

# ボイラ熱応力監視装置

## Thermal Stress Monitoring and Life Management System for Utility-Use Boiler

宮垣久典\* Hisanori Miyagaki  
程塚国男\*\* Kunio Hodozuka

火力発電所ボイラの耐圧部は、プラントの高効率化をねらいとした蒸気条件の高温高压化に伴い、厚肉化する傾向にある。一方、火力プラントは、近年の原子力発電比率の増大を背景に、深夜起動停止と大幅かつ急速な負荷変動を伴う中間負荷運用へ移行しつつある。その結果、特に大幅な温度変化を伴う内部流体と高温高压蒸気にさらされる厚肉耐圧部については、信頼性確保の観点から、熱応力による疲労損傷とクリープによるクリープ損傷を総合した寿命管理が不可欠となってきた。

上記の要求にこたえるものとして、制御用マイクロコンピュータHIDIC 08-Lを適用したボイラ熱応力監視装置を開発した。本装置は、ボイラ耐圧部の内部流体温度やメタル温度などのプロセス情報をもとに、熱応力や寿命消費量をオンラインで監視するものである。今回、一連のオフライン精度検証及び模擬試験装置との組合せ試験の結果、本装置の実用化への見通しを得たので、その技術内容と試験結果について報告する。

### 1 緒言

省資源、省エネルギーの観点から、プラント発電効率の向上を目指し、火力発電所ボイラの蒸気条件は高温高压化の傾向にあり、その耐圧部には、耐熱材の採用と厚肉構造が不可欠となってきた<sup>1)</sup>。一方、原子力発電比率の増大と昼夜の電力需要の大幅格差によって、火力発電プラントは深夜起動停止と大幅かつ急速な負荷変動を伴う中間負荷運用への転換を余儀なくされつつある。

中間負荷運用では、特にプラント起動停止時に、タービンロータ及びボイラ厚肉部には接触流体の温度変化により大きな熱応力が発生し、その疲労寿命消費が顕著となる。この寿命消費を許容値以下に抑制するには、熱応力の常時監視が不可欠である。タービンについては、ロータ熱応力予測機能が既にタービン自動制御システム“HITASS”の中に組み込まれ、実用化されているが<sup>2)~4)</sup>、ボイラについては汎用的な手法は確立されていない。更に、ボイラでは上記疲労損傷の外に、高温耐圧部で定常運転中に生ずるクリープによる損傷が大きく、その監視が寿命管理上重要である。

以上のニーズを実現するものとして、マイクロコンピュータを用いたボイラ熱応力監視装置を開発し、その性能及び機能の確認試験を実施した。ここでは、その技術内容の特徴点を中心に述べ、合わせて試験結果について紹介する。

### 2 応力及び寿命消費の評価法

図1に、応力と寿命消費の関係及びそれらの評価手順を示す。ボイラ厚肉耐圧部では、内部流体の温度又は流量が変化すると板厚方向メタル内外面に温度こう配を生じ、このため熱応力が発生する。一方、内部流体の圧力に起因する内圧応力も圧力の上昇に伴い発生する。寿命消費はこの両者を加えた合計応力に基づいて評価する必要がある。プラント起動停止時の低温域では、メタル内外面の温度差による熱応力が支配的で、これによる疲労損傷が生ずるが、定常運転時の高温域では、特に高温にさらされる部品については、クリ

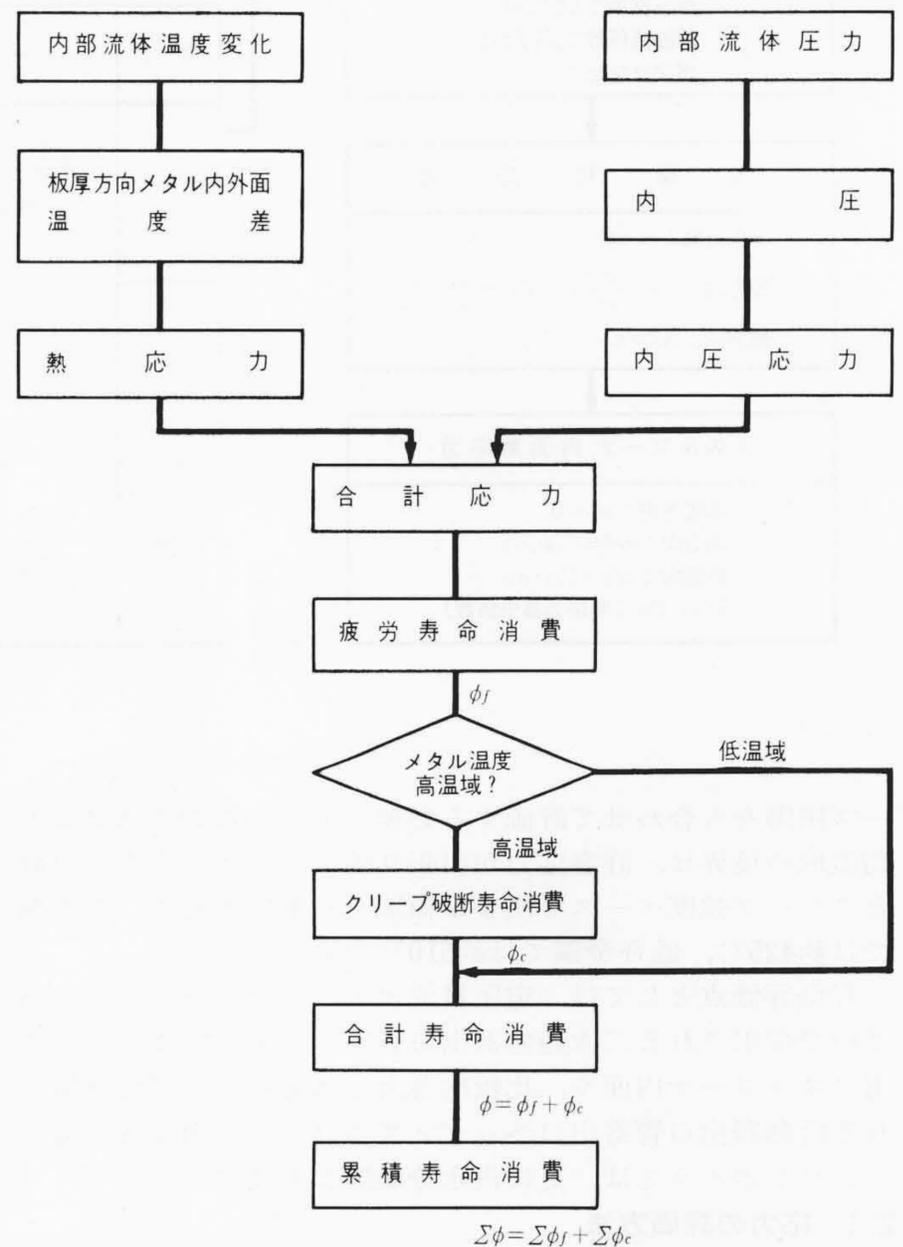
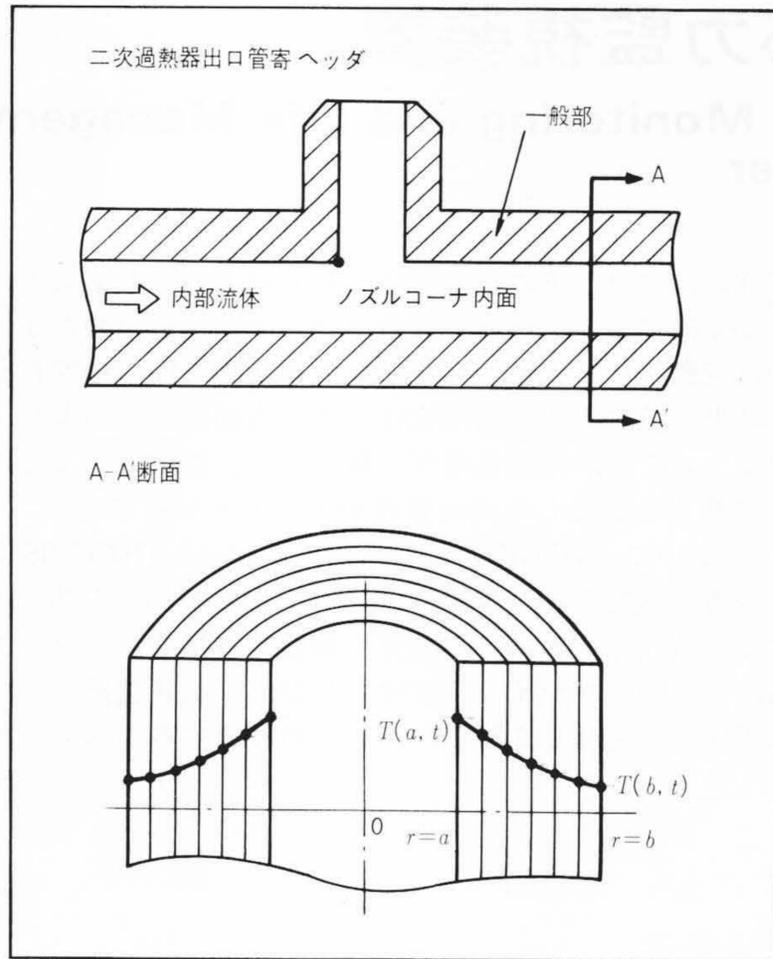
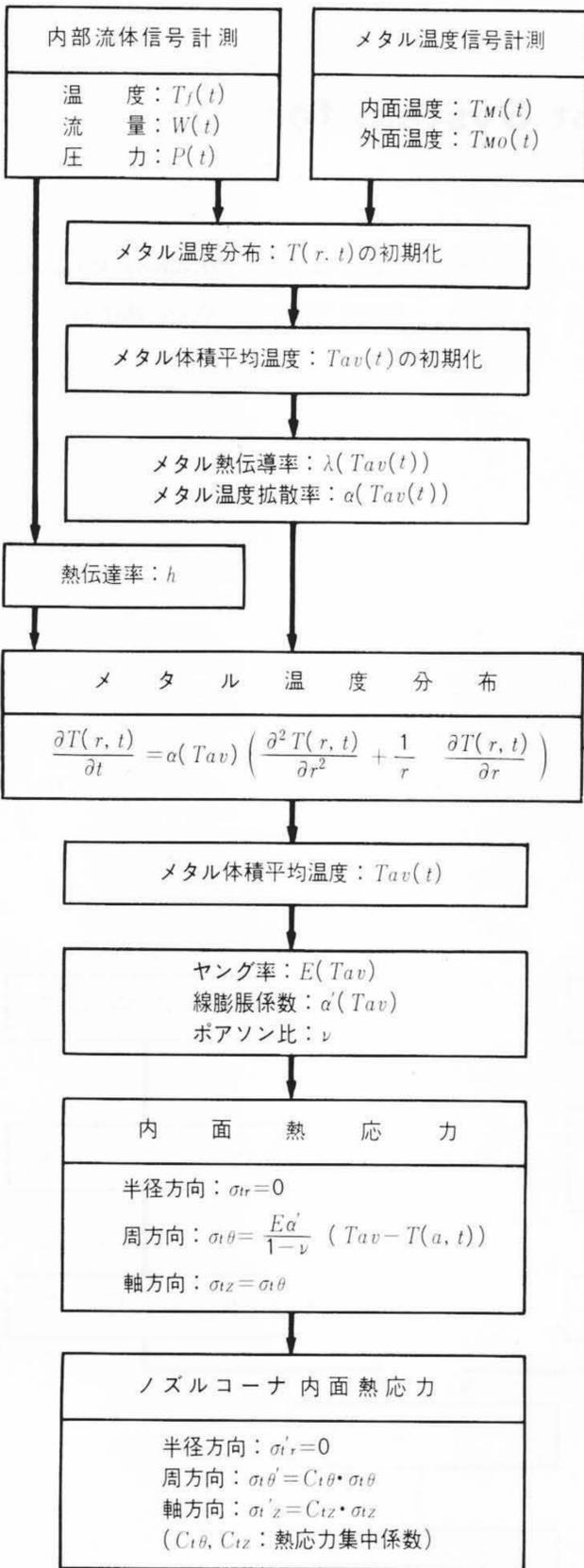


図1 応力及び寿命評価手順 ボイラ耐圧部には、内部流体の温度変化によって生ずる熱応力と、内圧による内圧応力とを合計した合計応力が働き、低温域では疲労寿命消費、高温域では更にクリープ破断寿命消費を合わせたもので評価する必要がある。

\* 日立製作所大みか工場 \*\* バブコック日立株式会社呉工場



| モード | 境界条件  |  |
|-----|---|--|
|     | 内面 (r=a)  | 外面 (r=b)   |
| I   | $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big _{r=a} = h[T_f(t) - T(a,t)]$ | $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big _{r=b} = 0$<br>(断熱条件) |
| II  | $(T_f(t) : \text{内部流体温度計測値})$   | $T(b,t) = T_{Mo}(t)$<br>$(T_{Mo}(t) : \text{メタル外面温度計測値})$          |
| III | $T(a,t) = T_{Mi}(t)$<br>$(T_{Mi}(t) : \text{メタル内面温度計測値})$                 | 同上   |

図2 熱応力計算手法  
計算の高速化を図るため、管寄ヘッダの一般部を無限中空円筒でモデル化し、境界条件を3種の中から選んで、2次元非定常熱伝導方程式を解き、一般部の熱応力を計算して、これに応力集中係数を乗じてノズルコーナ内面熱応力を推定する。

ープ損傷をも合わせて評価する必要がある。ここで低温域と高温域の境界は、許容応力が引張り強さベースで決まる領域とクリープ強度ベースで決まる領域を基準に考える。炭素鋼では約425℃、低合金鋼では約510℃である。

寿命評価点としては、定圧貫流ボイラでは、厚肉でかつ高温中で使用される二次過熱器出口管寄ヘッダの特に主蒸気管用ノズルコーナ内面や、比較的薄肉ではあるが高温で使用される再熱器出口管寄出口ヘッダノズルコーナ内面など、変圧ベンソンボイラでは、更に汽水分離器が重要である。

### 2.1 応力の評価方法

図2に応力上厳しい条件におかれた二次過熱器管寄出口ヘッダのノズルコーナ内面を対象として熱応力の計算手法を示す。この手法の特徴は、計算を単純化して高速化を図るため、次のような方法をとっている点にある。すなわち、管寄ヘッダの一般部を無限中空円筒と見なし、その理論モデルに基づく2次元非定常熱伝導方程式を基本として、数値計算によりメタル温度分布を求める。そして、一般部の内面熱応力を上

記メタル温度分布計算の結果を用いて応力とひずみの関係式から求め、ノズルコーナ内面の熱応力は、これに応力集中係数を乗じて求める。メタル温度分布計算では、メタル内外面の境界条件として、監視箇所への温度検出器の取付の可否、運転フェーズに適した方式選択の融通性を考慮し、同図に示すような三つのモードを設けた。モードIの熱伝達率計算に必要な内部流体検出器信号は、通常ボイラ制御装置などのものを流用できるので、モードIが温度検出点が少なくても済み有利であるが計算精度ではモードIIIが優れている。

なお、実際の温度分布計算では、メタル板厚方向を図2に示すように同心円状に等分割し、熱伝導方程式と境界条件式を、収束性と安定性に優れたCrank-Nicolsonの陰解法<sup>5)</sup>を用いて差分化し、各分割点の温度を求める。

内圧応力は、高温用円筒形圧力容器の内圧応力設計公式の一つである平均径公式に基づいて、まず内部流体圧力から一般部の内圧応力を求め、それに内圧応力集中係数を乗じてノズルコーナ内面の値とする。

2.2 寿命の評価方法

図3は、起動から停止まで1サイクルの疲労寿命消費の計算方法を示す。疲労損傷は、互いに直角な半径方向、周方向、軸方向の各合計応力の異なる2成分間の差で定義される主応力差の変動幅(応力振幅)によって決まる。疲労寿命消費は、あらかじめ強度試験によって作成した設計疲労線図から、各応力振幅に対応した破断までの繰返し回数を求め、Minerの直線被害側から、各繰返し回数の逆数の累積和として求める。

次に、図4のフローの中で示した関係式で表わされる相当応力は起動過程で圧縮方向に大きく変動したのち、内圧応力の影響によって引張り方向に転じ、ピーク値に達した後その後応力緩和により、時間経過とともに徐々に減少する。クリープ損傷は、応力がメタル高温域で保持されることによって生じ、評価の要点は、ピーク応力と応力緩和を正確に評価することである。応力緩和については、ピーク値が決まれば、応力緩和曲線から求めることができ、緩和過程の応力に対するクリープ破断時間をクリープ破断強度曲線から求めることによりクリープ破断寿命消費を時々刻々計算できる。ピーク応力の計算方法は本方式の特徴とするところで、これについてその概念を説明する。上述のように、起動時にはメタル内面の相当応力は圧縮方向に働くが、それが圧縮側降伏点を超えなければ熱応力がなくなるとひずみは元に戻るが、同図に示すように降伏点を超えると相当応力が引張り方向に転じてピーク値に達したときにその影響が残留応力として残り、ピーク応力はこれと定格状態での応力の和となる。このようにピーク値は、初期応力と圧縮方向の相当応力の大きさによって決まるため、本方式では、メタル温度をパラメータとした応力-ひずみ曲線をもとに、初期応力と圧縮方向の応力の大きさからどのような起動パターンに対しても、ピーク応力値を

計算できるようなアルゴリズムを考案した。この方式によってあらゆる運転パターンに対し、クリープ破断寿命消費を精度よく計算することができる。

3 システム構成と機能

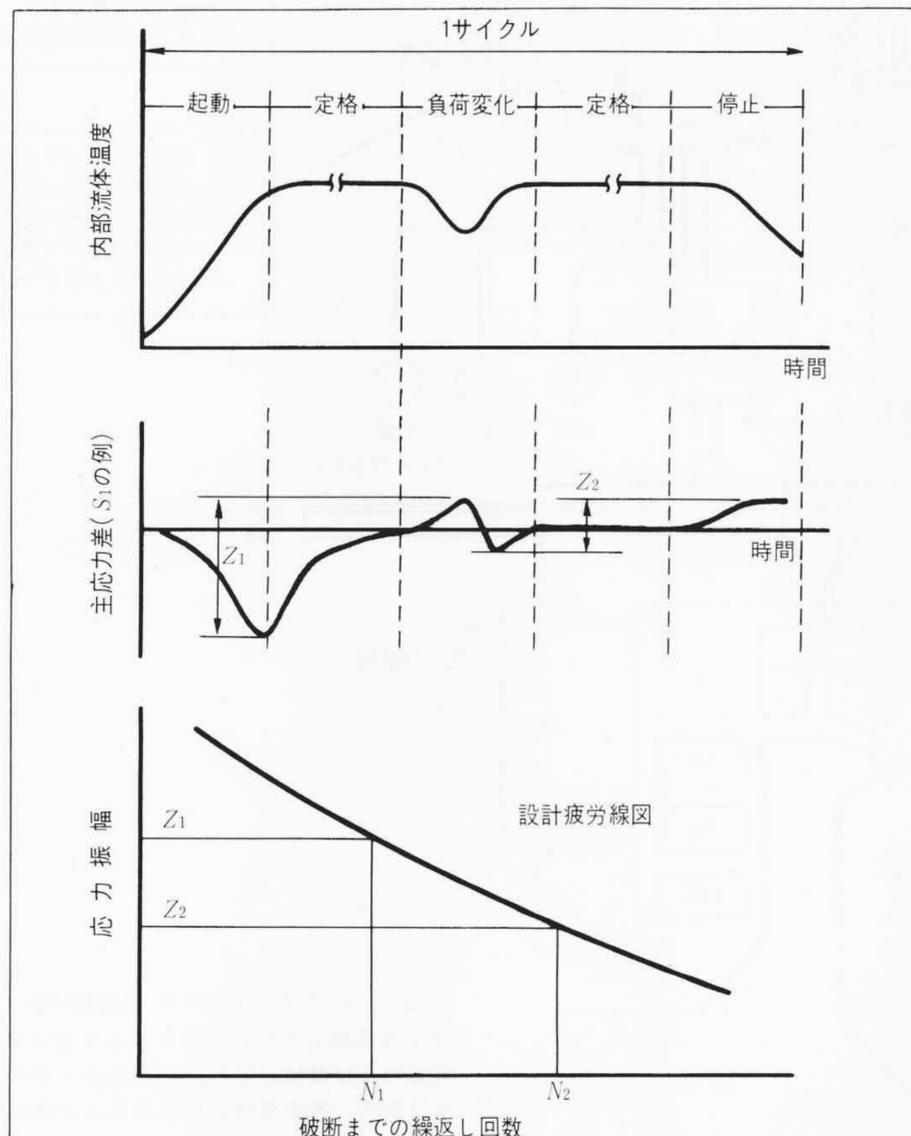
図5に本装置のシステム構成と主な機能を、図6に監視装置本体とプロセスカラーディスプレイの外観を示す。

監視装置は、制御用マイクロコンピュータHIDIC 08-Lを内蔵し、監視点メタル温度及び内部流体のプロセス入力信号を用いてボイラ耐圧部の熱応力、内圧応力及び合計応力並びに疲労寿命消費、クリープ破断寿命消費及び合計寿命消費を所定周期で演算し、1サイクル当たり、負荷変化及び累積の寿命消費を計算する。そして、熱応力やメタル温度が規定値を超えたときには、キャビネット前面扉の表示器に警報項目を表示する。

分散形プロセス入出力装置は、現場に設置し、上述熱応力計算に必要な監視点メタル温度や缶壁温度信号の入力処理を行ない、これらのデータを直列信号伝送方式でHIDIC 08-Lに伝送する。

プロセスカラーディスプレイは、監視装置で計算した熱応力、寿命消費、熱応力警報情報などをキーボードからのファンクションキー操作によって、トレンドグラフ(1画面に500分間のデータを2分刻みで表示)、棒グラフ、データリストなどの分かりやすい形式で実時間表示する。このうちリスト情報は、ファンクションキー操作によりタイピュータに印字し保存できる。

以上のほか、トレンド表示データや上記累積データをフロッピーディスクに保存することができる。



注：記号説明  
 $\sigma_r$ (半径方向メタル内面合計応力)  
 $\sigma_\theta$ (周方向メタル内面合計応力)  
 $\sigma_z$ (軸方向メタル内面合計応力)

図3 疲労寿命消費の評価方法  
 主応力差の応力振幅に基づいて、設計疲労線図から破断までの繰返し回数を求め、線形累積損傷則によって、疲労寿命消費を計算する。

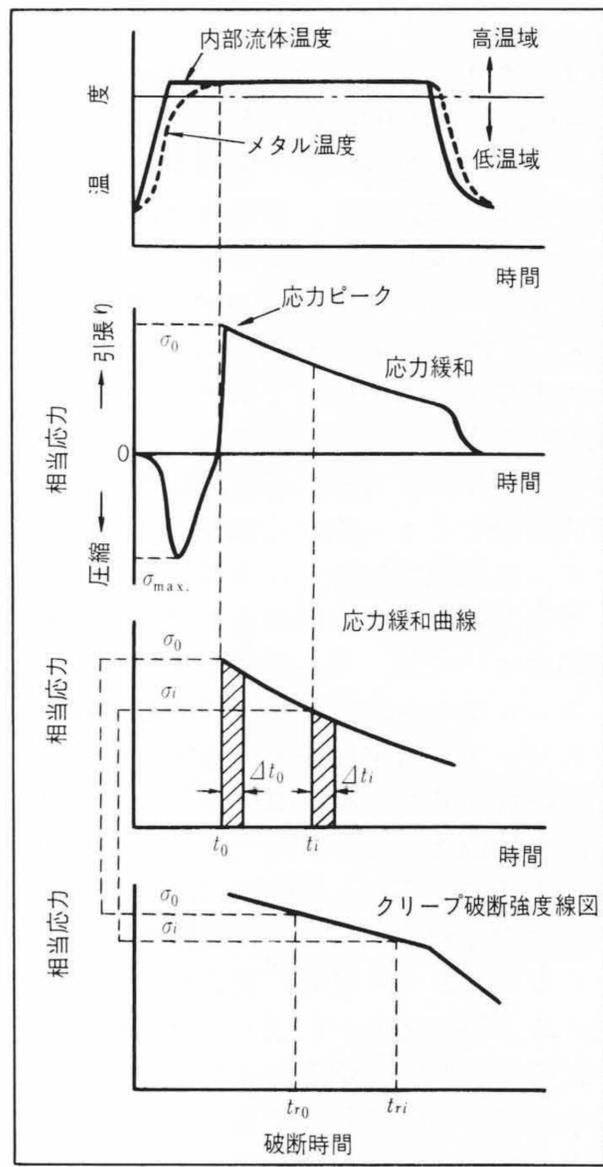
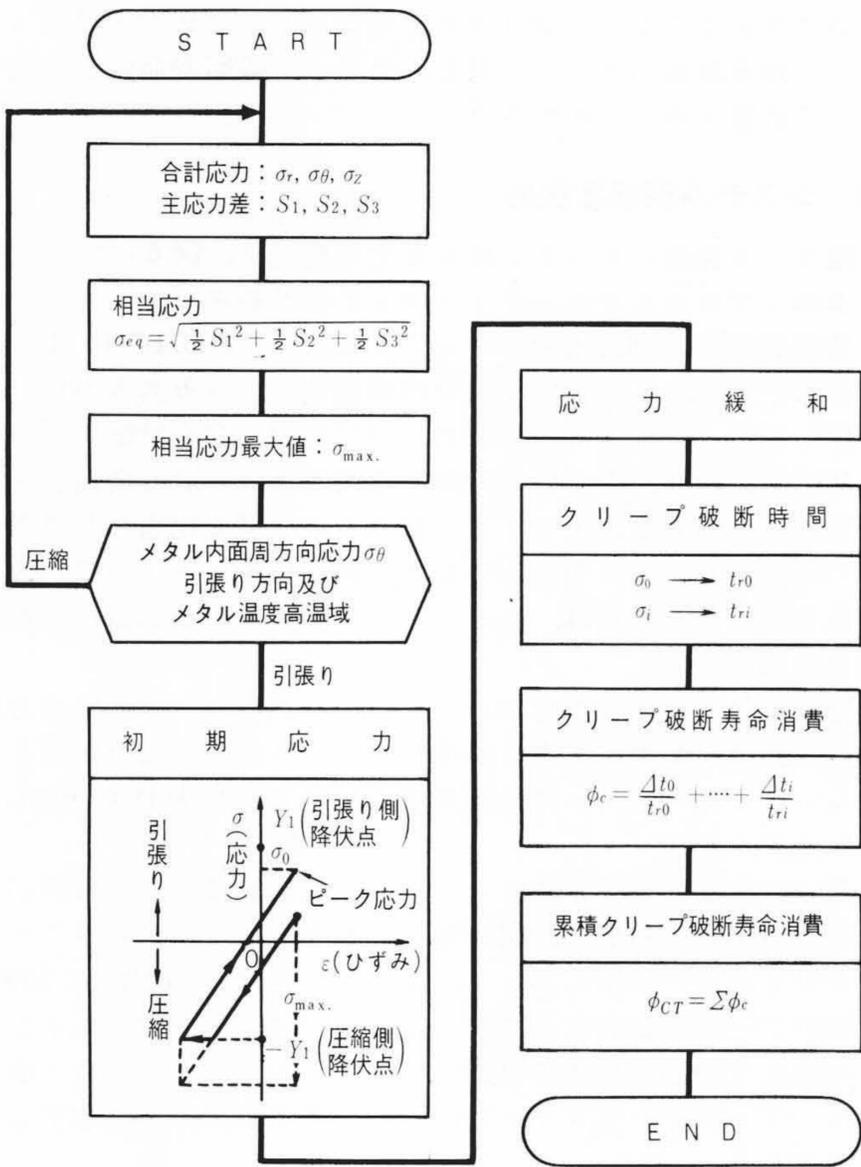
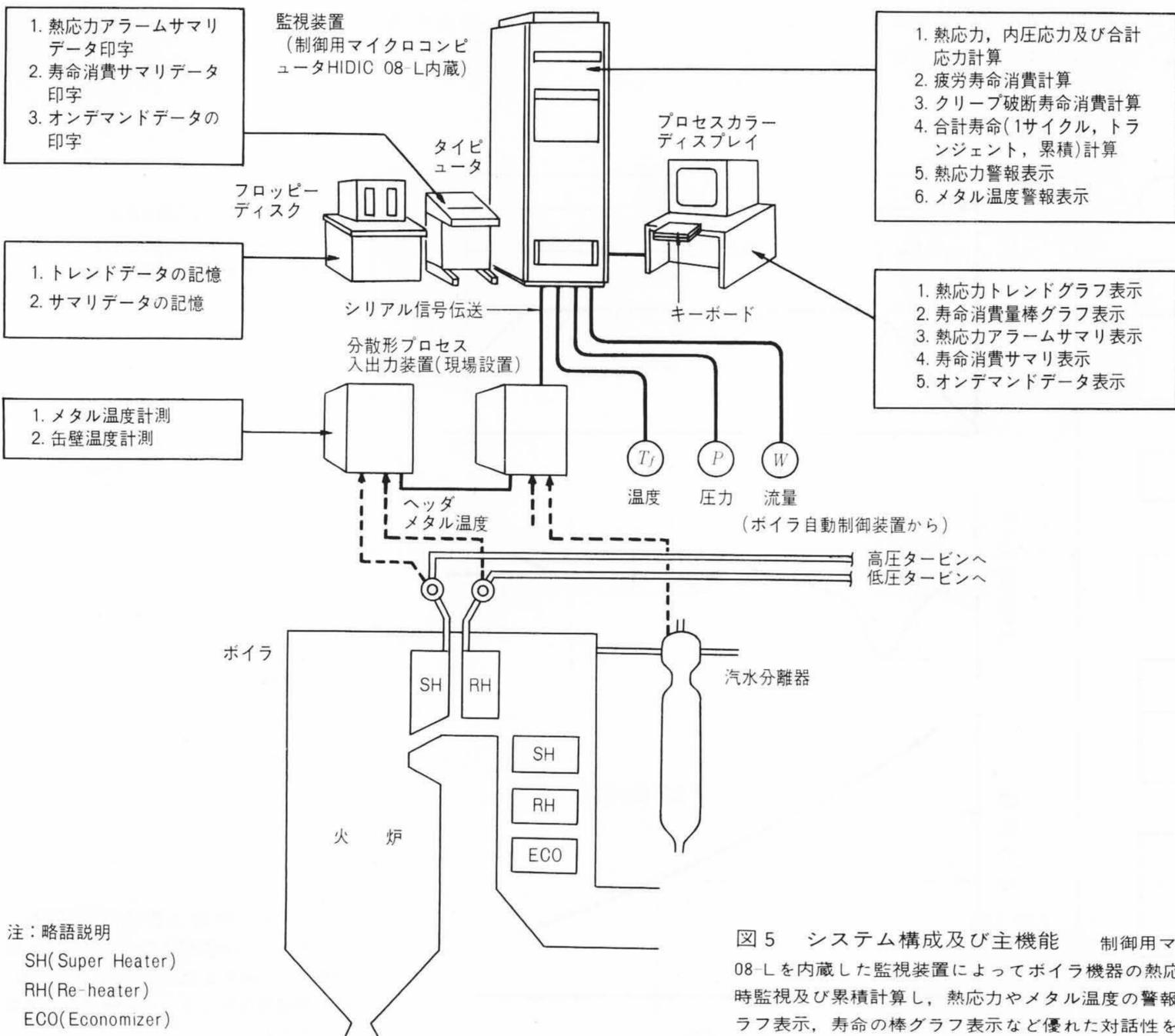


図4 クリープ破断寿命消費の評価方法  
 メタル内面相当応力が引張り方向から圧縮方向に転じ、メタル温度が高温域の条件を満たした後、圧縮方向での最大値を基に応力-ひずみ線図からピーク値を求め、応力緩和曲線とクリープ破断強度曲線から、クリープ破断寿命消費を求める。



注：略語説明  
 SH(Super Heater)  
 RH(Re-heater)  
 ECO(Economizer)

図5 システム構成及び主機能  
 制御用マイクロコンピュータHIDIC 08-Lを内蔵した監視装置によってボイラ機器の熱応力、寿命消費をそれぞれ常時監視及び累積計算し、熱応力やメタル温度の警報表示、熱応力のトレンドグラフ表示、寿命の棒グラフ表示など優れた対話性をもっている。

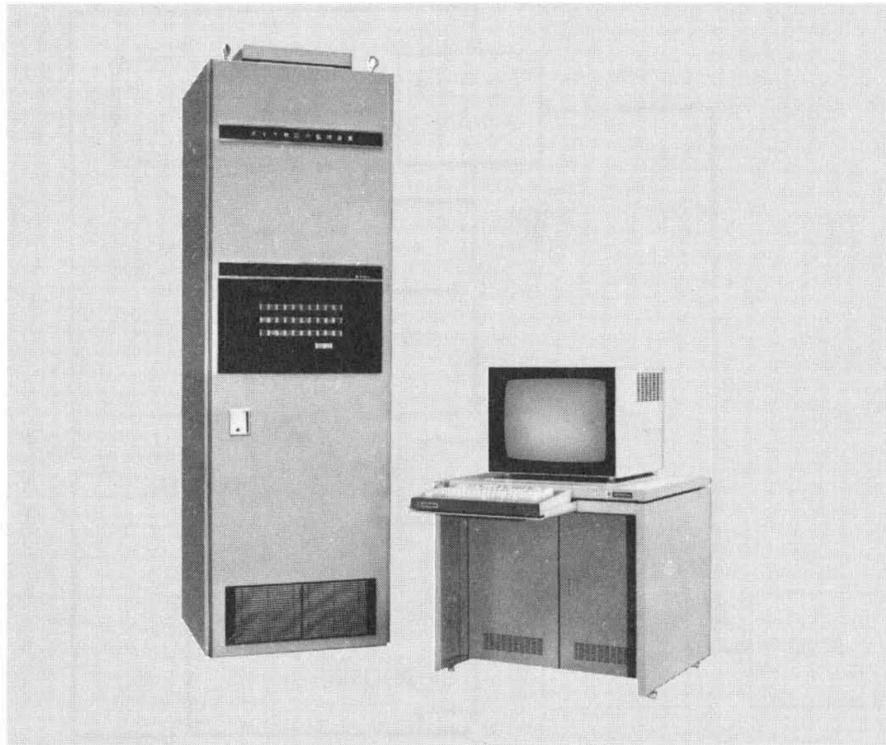


図6 ボイラ熱応力装置の外観 熱応力と寿命消費計算を行なう監視装置と、その結果を表示するプロセスカラーディスプレイを示す。監視装置前扉の警報表示ランプに熱応力大、メタル過度高などの警報表示を行なう。プロセスカラーディスプレイには、キーボードからの要求で画面上に熱応力トレンド表示など、ファンクションに応じたカラー表示をする。

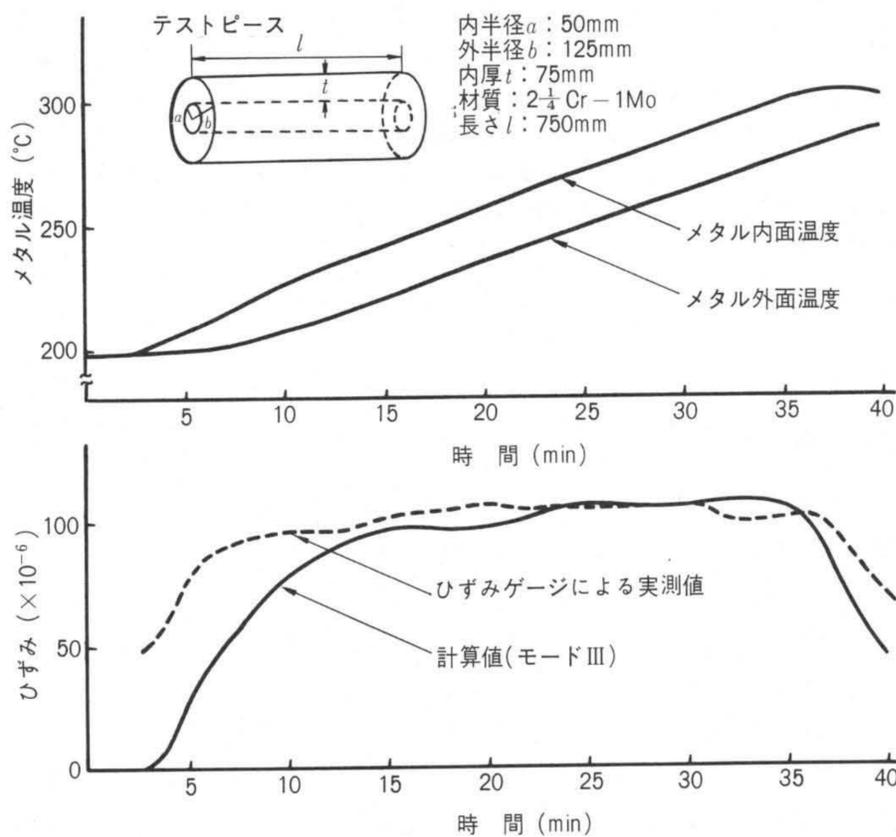


図7 組合せ試験による熱応力計算結果 外半径125mm、内半径50mm、厚さ75mmのテストピースの内面を電気ヒータで加熱して熱応力を発生させ、そのときの外面周方向のひずみ計算値(モードIII)を高温ひずみゲージによる実測結果と比較したもので、メタル内外面の温度差が一定している範囲ではよく一致していることが分かる。テストピースの材質は2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Moである。

#### 4 実証試験結果

図7は、熱応力計算手法の妥当性を検討するため、テストピースを用いて行なった組合せ試験の結果を示すものである。テストピースは、内半径50mm、外半径125mm、肉厚75mm、長さ750mmの中空円筒形で、材質が2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Moのものを使用した。試験では、その中空部を内面から電気ヒータで加熱し、板厚方向に温度こう配を生じさせて熱応力を発生させた。そしてテストピースの内面と外面にはメタル温度測定用の熱電対、外面に高温ひずみゲージをそれぞれ取り付け、高温ひずみゲージによるひずみ計測値を真値とし、これとメタル温度

計測による計算手法(モードIII)で計算した熱応力ひずみとを比較した。同図からメタル内外面の温度差が一定している範囲ではよく一致していることが分かる。

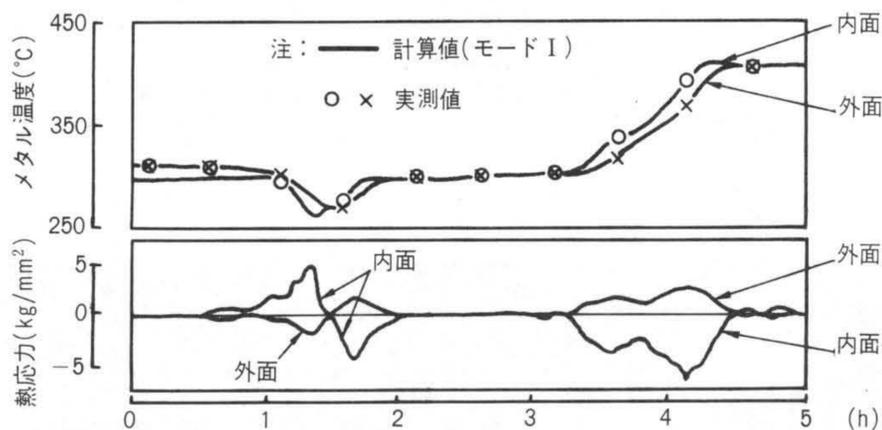
図8は熱応力計算手法の特にメタル温度分布計算手法の検証のため、600MWの変圧ベンソンプラントの汽水分離器を対象とし、実機でのメタル温度実測結果と、実機で収集した内部流体のプロセス入力データを用いて、流体温度を計測する計算手法(モードI)によるシミュレーション計算で求めた結果を示したものである。内面及び外面ともメタル温度計算値は実測値とよく一致していることが分かる。

次に図9、10及び11は、ファンクションキー操作によって、計算結果をカラープロセスディスプレイに表示させたものである。いずれの場合も実用上満足すべき表示応答時間が得られた。図9は、実プラントのデータに基づくシミュレーション計算の結果について、その熱応力と関連データをトレンドグラフ機能によって表示させたものである。図10は、監視点ごとの累積寿命消費及びその疲労寿命消費量とクリープ破断寿命消費量の比率とを棒グラフ表示機能によって表示させたものである。図11は、熱応力計算値がアラーム設定値を超えたときに、その値と関連データをリスト表示させた結果である。演算実行周期については、監視点が3箇所の場合、1分以下にできる見通しが得られた。

#### 5 制御への応用

図12に、今回確立した熱応力計算手法を主蒸気温度予測適応制御<sup>6),7)</sup>に応用した例を示す。

プロセス入力信号に基づいて将来の主蒸気温度を予測し、これからその時点での熱応力を求め、それが許容値以下でかつ両者の偏差が最小になるように主蒸気温度設定値を最適な値に設定するもので、寿命消費を有効に活用して、許される最大の昇温率で主蒸気温度が制御でき、信頼性を確保しかつ機動性も損なわない起動制御が期待できる。



対象：600MW変圧ベンソンボイラ汽水分離器

汽水分離器の仕様

| 項 | 目 | 仕 | 様 |
|---|---|---|---|
| 最 | 高 | 使 | 用 |
| 設 | 計 | 温 | 度 |
| 胴 | 内 | 径 |   |
| 胴 | 板 | 厚 |   |
| 胴 | 材 | 質 |   |
|   |   |   |   |

図8 シミュレーション結果と実機データとの比較 600MW変圧ベンソンプラントの汽水分離器のメタル温度実測結果と、モードIの計算方式によって、実機データをもとにメタル温度と熱応力をシミュレーションにより計算した結果を示す。メタル内外面の温度は実測値とよく一致していることが分かる。

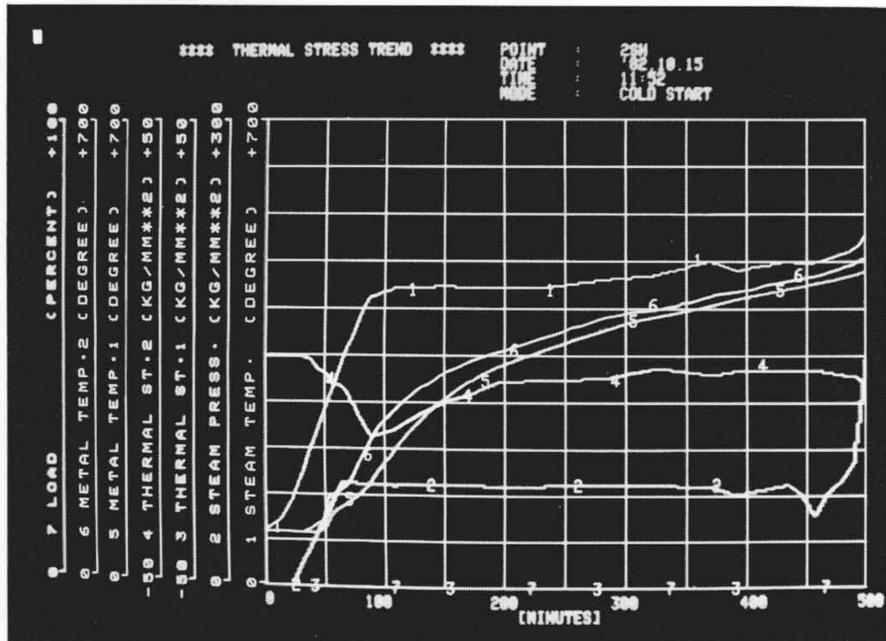


図9 熱応力トレンドグラフ表示結果 実プラントデータに基づくシミュレーション結果をプロセスカラーディスプレイにトレンドグラフ機能で表示させたものである。これによって、熱応力が実時間で連続的に監視でき迅速かつきめ細かな寿命管理が行なえる。

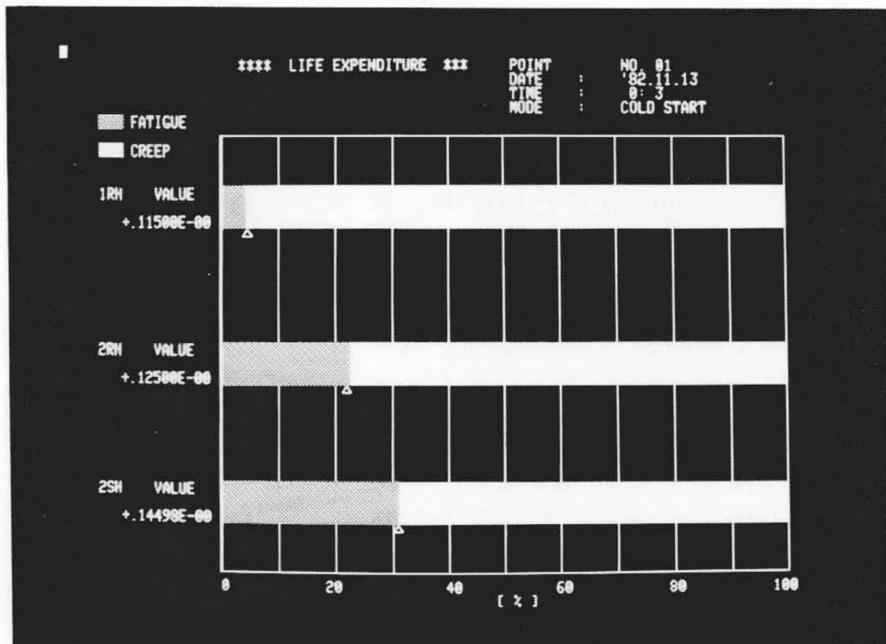


図10 寿命消費棒グラフ表示結果 監視箇所ごとの累積寿命消費量を、疲労寿命消費量とクリープ破断寿命消費の比率の形でプロセスカラーディスプレイに棒グラフ表示することができ、寿命消費を一目で把握できる。



図11 熱応力アラームサマリ表示 熱応力計算値がアラーム設定値を超えたとき、熱応力値と関連データをプロセスカラーディスプレイにリスト表示し、アラームの原因を追求することができる。

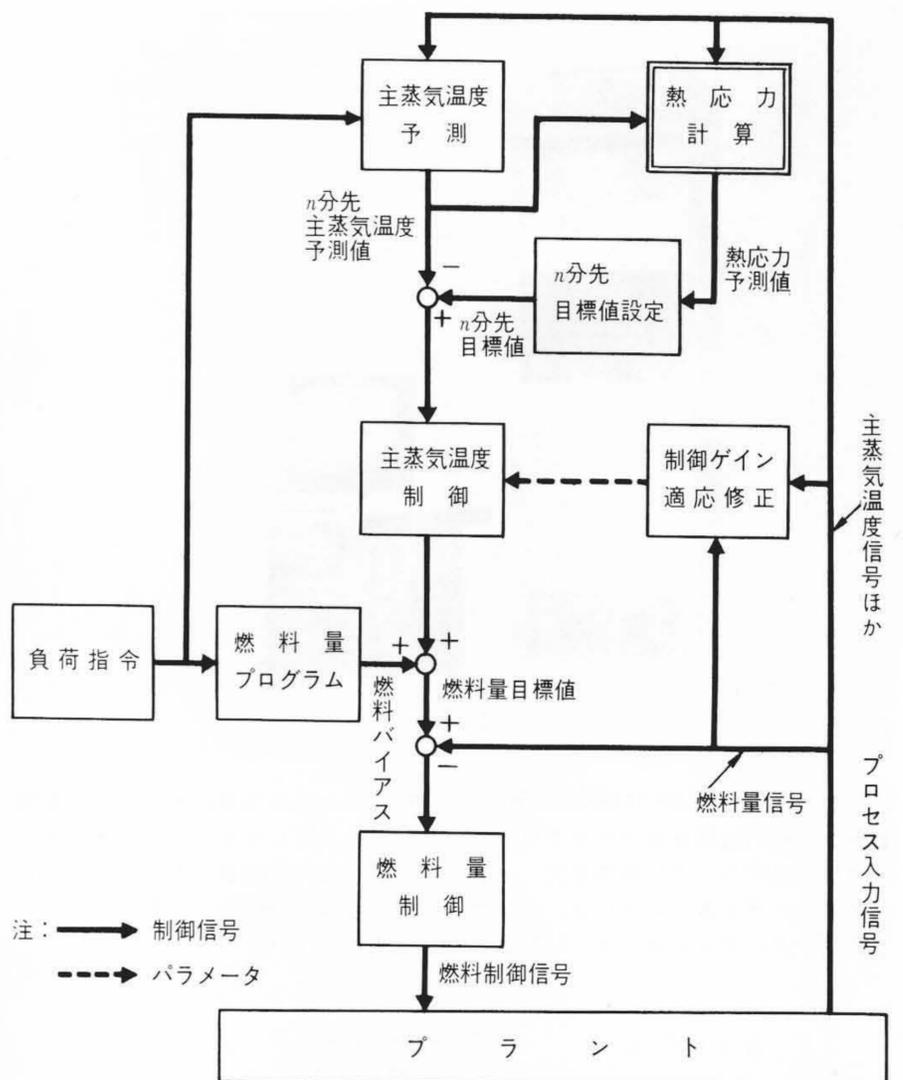


図12 熱応力計算の主蒸気温度予測適応制御への応用例 主蒸気温度予測値から計算した熱応力の値が許容値以下で、かつ両者の偏差が最小になるように主蒸気温度設定値を最適設定することによって、寿命消費上許される最大の昇温率で主蒸気温度が制御できる。これによって、高信頼かつ迅速な起動制御が期待できる。

6 結 言

制御用マイクロコンピュータを適用したボイラ熱応力監視装置の技術内容と、その性能及び機能試験の結果について述べた。今回の検証試験の結果、本装置の実用性を確認することができ、火力プラント中間負荷運用の信頼性向上に十分寄与できるとの確信が得られた。

今後は、実プラントでの実機データを蓄積し、監視装置として、より実用性を高めるよう努力するとともに、今回確立した技術の主蒸気温度予測制御などアドバンスト制御への適用も検討してゆく考えである。

参考文献

- 1) 坂口、外：超高温・高圧二段再熱ボイラの計画、日立評論、64、10、719～724(昭57-10)
- 2) 天日、外：ロータ熱応力制御によるタービン自動制御装置、火力原子力発電、29、No.5、473～482(昭53-3)
- 3) 松本、外：ロータ熱応力予測タービン制御システム、計測自動制御学会論文集、第16巻、第6号、905～912(昭55-12)
- 4) 本田、外：蒸気タービン自動制御装置、日立評論、61、3、199～202(昭54-3)
- 5) G. D. スミス著、藤川洋一郎訳：電算機による偏微分方程式の解法、サイエンス社(昭58-8)
- 6) 程塚、外：大形ボイラ制御システムの新しい動向、日立評論、64、10、773～776(昭57-10)
- 7) 藤井、外：カルマンフィルタを用いたボイラの蒸気温度予測制御、計装、1983・増刊号、113～115