

ボイラの予防保全技術

Boiler Preventive Maintenance Techniques

昭和30から40年代にかけて建設された多数の火力発電設備は運開後20年を経過し、経年劣化が進んできている。一方、立地難や厳しい環境規制などで新設火力プラントの建設が難しいため、既存の経年火力設備の長期安定運用化に向かっており、さらに電力需給の関係から経年火力設備が過酷な中間負荷運用に移行され、設備の劣化度合いが進む傾向にある。このため、経年火力設備の予防保全がますます重要になってきており、これにこたえるため、ボイラ設備の予防保全技術の開発や充実に鋭意取り組んできた。さらに、現地作業の工程短縮のための調査診断および工事の合理化も平行して進めてきている。

山中敏雄* *Toshio Yamanaka*
 関 幹人* *Mikito Seki*
 田村広治** *Kōji Tamura*
 諸永雅晴* *Masaharu Moronaga*

1 緒 言

火力発電設備の約60%は運開後20年を経過し、累積運転時間も10万時間を超えて運転されている。さらに、電力需給バランスの関係から、火力発電の運用条件が従来のベース負荷運用から過酷な中間負荷運用に移行しており、設備の劣化がますます進むものと予測される。したがって、経年火力設備の長期安定運用を図るため、ここでは経年ボイラ設備に関する予防保全技術—劣化損傷要因と診断法、余寿命診断技術、耐力向上の具体策、さらに現地での調査診断および工事の合理化による工程短縮の具体策—について述べる。

2 設備診断の概要

2.1 経年ボイラの課題と適用技術

経年ボイラの課題として、設備面では経年劣化状態を適正に評価すること、運用面では運用形態、環境規制などの運用ニーズに対応することが重要である。設備面の適用技術として、クリープ、疲労、腐食摩耗などの要因による材料の経年劣化に対する余寿命診断、損傷検出、データの統計処理がある。運用面の適用技術として、新燃焼技術、DSS(Daily Start and Stop)化改造、運転支援システムなどがある。これらの関係を図1に示す。

2.2 ボイラ耐圧部の経年劣化損傷要因

ボイラ耐圧部の経年劣化損傷要因は、図2に示すようにクリープ、疲労、腐食摩耗に大別される。これらの要因が単独に存在する場合と腐食疲労のように複数の要因組み合わせで存在する場合がある。経年劣化損傷要因とメカニズムを正確に把握し、損傷部位、部品の損傷範囲を的確に判断し、正し

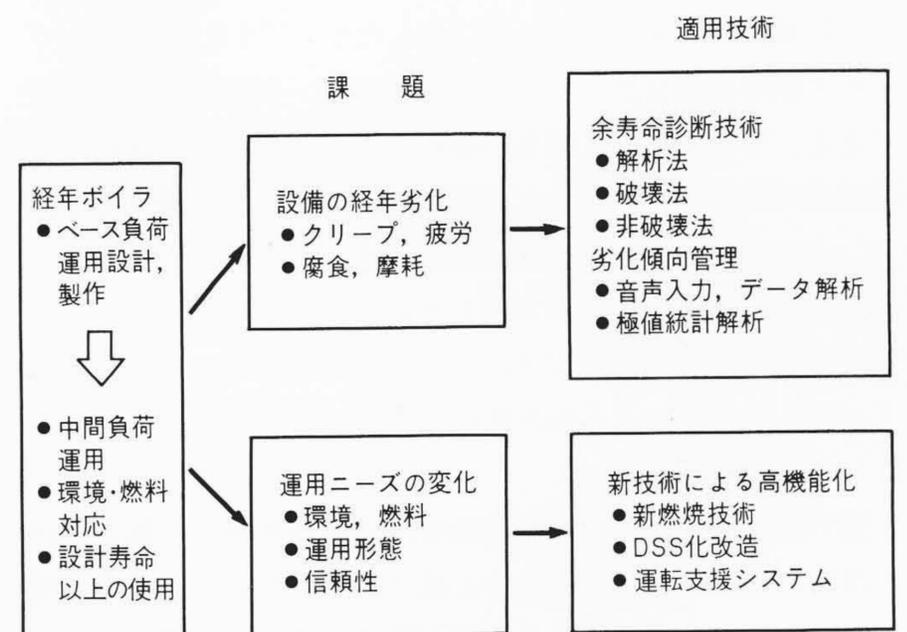
く診断評価することが必要である。

2.3 経年ボイラの劣化部位の選定

経年劣化部位の選定では、理論的および経験的に故障の可能性があり、かつ故障発生時ボイラ運転への影響の大きいものを重要度評価して、部位、部品を絞り込み、管理対象項目として選定することが重要である。

2.4 診断部位と診断法

代表診断部位とその損傷要因および診断法を表1に示す。腐食摩耗、き裂、膨出などの診断には従来の非破壊検査を実



注：略語説明 DSS (Daily Start and Stop)

図1 経年ボイラの課題と適用技術 当初計画されたボイラの時代のニーズに対応するための課題と、それに対する適用技術開発の説明図を示す。

* バブコック日立株式会社 呉工場 ** バブコック日立株式会社 呉研究所

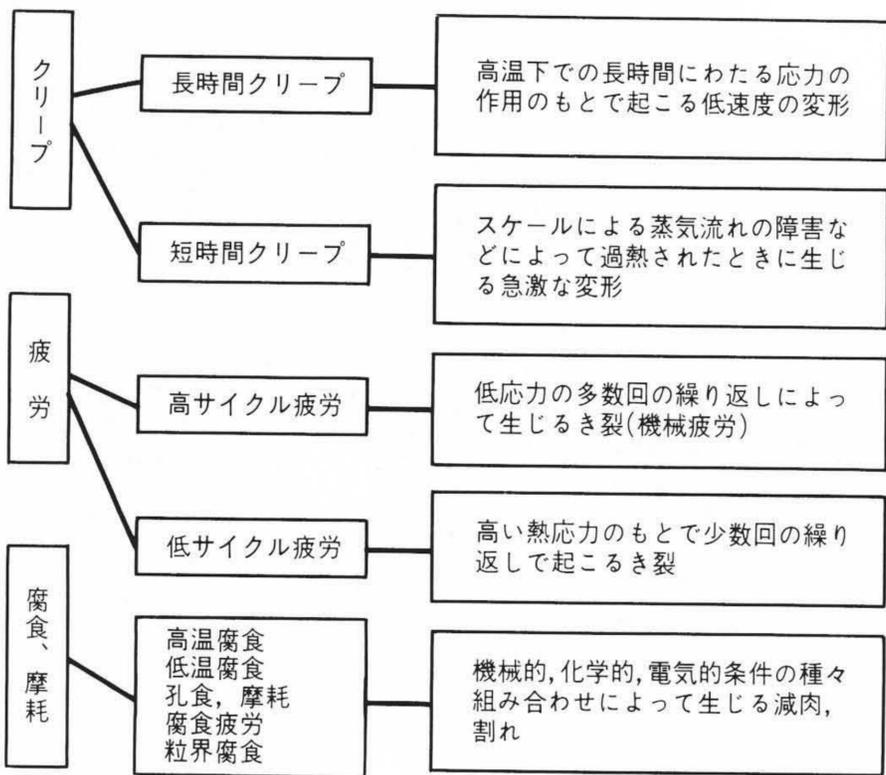


図2 経年劣化損傷要因とその説明を図に示す。

表1 ボイラ耐圧部の損傷要因と診断法 代表部位に対する損傷要因と適用診断法の説明を表にまとめて示す。

区分	代表部位	損傷要因	診断法
高温厚肉部	● 過熱器, 再熱器管寄せ	● クリープ	● 組織法
	● 主蒸気管 ● 再熱蒸気管	● 疲労 ● 時効	● 破壊法 ● 解析法
中温厚肉部	● ドラム ● 汽水分離器	● 疲労	● 組織法 ● PT, MT, UT法
伝熱管	● 過熱器管 ● 再熱器管 ● 節炭器管	● クリープ ● 時効 (腐食・摩耗)	● 組織法 ● 破壊法 ● MT, UT法 ● 寸法
炉壁	● 火炉 ● ケージ壁	● 疲労 (腐食)	● 組織法 ● MT, UT法
付着金具 溶接部	● 過熱器, 再熱器管 ● 火炉壁管 ● つりラグ	● クリープ ● 疲労	● MT, UT法 ● 組織法
管台 溶接部	● ドラム管台 ● 過熱器, 再熱器管寄せスタップ	● 疲労 ● クリープ	● MT, UT法 ● 組織法

施し、劣化傾向管理、き裂発生管理などによって寿命を診断する。クリープ、疲労、時効などに関しては、後述する余寿命診断技術を駆使して診断する。

3 余寿命診断技術

ボイラ材料の余寿命診断技術は、間接的な応力解析法と、実機部材を直接診断する破壊法および非破壊法に大別される¹⁾。

応力解析法は、解析によって求めた部材の応力と材料強度データに基づいて寿命を診断する方法で、診断対象個所に制約がなく、今後の運用モードが変化する場合も診断可能である。破壊法は、実機部材から採取したサンプルを破壊試験(クリープ破断試験など)して診断するもので、精度の高い診断ができる。非破壊法は、損傷の進行とともに変化する部材の金属組織や物性値の変化を、非破壊的に検出して診断する方法で、多くの個所を効率よく診断できる。

このように、いずれの方法もそれぞれ特徴を持っており、診断の目的、対象個所などに応じて診断法を選定し、対応している。以下、これらの診断法の内容について述べる。

3.1 応力解析法

応力解析法による余寿命診断は、まず対象個所の構造寸法と温度、圧力などの運転条件に基づき、解析式または有限要素法による応力解析を行って、熱応力や内圧応力を計算する。次にその計算による応力値とクリープ破断強度、疲労強度などの材料強度データからクリープおよび疲労損傷率を計算し、余寿命を評価する。

3.2 破壊法

実機からサンプルを採取し、温度応力などの試験条件を設定してクリープ破断試験などの破壊試験を実施する。試験条

件は実機使用条件よりも厳しい条件での加速試験となり、低応力、長時間側のデータを精度よく推定することが重要となる。

クリープ破断試験では、ラーソン ミラー パラメータと応力の関係を示す回帰式²⁾を求め、実機応力および使用温度での破断時間を推定する。

3.3 非破壊法

ボイラ材料では、損傷による硬さや電気抵抗などの物性値の変化が小さいので、金属組織の変化による診断^{3),4)}を実施している。

クリープ損傷の挙動は、粒内クリープあるいは粒界クリープのどちらが主体となるかによって異なることから、粒内クリープが主体となる材料に対しては結晶粒変形法を、粒界クリープが主体となる材料にはキャビティ法を適用している。

(1) 結晶粒変形法^{3),4)}

結晶粒変形法は、クリープによる結晶粒の変形度合いを定量化することによって損傷を診断する方法である。ボイラ用Cr-Mo鋼母材では、キャビティが発生しにくいために従来診断が困難とされていたが、この方法の開発によってクリープ損傷の診断が容易になった。

この方法は、図3に示すようにクリープ損傷が進行すると、フェライト結晶粒が応力方向に変形することに着目したものである。結晶粒変形の定量化は、結晶粒の最大径の方向と応力方向との角度 θ_m を画像処理装置で測定し、その分布の標準偏差である変形係数 S_m をパラメータとして行う。変形係数 S_m とクリープ損傷率 ϕ_c との間には、図4に示すようなよい相関関係があり、精度のよい診断が可能である。

実機の診断では、金属組織のレプリカを採取し、光学顕微

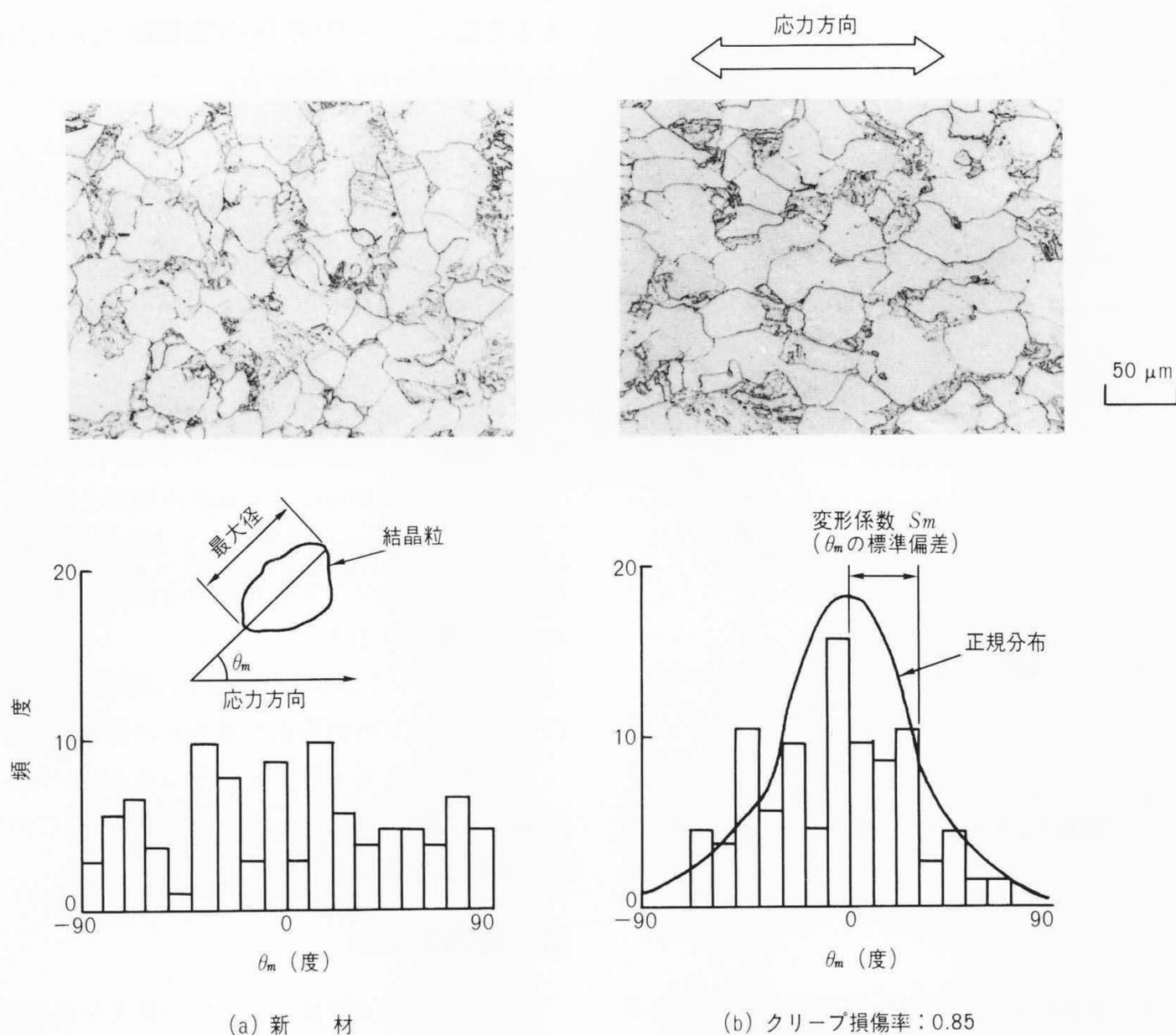


図3 クリープ損傷による結晶粒の形状変化($2\frac{1}{4}\text{Cr-Mo}$ 鋼母材) ボイラ用Cr-Mo鋼母材の結晶粒は、クリープ損傷によって変形し、その程度は変形係数によって定量化できる。

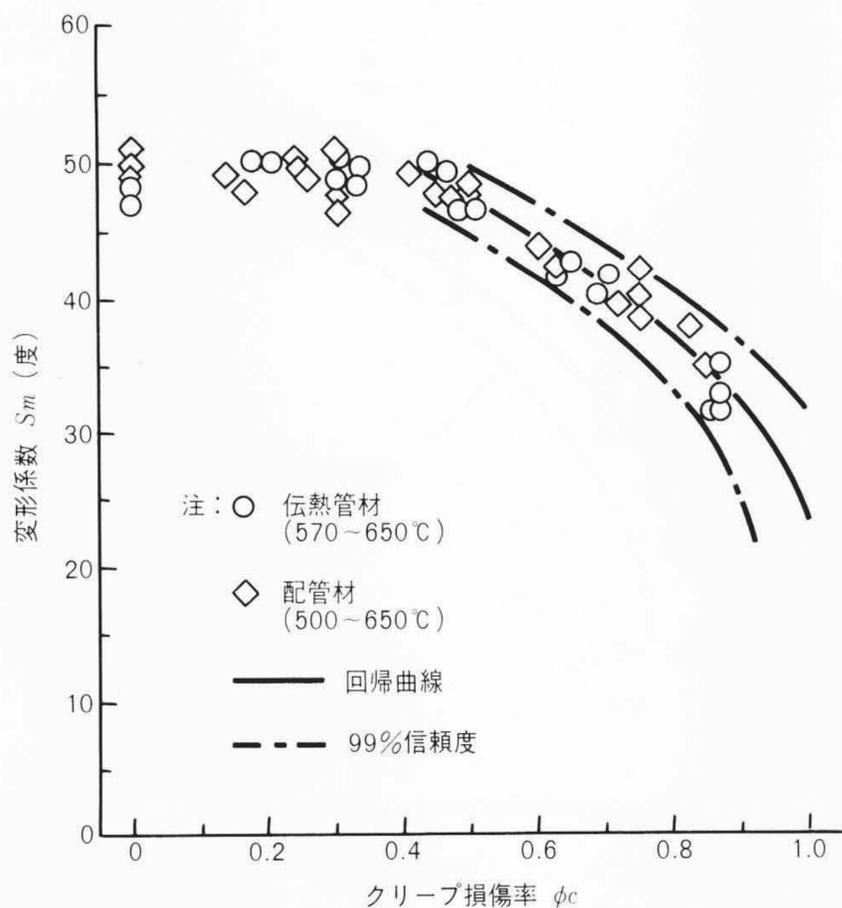


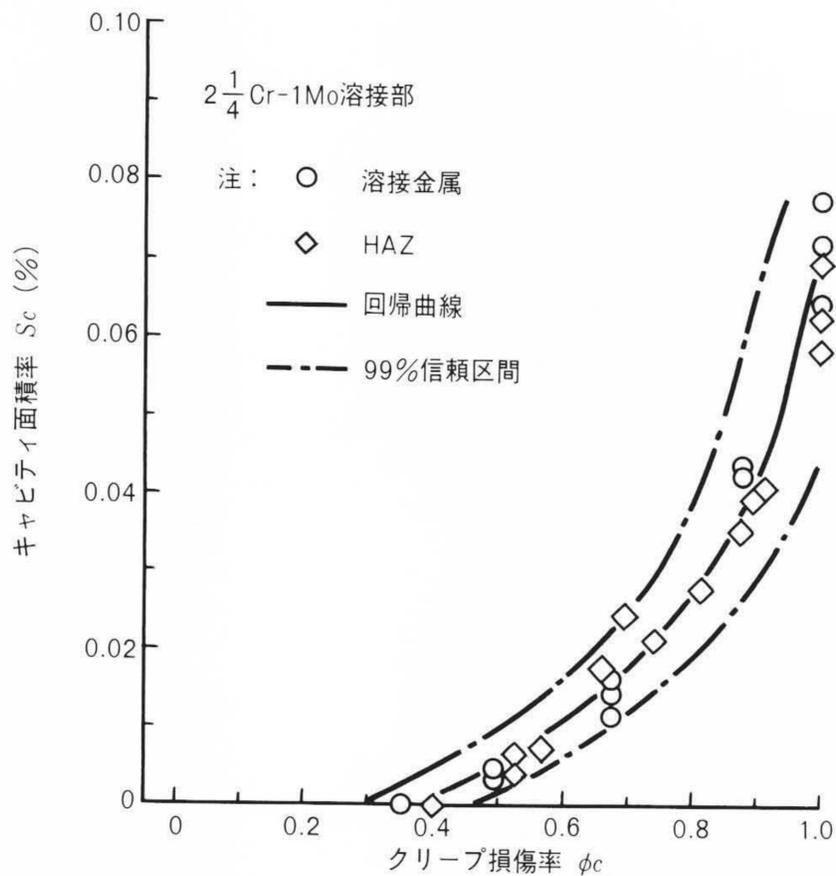
図4 結晶粒変形法のマスターデータ Cr-Mo鋼母材では、クリープ損傷率と変形係数の間により相関関係がある。

鏡を介して画像処理装置に入力して θ_m を計測し、変形係数 S_m を求める。このようにして測定した変形係数 S_m を、あらかじめ実験的に求めた変形係数 S_m とクリープ損傷率 ϕ_m のマスターデータ(図4)に代入することによって、平均クリープ損傷率と99%信頼度を考慮した安全側の損傷率を算出する。

(2) キャビティ法^{3),4)}

Cr-Mo鋼溶接部、SUS(ステンレス鋼)ではクリープ損傷の進行とともに、粒界にキャビティが発生するので、キャビティ発生量に基づく診断を行う。

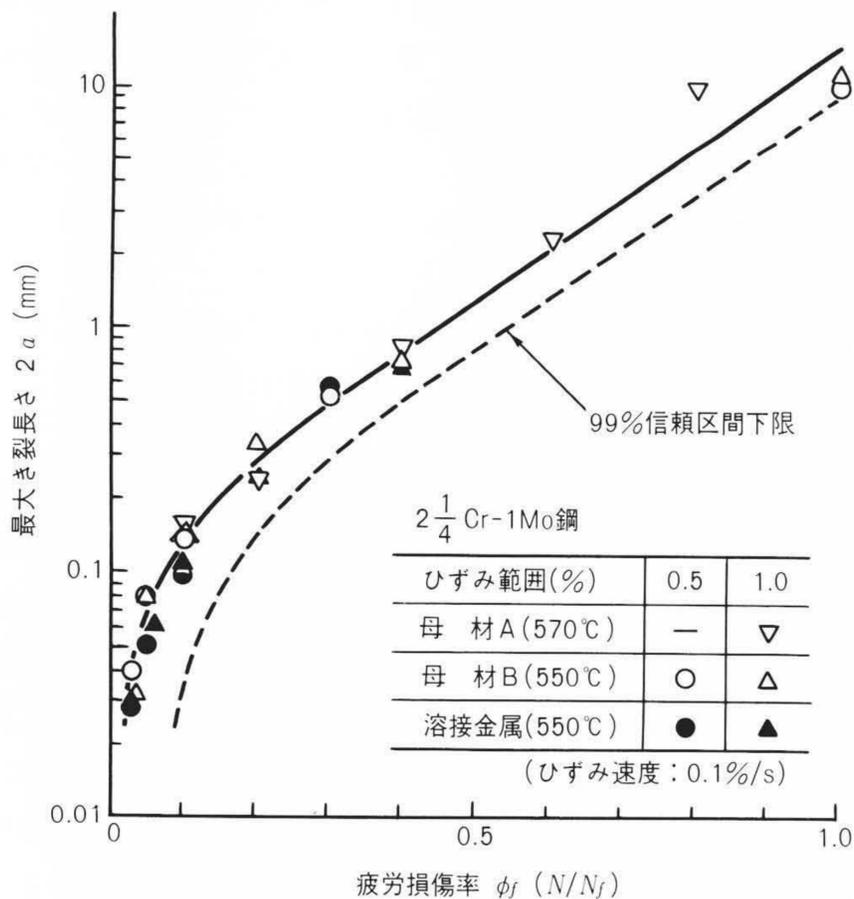
キャビティの定量化法として、Aパラメータ法(観察粒界数に対するキャビティ発生粒界数の比)が適用されている。しかし、実機での溶接は多層溶接が行われることから、粒界の識別が困難である場合が多い。特に溶接金属は凝固組織であるために、粒界の識別が困難である。このため、溶接部ではキャビティ面積率 S_c (観察面積に対するキャビティ面積の比)のほうが容易に測定できる利点がある。また、キャビティ面積率 S_c とクリープ損傷率 ϕ_c の間には、図5に示すようなよい相関関係があることから、キャビティ面積率 S_c によってクリープ損傷率を精度よく診断できる。



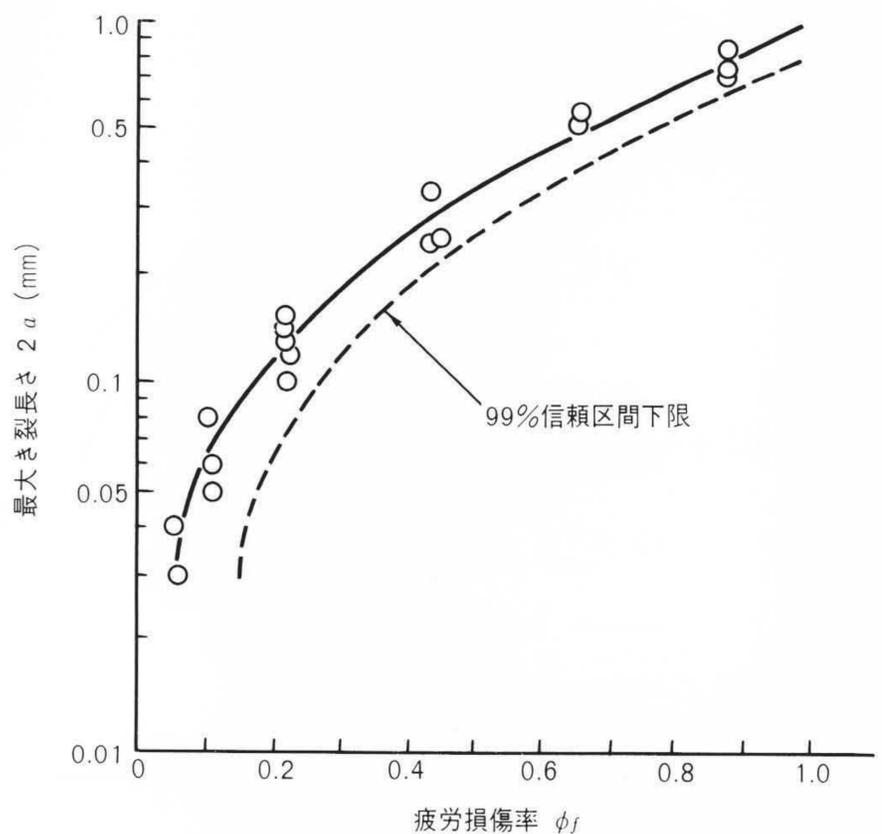
注：略語説明 HAZ (Heat Affected Zone: 熱影響部)

図5 キャビティ法のマスターカーブ(2 1/4 Cr-1Mo鋼溶接部) Cr-Mo鋼溶接部では、クリープ損傷率とキャビティ面積率の間により相関関係がある。

実機の診断では、金属組織のレプリカを採取し、走査電子顕微鏡で観察してキャビティ面積率 S_c を測定する。このようにして測定した S_c を、あらかじめ求めておいたキャビティ面積率 S_c とクリープ損傷率 ϕ_c とのマスターデータ(図5)に代入す



(a) 試験片の破断を損傷率1とした場合



(b) 最大き裂長さ1 mmを損傷率1とした場合

図6 微視き裂の最大長さと疲労損傷率の関係 Cr-Mo鋼の疲労損傷は、母材、溶接部とも最大き裂長さで診断できる。

ることにより、平均クリープ損傷率と99%信頼度を考慮した安全側の損傷率を算出する。

(3) 微視小き裂法³⁾

金属材料が疲労損傷を受けると、寿命の早期から部材表面に長さ数十マイクロメートルの微視小き裂が発生し、寿命の大半がその進展過程であること^{4),5)}が知られている。最大き裂長さと疲労損傷率の関係を図6に示す。最大き裂長さと損傷率の間にはよい相関関係があり、き裂長さによって疲労損傷を診断できる。

3.4 実機での診断実施例

ここでは非破壊法による診断実施例を示す。

3.3節で示したレプリカ法による非破壊診断技術を開発し、現在までに約30プラントの余寿命診断に適用した。診断結果の一例を表2に示す。

図7はプラントDの診断結果で、高温厚肉部である過熱器出口管寄せおよび再熱器出口管寄せの蒸気取出管台部に、クリープ損傷によるキャビティを伴ったき裂が発生しており、余寿命は4万時間以下であると診断できた。このため、Tピース部の新替えを実施した。

4 耐力向上策

経年ボイラの大半はベース負荷運用を基本に設計されており、設備の経年劣化が進むとともに特に頻繁な起動、停止を伴う厳しい運用が行われる場合、繰返し熱応力のかかる部位には設備耐力強化向上などの改善を行う必要がある。

表2 非破壊法によるボイラ余寿命の診断実績 高温耐圧部で、スタップ管台のように応力が集中しやすい個所の寿命消費が進んでいる。

プラント	A	B	C	D	E	F	G	H	I
診断部位									
二次過熱器出口管寄せ	×*	○	○	△**	○	○	○	○	○
再熱器出口管寄せ	○	○	○	×**	○	○	○	○	○
水壁管寄せ	—	—	○	—	—	—	○	—	○
主蒸気管	○	○	—	—	○	×***	—	—	—
高温再熱蒸気管	—	○	—	—	○	×***	—	—	—
二次過熱器管	—	○	—	○	○	○	○	×****	○
再熱器管	—	—	—	○	—	—	—	—	—
水壁管	—	—	—	○	○	○	○	○	○

注：×〔2万時間以下(寿命)〕 * (スタップ管台取り替え推奨)
 △〔2～5万時間(寿命)〕 ** (Tピース部取り替え推奨)
 ○〔5万時間以上(寿命)〕 *** (サポートラグのシャーラグ化推奨)
 —(診断対象外) **** (スペーサ取り替え推奨)

ボイラ設備の改善策としては、その目的によって次の4項目に分類される。

- (1) 応力集中の低減
- (2) 熱伸び拘束の解除
- (3) リフレッシュおよびフレキシビリティ向上
- (4) 強度の向上

以下にその具体的実施例を二、三述べる。

4.1 応力集中の低減例

(1) 大径管サポートの管取付部の改善

過熱器出口、再熱器出口管寄せなどはトルクブラケットと

称する板を管寄せ外周に直接溶接し、また主蒸気管、再熱蒸気管などの主配管はサポートラグと称する板を配管に溶接してサポートしている。

これらには頻繁な起動、停止や負荷変化時に管寄せ、配管内部の流体温度変化によって溶接部に応力が繰り返し作用する。これを防ぐため、図8に示すようにシャーラグを介してサポートし、サポート支持部に柔軟性を持たせて応力を低減させている。

(2) メンブレンバー止端部のアール加工

ボイラ火炉周壁管にはメンブレンバーが使用されており、流体経路の異なる隣接管相互の温度差により、メンブレンバー止端部に熱応力が集中する。この対策として、図9に示すように止端部にアール部を設け、応力集中を緩和させる構造としている。

4.2 熱伸び拘束の解除例

(1) 周壁タイバー構造改善

タイバー溶接部の割れ防止のために、タイバークリップ部をピン構造にし、スライドしやすい構造としている。

(2) 天井壁クリップの構造改善

火炉上部天井壁はメンブレン構造のために、T形鋼であるサポートバーをクリップで押さえ、つりボルトで支持しているが、自重および天井壁のたわみによるスライド不良により、クリップの変形および溶接部にき裂が発生することがある。このため、図10に示すようにT形鋼サポートバーおよびタイバーにだ円孔を設け、タイバーラグとピン構造としている。ま

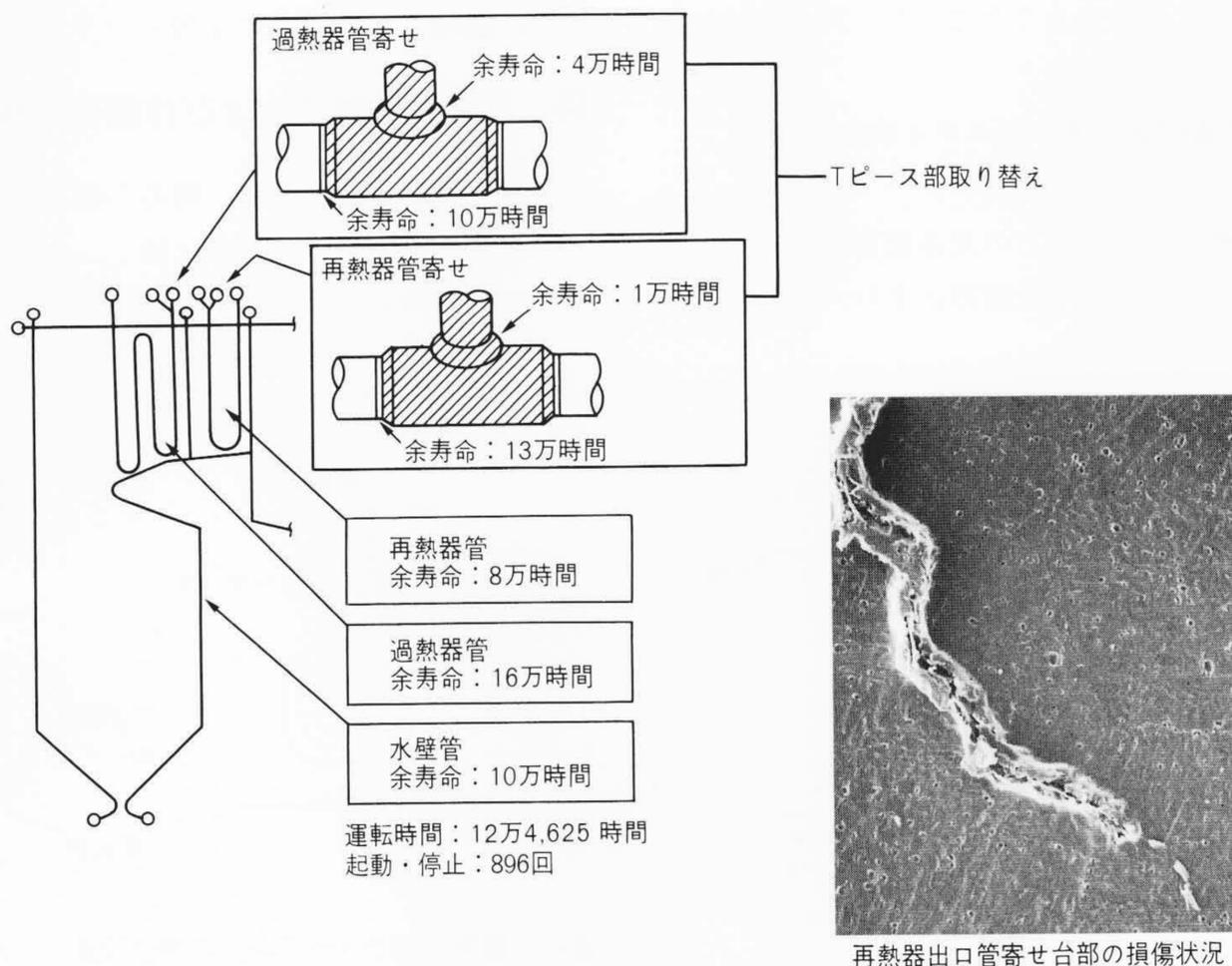


図7 ボイラ余寿命診断事例(プラントD) 管寄せTピース部でクリーブ損傷が進行しており、新替えを実施してもらった。

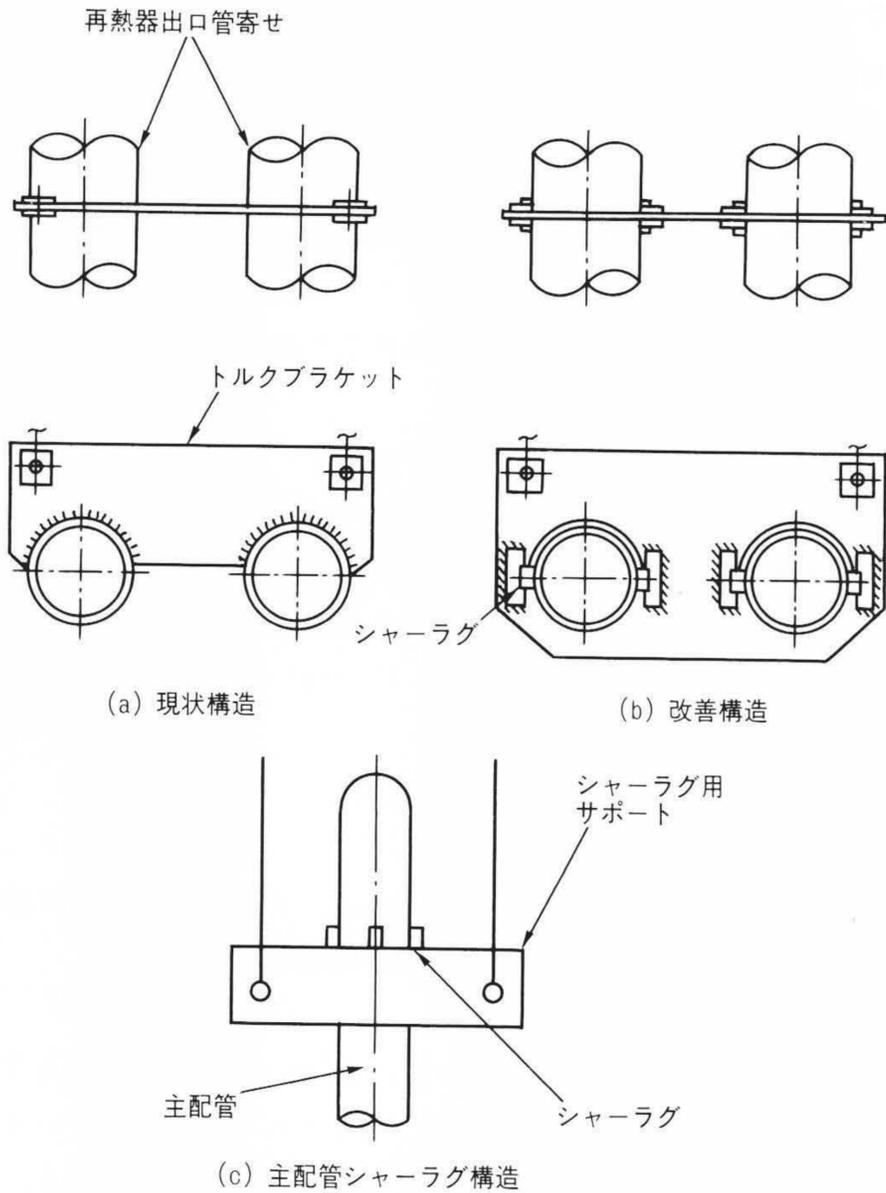


図8 大径管サポートの管取付部の応力低減改善 溶接部をできるだけ少なくし、応力低減した。

た、サポートバーおよびタイバーの両端をカットしてテンションタイをブリッジ形に改造することにより、天井壁コーナ部のフレキシブル化を図っている。

4.3 リフレッシュおよびフレキシビリティ向上例

(1) 壁貫通部チューブレグの構造改善

過熱器出口管、再熱器出口管などの天井壁貫通部チューブレグは、天井壁管と出口管寄せの温度差により、天井貫通部

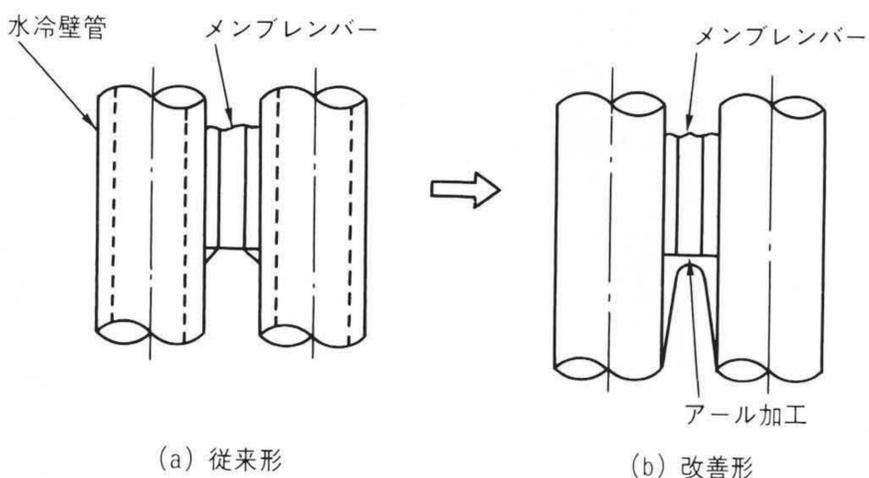


図9 メンブレンバー止端部のアール加工 応力集中の緩和のため止端部をアール加工した。

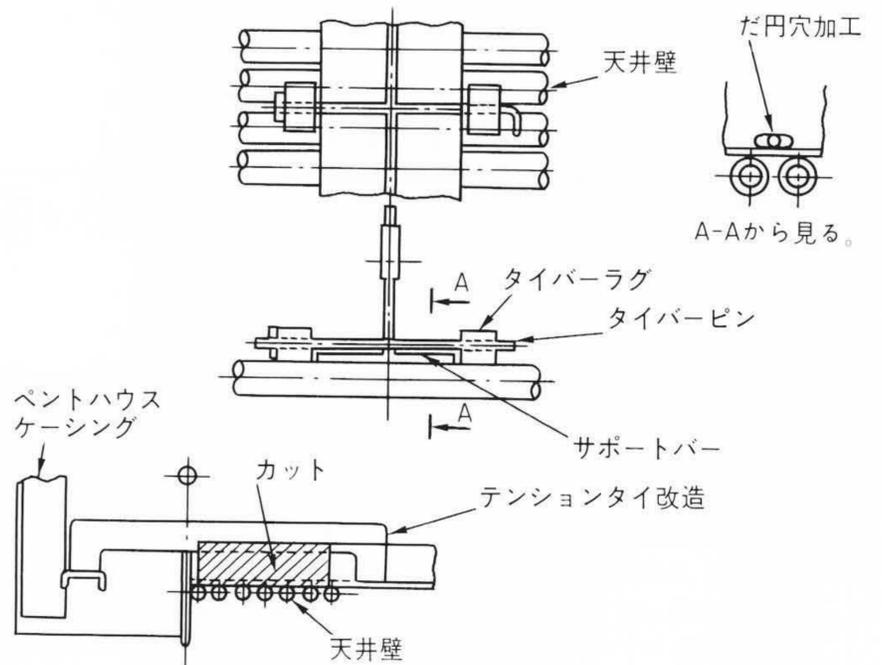


図10 天井壁クリップの構造改善 サポートバーのだ円穴、ピン構造でスライドできるようにし、テンションタイをブリッジに改造してコーナのフレキシブル化を図る。

と管寄せ溶接部の缶左右方向移動量に差(熱伸び差)が生じ、チューブレグ部は缶左右方向の曲げ変形を受けることになる。このため、図11に示すようにチューブレグをUバンド形とし、フレキシビリティを持たせ、また、チューブレグのすみ肉溶接部を肉盛りするとともにアール加工することによって、応力低減を図っている。

4.4 強度の向上例

(1) ケージ下部管寄せシールリングの構造改善

ケージ下部管寄せと節炭器ケーシングの温度差により、シールリング部に割れが発生することがある。これを防止するため、図12に示すように全周リング溶接を実施している。

5 現地調査診断および作業の合理化

現地の予防保全作業は、機器の調査診断、改修取り替えなどの工事作業がある。現場は狭く、かつ広範囲のため、測定困難な個所があり、また測定データの処理に多くのマンパワ

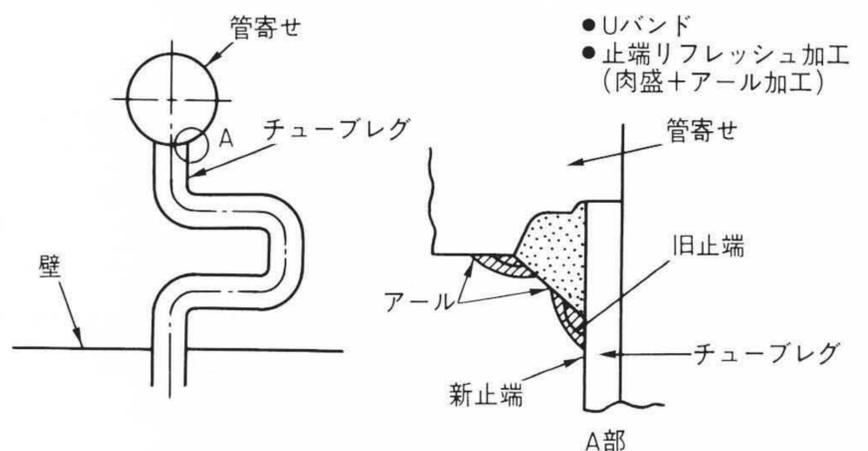


図11 壁貫通部チューブレグの構造改善 チューブレグ止端の肉盛りアール加工で集中応力の低減、Uバンド取り付けでフレキシビリティを持たせている。

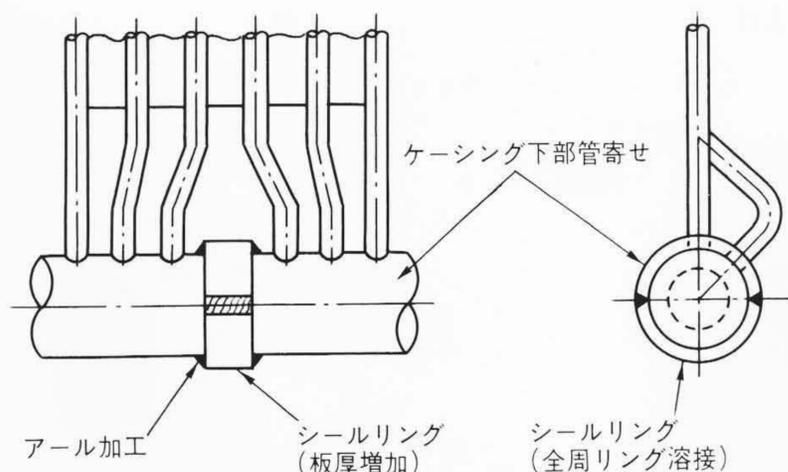


図12 ケージ下部管寄せシールリングの構造改善 分割管寄せの移動防止のため、肉厚のシールリングで管寄せの一体化を図った。

一と時間を要し、工事では品質管理の難しさと工程の長期化を伴っている。これらの作業の合理化、工程短縮を求めて、ロボットおよびデータ処理機能の開発、さらにブロックメンテナンスの拡大と機械化を図っている。以下にその具体例を述べる。

5.1 調査診断の合理化

(1) 音声入力データ処理装置

図13に示すように、測定者が測定したデータを直接音声で入力(対話形式)し、そのデータの整理、処理を自動的に行う装置であり、記録員の削除、転記ミスの除去および処理時間の大幅な短縮が可能となった。

(2) ボイラ過・再熱器管清掃検査ロボット

過・再熱器管は管ピッチが狭く、管間げきの拡大作業が難しく測定が困難であったが、図14に示すロボットの開発により、管表面の付着灰の除去が短時間にでき、非接触形測定機器の採用により、管表面の磨き作業も必要とせず、簡単に測定が可能となった。さらに測定データは処理装置と接続し、

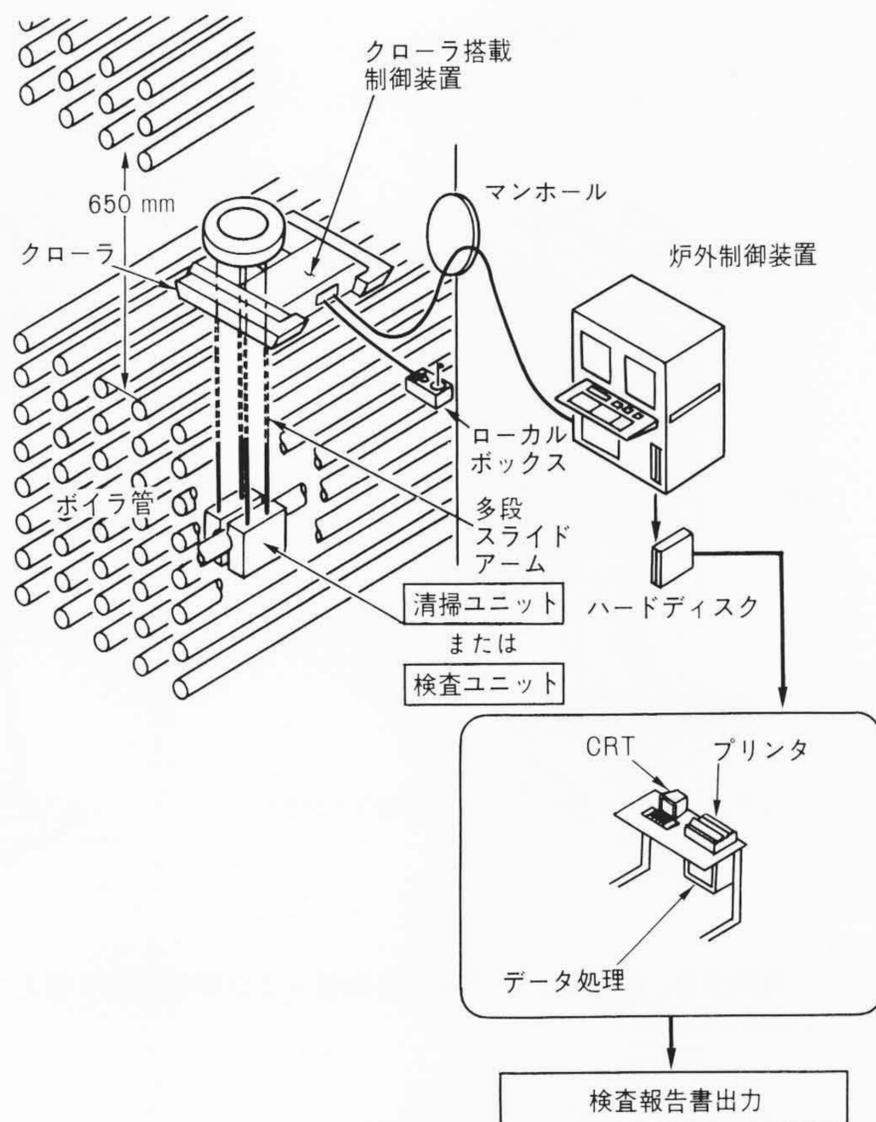


図14 ボイラ過・再熱器管清掃検査ロボット 管間げきの狭い管群内の清掃検査が可能で、さらに測定データの自動送信およびデータ処理装置付きである。

処理時間の大幅な短縮を可能とした。

5.2 現地工事作業の合理化

(1) 火炉周壁開口部フレームのブロック取り替え

火炉周壁開口部フレームは、水壁管と一体のブロックを工場で作製し、現地でブロックとして取り替える。

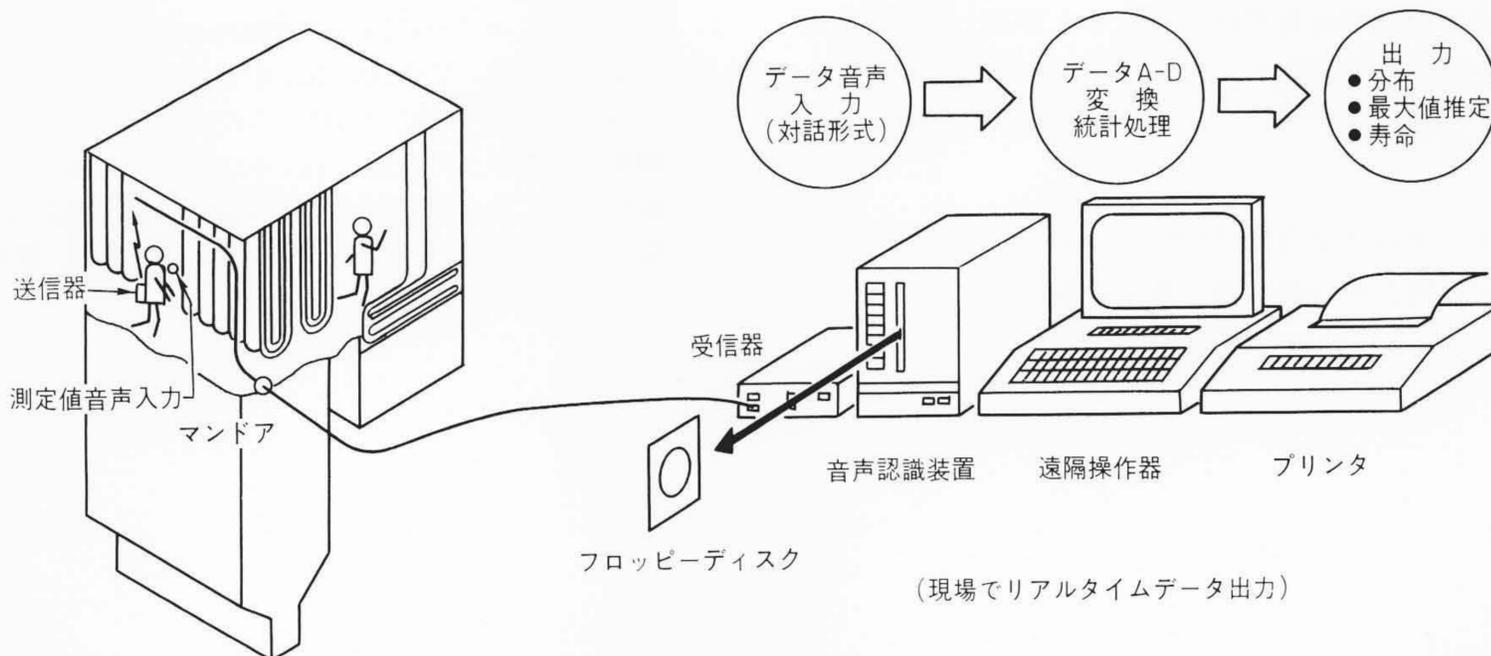


図13 音声入力データ処理装置 測定者のヘルメットに小形発信アンテナとマイクロホンを取り付け、マンホールに小形受信アンテナを設置し、測定者が測定しデータを音声で入力できる。炉内はワイヤレスとなっている。

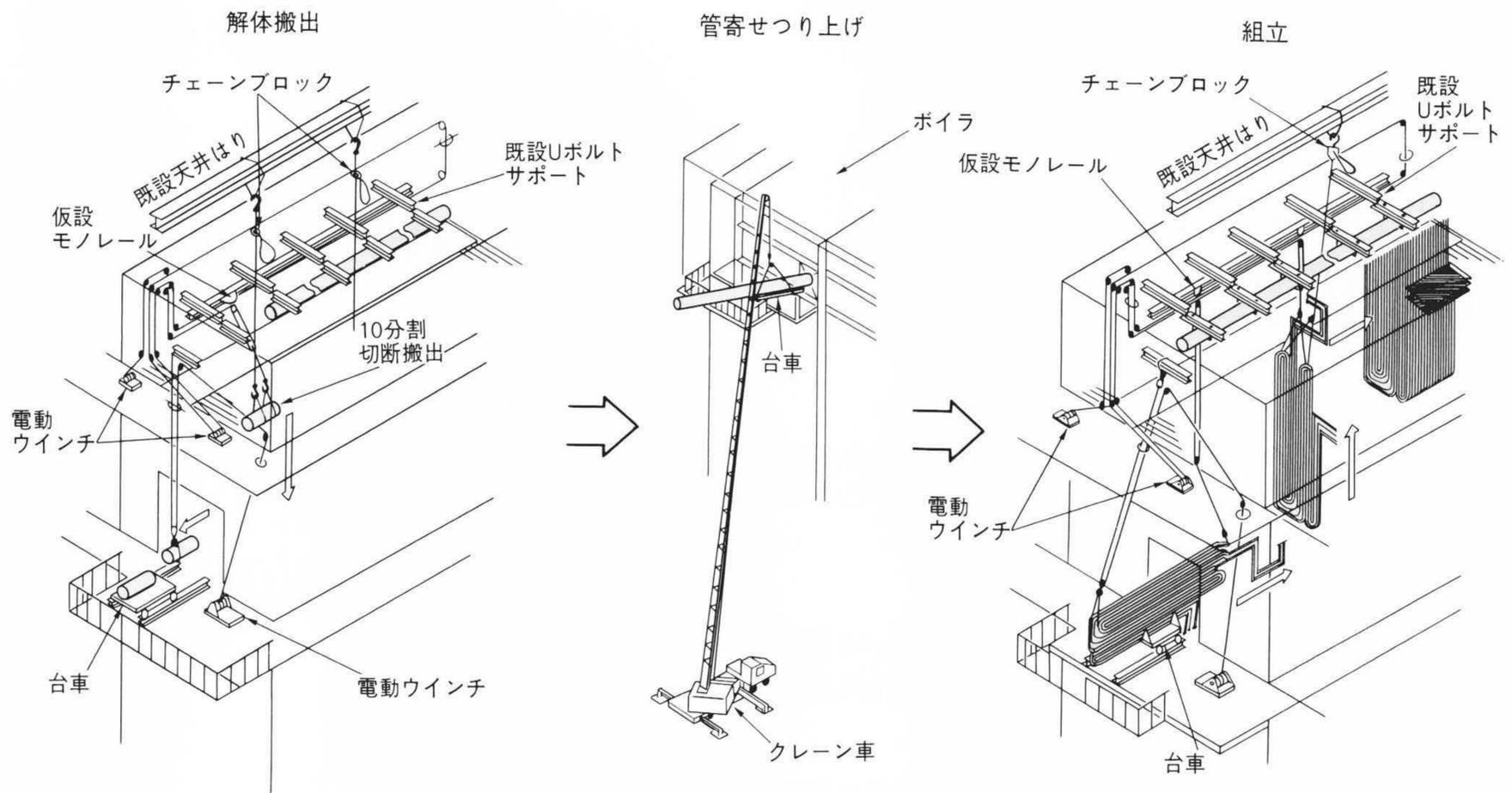


図15 重機使用，機械化による過・再熱器および管寄せ取り替え

重機の使用，機械化で過・再熱器および管寄せの解体搬出，つり上げおよび組立要領を示す。

(2) 壁貫通部チューブプレグのフレキシブル化ブロック取り替え

フレキシビリティを持つUバンド取り付け，スタップのすみ肉溶接部の肉盛りとアール加工は狭い場所の作業のため，これらを管寄せと一体に工場製作し，次に示す重機の使用・機械化と合わせて，ブロックで解体取り替えを行う。

(3) 重機使用・機械化による過・再熱器および管寄せの取り替え

過・再熱器および管寄せを従来どおり工場製作し，図15に示すように，重機の使用・機械化によって過・再熱器および管寄せの解体ならびに組立を一貫作業で実施できる。以上，いずれの場合も現地の品質管理の難しさを解消し，現地工事に要するマンパワーの低減と工程短縮を図ったものである。

6 結 言

ボイラ設備の予防保全技術について，余寿命診断技術とその適用例，耐力向上への具体策，さらに現地作業でのマンパ

ワーの低減および工程短縮の具体例を中心に述べた。これら予防保全技術の適用により，長期安定運用，信頼性向上へ寄与することを期するとともに，今後とも予防保全技術を充実させ，新たなニーズにこたえていく考えである。

終わりに，本稿の作成に際しご指導，ご協力いただいた電力会社の各位に対し感謝する次第である。

参考文献

- 1) The Life of Metal Under Stress : EPRI Journal (June-1984)
- 2) 日本鉄鋼協会 高温強度研究会 クリープ強度外挿法分科会 : ISO 6303に準拠したクリープ破断データ外挿法の手引 : 第1版 (昭58-7)
- 3) 坂口, 外 : ボイラ材料の非破壊的余寿命診断技術の開発, 火力原子力発電, Vol.39, No.6 (1988-6)
- 4) 石崎, 外 : 経年劣化火力ボイラの非破壊的余寿命診断技術の開発, 火力原子力発電, Vol.40, No.5 (1989-5)
- 5) 桜井, 外 : 経年劣化Cr-Mo-V 鋼平滑材における微小き裂の発生と成長挙動, 日本機械学会論文集 (A編), 第487号 (1987-3)