考えられるが、ボイラの予防保全、改良保全が適切に行われていることが大きく寄与しているものと予想される。

最近では、経年ボイラの配管溶接部において、タイプIVクラック(母材と溶接熱影響部境界の細粒域に発生するクラック:図7)と呼ばれるクリープ損傷も確認されている。このタイプIVクラックは、鋼中のSb, Sn, Asなどの不純物の影響が大きく、これら不純物の量が多い場合、クリープ亀裂伝播速度が高くなることが報告⁽²⁾されている。なお、不純物は、昭和50年から55年の期間以前に製造された鋼に多いことも報告されている。そのため、当該期間以前に製造された鋼を使用した経年ボイラでは、特に継続的な検査・監視が必要と思われる。

3. ボイラにおける予防保全の実際

予防保全のツールとなる各種非破壊検査技術、余寿命評価システム、予防保全を考慮した改造の実例および予防保全支援システムについて、概要を以下に示す。

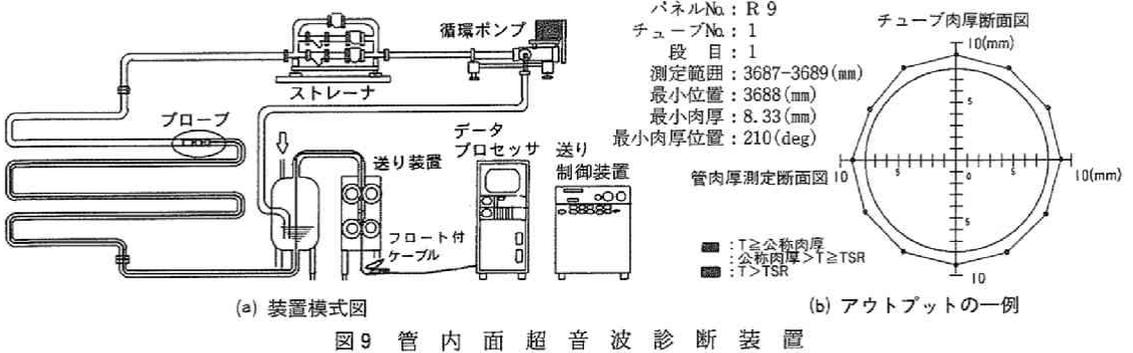
3.1 非破壊検査技術

非破壊検査手法としては、放射線透過試験(RT)、超音波探傷試験(UT)、磁粉探傷試験(MT)、染色浸透探傷試験(PT)が一般的に使用されている。これらの検査は、欠陥の有無の確認には有効であるが、定量的に劣化の程度を把握するには不十分等の欠点があった。最近では、余寿命評価等の定量的な劣化評価に結びつく非破壊検査手法が採用されている。以下に、当社で実用化されている代表的な非破壊検査技術を紹介する。

(1) 超音波TOFD法⁽³⁾

超音波TOFD(Time of Flight Diffraction)法は、イギリスのHerwell研究所において1980年に開発された技術である。従来の超音波パルス反射法と比較して、高精度、検査速度が速い、きずの評価が容易などの特長を持っている。当社では平成2年から研究開発に着手し、さまざまな部材の検査に本検査法を適用してきた。

図8に、探傷の原理を示す。検査は同じ種類の二つの斜角探触子を対向させ、一方を送信用、他方を受信用として用いる。二つの探触子の間隔を一定距離に保ち、溶接線と平行に走査させ、このとき得られる全波形をコンピュータに採取する。きずのない箇所を受信される信号は、試験体表面を伝播する信号Aと底面での反射波Cだけである



が、きずのある場合には、さらにきずの端部に散乱する信号Bが得られる。探触子間隔を一定としているので、得られた探傷図形から伝搬時間を読みとり、きずの高さを幾何学的に求めることができる。探傷画面は採取した波形の振幅値をグレースケール(濃淡)またはカラー表示でき、記録性や客観性が高い。

このように、本検査法は、きずの端部で生じる散乱波を受信し、超音波の伝播時間からきず端部の深さ方向の情報を正確に得ることができるので、きず高さを精度良く測定できる。また、探傷作業面において、きずの評価を除けば、本検査法による探傷作業は溶接線に対して平行に直線的に走査するだけでよい。そのため、従来法のように探触子を溶接線に対してジグザグに走査して探傷を行う必要がなくなり、探傷時間の短縮化をはかることができる利点もある。

(2) 管内面超音波診断装置

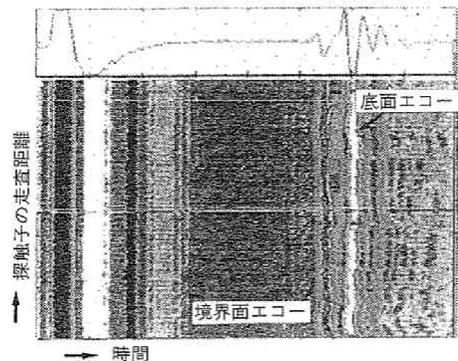
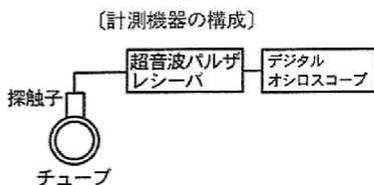
横置型の過熱器、再熱器および節炭器などでは、管の肉厚および付着金具溶接部の欠陥探傷を行う場合、パネルを吊り上げて検査する必要があるため、検査に時間および費用がかかる場合が多い。当社では、管内面から複数の超音波プローブを挿入し、肉厚計測および欠陥探傷を同時に行うシステム(図9)を実用化している。

(3) 超音波による水蒸気酸化スケールの計測
 管内面に生成する水蒸気酸化スケールを測定する場合、通常の超音波肉厚計測では、計測値が実際の鋼管肉厚と水蒸気酸化スケールの厚さの和として表示されるため、残存肉厚の評価が困難となっている。当社では、図10に示すようなチューブ断面Bスコープ法による超音波計測装置を開発し、水蒸気酸化スケールの厚さおよび残存鋼管肉厚の測定を行っている。これら測定結果は、過熱器管や再熱器管非加熱部の設計必要肉厚(Tsr)の評価および余寿命評価の高精度化などに利用されている。

(4) 超音波による溶射皮膜の健全性評価⁽⁴⁾⁽⁵⁾

溶射は最近、ボイラ主要耐圧部の耐摩耗・耐高温腐食対策(耐硫化腐食対策)として一般的に使用されるようになってきた⁽⁶⁾。一例として、微粉炭焚ボイラのウォールデスラガまわり火炉壁管に摩

図10 水蒸気酸化スケール測定装置と測定結果の一例



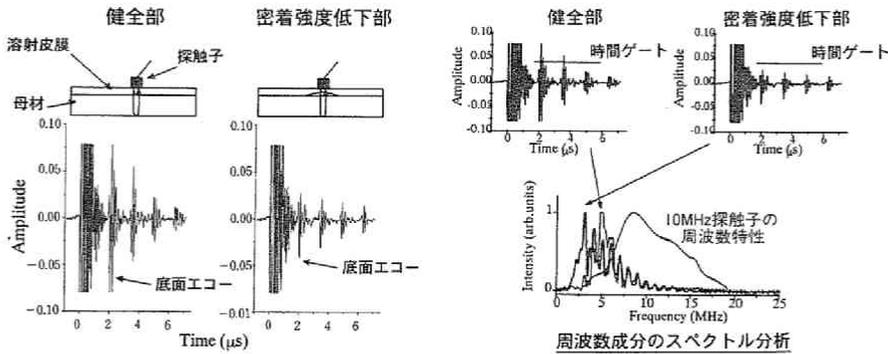


図12 超音波による溶射皮膜健全性評価の原理

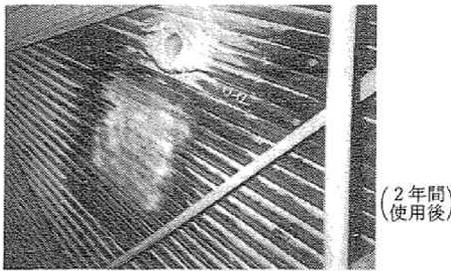


図11 耐摩耗溶射パネルの外観

耗対策として適用した溶射パネルの外観(図11)を示す。当該部は石炭灰によるアッシュカットにより、定期的に肉盛り補修やパネル新替などの対策がとられてきた。耐摩耗溶射の適用により、減肉量が無被覆の鋼管と比較して1/5以下に低減することが認められ、その有効性が確認されている。

しかしながら、溶射皮膜の経年的な劣化評価は、目視による外観検査と溶射膜厚の減肉評価に限定され、皮膜内部の劣化を検査することができないという欠点があった。当社では、溶射皮膜の表面から垂直にUTを送信し、溶射皮膜と下地鋼管の

界面を通過したUTの周波数解析を行うことにより、特定の周波数帯のスペクトル強度で溶射皮膜と下地鋼管との密着強度を評価する方法(図12)を開発した。本検査法は、既に事業用ボイラ火炉壁管に施工した溶射皮膜の劣化評価法として実用化している。

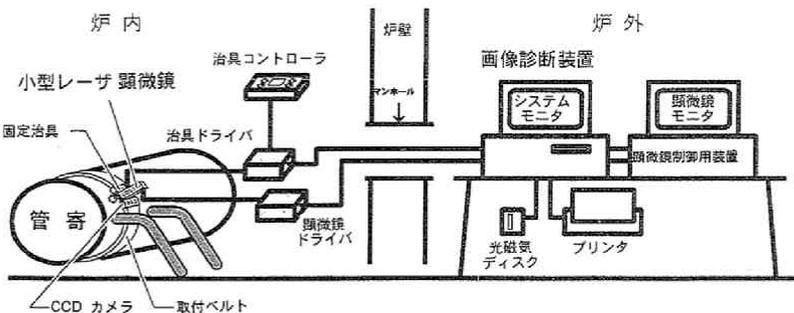
なお、溶射皮膜の健全性評価については、ほかにも材質のいかにかわらず溶射膜厚を計測できるUT膜厚計測法を開発するなど、溶射に関する保守管理ツールの開発を積極的に行っている。

3.2 余寿命評価技術

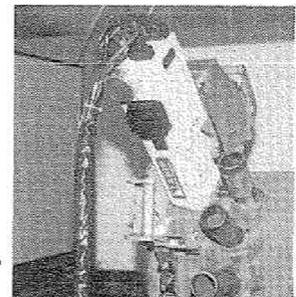
余寿命診断技術としては、応力解析法や破壊試験法などの従来技術に加え、ミニチュアサンプル法、組織検査法、硬さ測定法などが実用化されている。当社では、寿命予測精度の向上、検査の高速化および省力化、検査費用低減などの要望を実現するため、以下の技術を開発・実用化した。

(1) レーザ顕微鏡によるクリープ寿命評価⁽⁷⁾

ボイラ高温部材の溶接部では長時間の使用により、金属組織中にクリープポイド(以下、ポイド)



(a) システム模式図



(b) 小型レーザー顕微鏡

図13 レーザ顕微鏡によるクリープ寿命評価システム

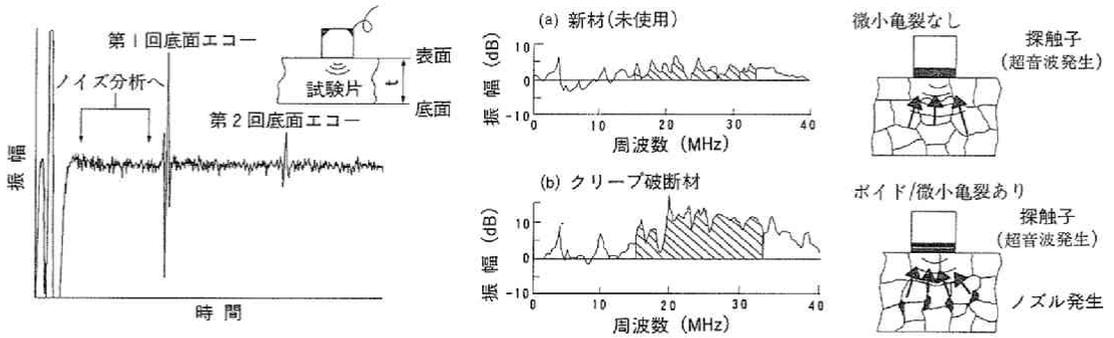


図14 超音波ノイズ分析法の基本原則

が発生する。金属組織に占めるポイドの発生率(面積率)はクリープ寿命と密接に関連しており、検定曲線(マスターカーブ)として整理されている。従来、余寿命評価は、現場で当該部のレプリカを多数採取し、研究室で走査型電子顕微鏡によるポイド観察を行い、それを検定曲線に照らし合わせることで、クリープ損傷度を評価していた。この方法では、ポイドの識別に専門家が必要であり、診断に時間がかかるなどの問題があった。このような問題を解決するため、小型レーザ顕微鏡で診断部位を直接観察し、かつ画像処理によりポイドを自動認識し、現場で短時間に損傷度を評価できる診断システム(図13)を中国電力(株)と共同で開発した。本システムの採用により、従来のレプリカ法と比較して、診断時間が1/3程度に短縮できるうえ、管台溶接部等の狭隘部の直接観察ができるなど寿命評価機能の向上がはかれた。

(2) 超音波ノイズ分析法^⑧

超音波ノイズ分析法は、材料内での超音波後方散乱を利用する散乱波法の一つである。図14に、本法による寿命診断の基本原則を示す。まず、サンプルに探触子をあて、超音波を発信し、材料中のポイドや微視亀裂によって散乱された散乱波ノイズ(林状エコー)を採取する。この散乱波ノイズの周波数分析を行い、ある周波数帯域内のノイズ量を求めてクリープ損傷量を評価するものである。超音波ノイズ分析法は材料内部での散乱波だけを解析に用いるため、配管内面が腐食により凹凸があるような場合でも悪影響を受けないなどの優れた特長を持っている。

3.3 予防保全を考慮した改造の実際

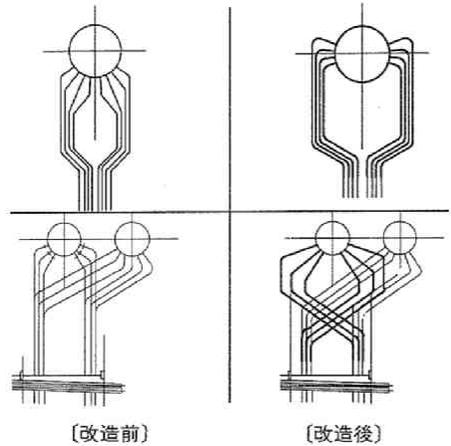


図15 管寄スタブ管のフレキシブル化対策例

(1) 管寄せ上下間温度差($\Delta T3$)を考慮した管寄スタブフレキシブル化改造

ボイラの起動・停止時には、管寄管台(スタブ)には各種温度差に起因して、スタブ管溶接部に熱応力が作用し、疲労による割れ損傷が発生する場合がある。このような熱疲労対策として、図15に示すように、スタブ管の曲げを大きくとり、剛性を小さくし、スタブ管溶接部に発生する応力を低減するような対策をとっている。

ボイラの起動・停止時にスタブ管に発生する温度差には、図16に示すように、下記がある。

- ① 管寄せと天井壁ハンガーとの温度差($\Delta T1$)
- ② 同一パネル内管間温度差($\Delta T2$)
- ③ 管寄せ上下間の温度差($\Delta T3$)

これらの温度差は必ずしも同一時刻で最大とまらない。そのため、各温度差による熱応力の合計が最大となる時刻での応力値を使用して設計して

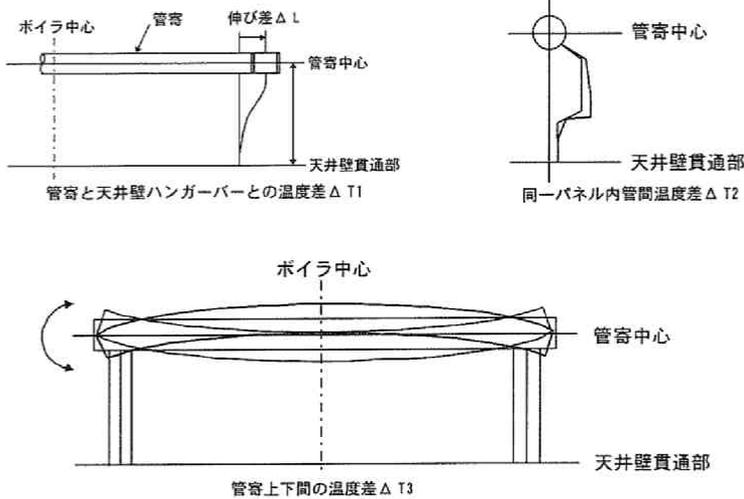


図16
ボイラ起動・停止時
管寄管台に発生する
各種温度差

いる。当社では、平成4年以降に運転開始の新設ボイラから、従来の $\Delta T1$ 、 $\Delta T2$ だけでなく、管寄せ上下間の温度差 $\Delta T3$ も考慮した管寄スタブのフレキシブル化設計を行っている。また、既設ボイラに対しても、中間負荷運用に対する耐力の向上対策として、 $\Delta T3$ を考慮した管寄スタブのフレキシブル化改造の提案および改造の実施を行っている。

(2) 炉壁付きウォールボックス・コーナ部のラウンド化改造

火炉壁管には、その支持あるいはバーナ、マンホールなどの開口のために付着金物を取り付けられている。このような箇所では、起動・停止、負荷変動時の温度差によって熱応力が生じ、金物溶接部の管外面からの疲労亀裂に加えて、付着金物を取り付けられた側の管内表面に多数の微細な亀裂(腐食疲労)が発生することがある。一般に、腐食疲労は、応力、腐食形態、部材の形状、圧力、温度、運転履歴、循環水環境など種々の要因が影響した複雑な現象と考えられている。

ボイラ構造面からは、鋼管と付着金具溶接部における応力低減対策として、図17に示すように、ウォールボックスのコーナ部をラウンド化するなどの対策を行っている。

3.4 予防保全支援システム⁽⁹⁾

当社では、保守管理の合理化を目的として、従来、紙の形で管理していた当社製造事業用ボイラの経歴情報をデータベース化し、ボイラ保守管理

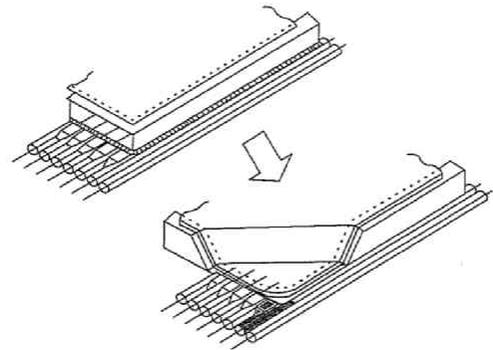


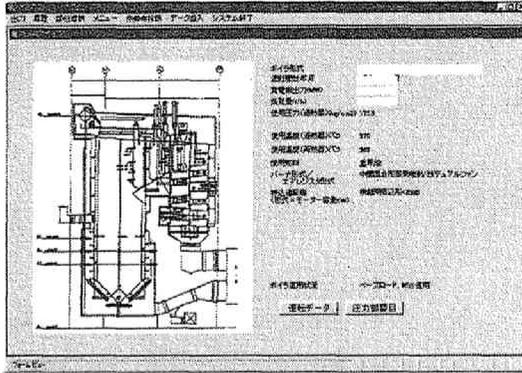
図17 ウォールボックス・コーナ部の改造例

システム(図18)として一元管理している。本システムは、主に下記のデータベースから構成されている。

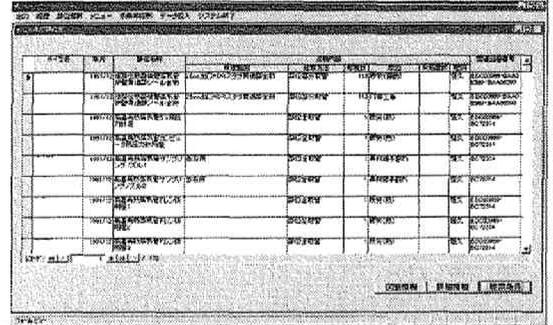
- ① ボイラ各部の設計情報(部位名称、設計温度、設計圧力、管仕様など)
- ② 経歴情報(点検、改造修理、事故損傷など)
- ③ ボイラ諸元情報(ボイラ型式、蒸発量など)
- ④ 図面情報(ボイラ各部位の形状)

これらに加え、クリープ余寿命診断、腐食疲労余寿命診断やボイラ損傷診断(損傷状況を対話形式でデータをインプットすることにより、損傷名、損傷対策などの情報をアウトプットするシステム)といった当社開発ソフトウェアもサブシステムとして付属されている。

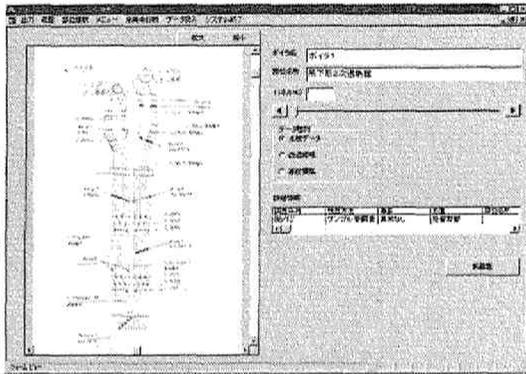
本システムは、パーソナルコンピュータから利用できるクライアントサーバ形式で構築されていることから、予防保全支援ツールとして広範囲に



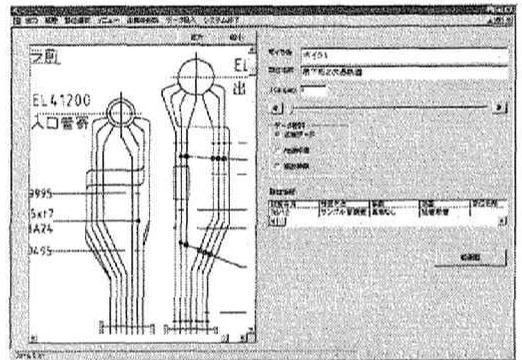
(a) 初期画面



(b) 経歴情報検索結果



(c) 部位選択画面(全体)



(d) 部位選択画面(詳細)

活用されており、保全業務の迅速対応化・省力化に大いに貢献している。

おわりに

既設ボイラ本体の予防保全についての当社の取組みを紹介した。今後も、評価の迅速性、現場での機動性および経済性の向上など、定検合理化に大きく寄与する検査・評価手法の開発・実用化に注力していく所存である。

本発表が関係各位の保全対策の御参考になれば幸甚である。

参考文献

- (1) 武岡著：『特級技能士合格講座』設備管理
- (2) 今本：「ボイラ定検周期延長に伴う余寿命評価技術」2000 (社)火力原子力発電技術協会関東支部・現場に密着した保守技術に関する講習会概要集
- (3) 芝田・米山・荒川・笹原：「超音波TOFD法の

- 適用拡大」石川島播磨技報 1998 Vol.38 No.2
- (4) 島中・難波・梶谷・荒川：「溶射皮膜密着強度評価の非破壊的手法」1999 (社)日本非破壊検査協会・平成11年度秋季大会講演概要集
- (5) 島中・梶谷・荒川・芝田：「溶射膜厚計測の超音波を用いた非破壊的手法」1999 (社)日本非破壊検査協会・平成11年度秋季大会講演概要集
- (6) 難波・溝・梶谷：「耐高温腐食・耐摩耗溶射材のボイラへの適用」石川島播磨技報 1998 Vo.38 No.3
- (7) 山本・御園・野中・馬木：「火力高温部材のクリープ損傷診断システムの開発」石川島播磨技報 1997 Vol.37 No.6
- (8) 米山・中代・村上・芝田・大友：「超音波によるクリープ損傷評価技術の開発」石川島播磨技報 1988 Vol.28 No.5
- (9) 石金・弓削・木村・藤井：「ボイラ保守管理システムの開発とGISの適用」石川島播磨技報 1999 Vol.39 No.3