

中間負荷運用石炭燃焼ベンソンボイラ

Coal-Fired Benson Boiler for Middle Power Plant

石油危機を契機として、我が国では石炭燃焼火力発電所が再び脚光を浴びてきた。一方、原子力発電の割合が増大するにつれて、火力発電は深夜又は休日など、電力需要の少ない時間帯にはプラントを停止、若しくは最低負荷で運転を行ない、昼間の電力需要の多い時間帯には、ほぼ全負荷を取るいわゆる中間負荷運用に移行しつつある。この運用に適したボイラとして、変圧運転ベンソンボイラがある。

重油燃焼超臨界圧変圧運転ベンソンボイラについては、既に設計、製作の実績もあり種々紹介されているので、本稿では重油燃焼ボイラとの対比で石炭燃焼ボイラの設計上の問題点とその対応策について述べるとともに、海外の中間負荷運用ボイラの運転実績について紹介する。

高山好道* *Yoshimichi Takayama*

荒川忠男** *Tadao Arakawa*

日下 巖* *Iwao Kusaka*

1 緒 言

最近、電源構成に占める原子力発電の割合が増大するにつれて、ベース負荷は原子力に譲り、電力需要の形態変化とともに火力発電設備は、ますます中間負荷運用に移行する傾向にある。

また一方では、エネルギー事情、電源立地難などから、高効率、大容量プラントが要求され、負荷変化特性、起動・停止特性に優れ、かつ運転操作の容易なプラントが必要とされている。

これらの要求を満足し、機能、構造的にも既に実証されているものとして変圧運転ベンソンボイラがあり、今後の火力設備の主流を占めていくものと考えられている。

ベンソンボイラは、特にヨーロッパ諸国に広く採用されており、バブコック日立株式会社もイギリスバブコック社及びドイツバブコック社の実績に裏付けされた技術を生かし、各種要求に応じたベンソンボイラを納入してきた。東京電力株式会社広野火力発電所納め重原油燃焼600MWボイラは、超臨界圧変圧運転ベンソンボイラであり、1980年(昭和55年)7月の営業運転を目指し、現在鋭意試運転を進めている。

変圧運転ベンソンボイラについては種々紹介されているので、本稿では重油燃焼ボイラとの対比で、特に中間負荷運用を考慮した設計上の留意事項、及び西ドイツウイルヘルムスハーヘン発電所の720MW石炭燃焼、中間負荷運用ベンソンボイラ〔1976年(昭和51年)に運転開始、現在まで好調に運転中。〕の概要と運転実績について述べ、今後の参考に供したい。

2 中間負荷変圧ベンソンボイラの特徴

図1に、600MW中間負荷運用ベンソンボイラの側面図を、また図2、3に、それぞれ概略系統図、管内流体の状態を示したエンタルピー圧力線図を示す。

ベンソンボイラは、火炉壁にスパイラルメンブレン(以下、スパイラル壁と略す。)を採用しているところに特徴があり、スパイラル壁以外の、火炉上部水壁、ケージ壁、過熱器、再熱器などについては、従来のUPボイラと同様な構造である。

中間負荷ボイラは、頻繁な起動・停止、急速負荷変化に十分耐え得る構造に留意することはもちろんであるが、変圧を伴うために、圧力変化に基づく流動不安定性が助長されるこ

と、また飽和温度が変わるなどのために、従来の定圧ボイラに比べ流路の系統構成、熱応力変動を考慮した設計が必要となる。

スパイラル壁は、構成チューブ間で熱吸収のアンバランスが少なく、流体の混合も不要となるので、変圧を伴った伝熱流動に適した構造といえる。また、最低負荷運転時の火炉保護を目的とした管内最低流速を確保するため、缶水を強制的に循環する運転方式を採用するとともに、汽水分離器を主系統に配置することにより、あたかもドラムボイラと同様な低圧起動を可能としている点に大きな特徴がある。

3 石炭燃焼ボイラと重油燃焼ボイラ

上述の中間負荷運用時の特殊性を考慮し、石炭燃焼変圧運転ベンソンボイラ設計上の主な留意事項について以下に述べる。なお本章では、ベンソンボイラ特有の問題についてだけ触れ、石炭燃焼ボイラ一般の基本事項については割愛する。

3.1 スパイラル火炉

(1) 最低貫流運転負荷

火炉管壁温度の安定維持を目的とし、低負荷時缶水を強制的に循環するが、貫流運転より循環運転に入る負荷をどこに設定するかは設計上重要である。スパイラル壁は、従来の垂直管配置と異なり傾斜管で構成されるため、垂直管配置と比較すると、図4に示すように管内最低流速を確保するために必要なスパイラルチューブ本数は、傾斜角度との関連で比較的自由に選定できる。

表1は、最低貫流運転負荷とスパイラル角度及びスパイラル壁入口から出口までのチューブ巻数との関係の一例について示したものである。最低貫流運転負荷を低く設定することにより、運転操作面で容易な運用を可能とするが、一方、ボイラシステム損失が増大するというデメリットが生ずる。特に石炭燃焼ボイラの場合は、燃料供給系の運転上の制約を考えに入れ、最も合理的な運用方法に考慮を払うべきである。例えば、ミルの最低負荷率は通常40～50%であるが、炭種、石炭性状の多様性を考慮し、安定燃焼を維持させるための実用上の最低負荷としては、約50%負荷である。しかし、ミルカット(バーナ消火)操作を伴う運用を行なう場合は、35%負

* バブコック日立株式会社 ** 日立製作所電力事業本部

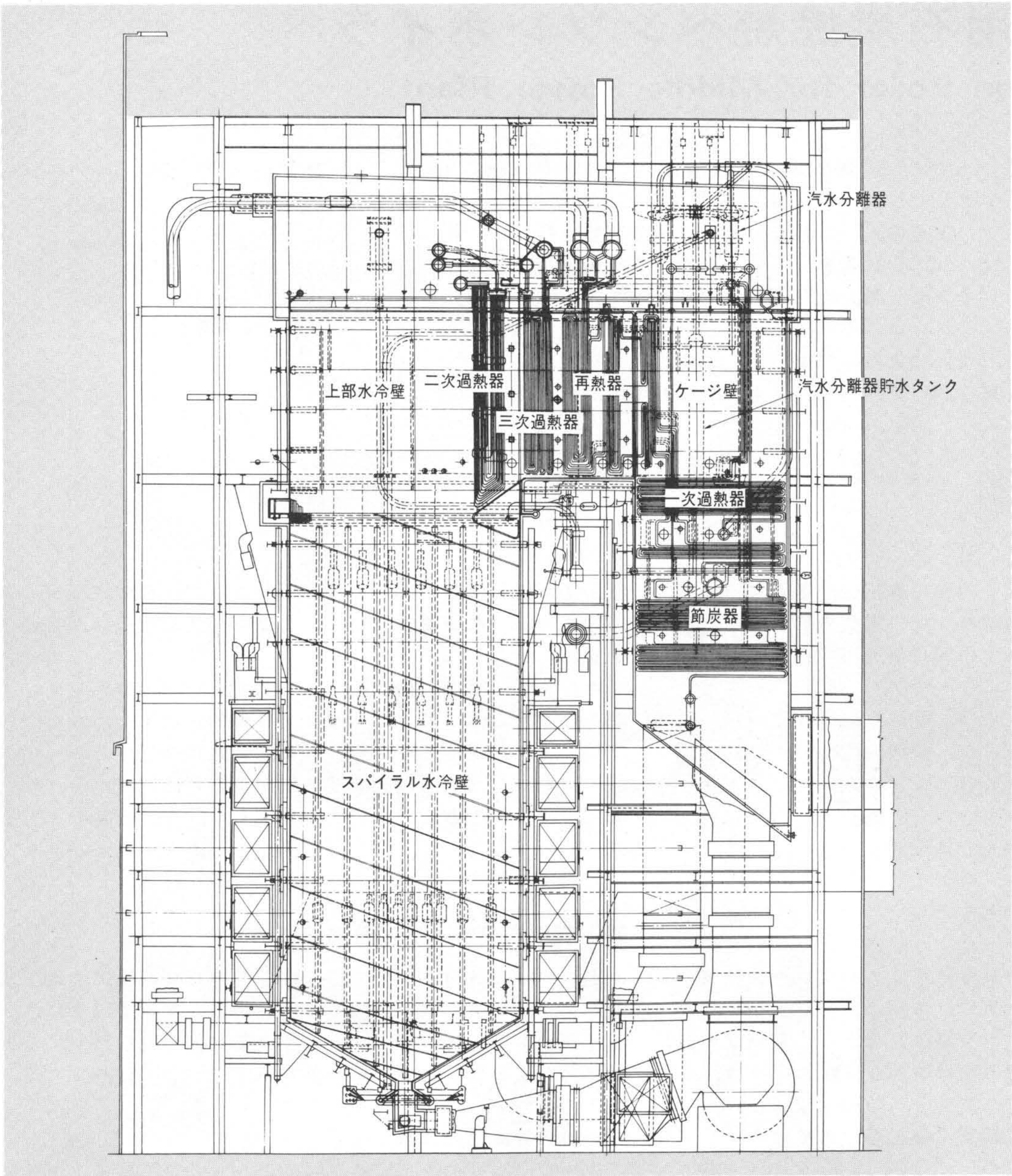


図1 中間負荷運用ベンソンボイラ ボイラの側面図を示し、火炉がスパイラルチューブで構成されている点に特徴がある。

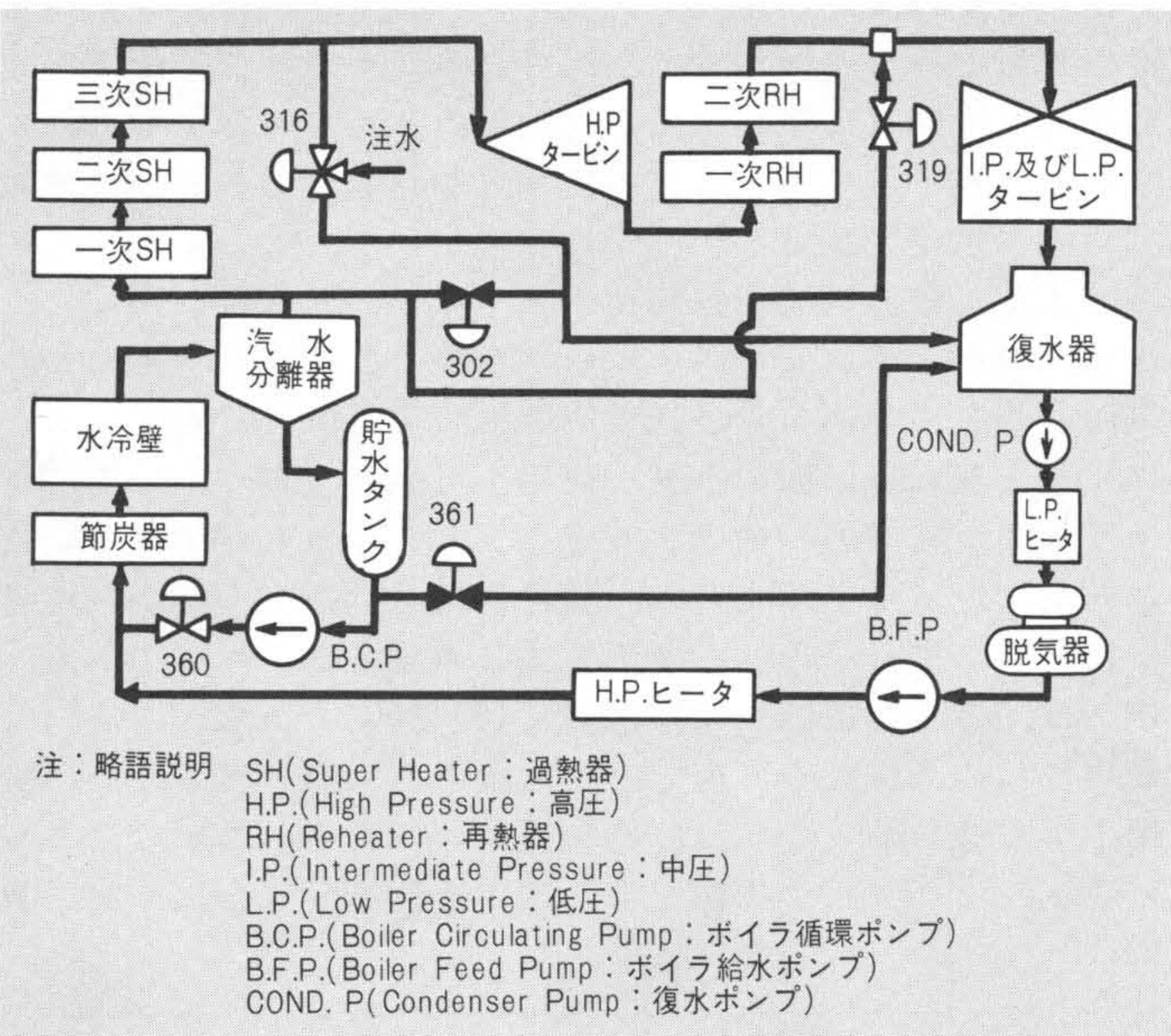


図2 水蒸気系統図 缶水循環系を設置し、低負荷運転を可能としている。

荷まで最低負荷を低減できる。

したがって、最低貫流運転負荷も約35%を採用している。

(2) 火炉支持方法

火炉は、垂直管で構成された上部水冷壁と傾斜管で構成されたスパイラル壁とにより形成される(図5)。スパイラル壁には管内圧のほか、次の荷重を考慮した支持方法が要求される。すなわち、缶水を含むメンブレン壁の自重、炉内圧による荷重、石炭灰の堆積荷重、バックステーなど構造物の荷重、保温、ケーシング、バーナなどの荷重などである。スパイラル管は、図5に示すように横向きに配置されるので、管内圧に対し最も大きな応力となる管周方向と鉛直荷重が一致するため、垂直管の場合に比較して厳しい条件が付加される。特に、石炭燃焼ボイラの場合は石炭灰の荷重が大きな割合を占めるので、起動・停止時の構造物の動きとともに支持方法に留意が必要である。

したがって、図5に示すようにバーチカルストラップをスパイラル壁に設置し、これらの荷重をスパイラル壁に負担させないように配慮している。この支持方法としては、図6に示すようにスパイラル壁に溶接したバーチカルストラップに

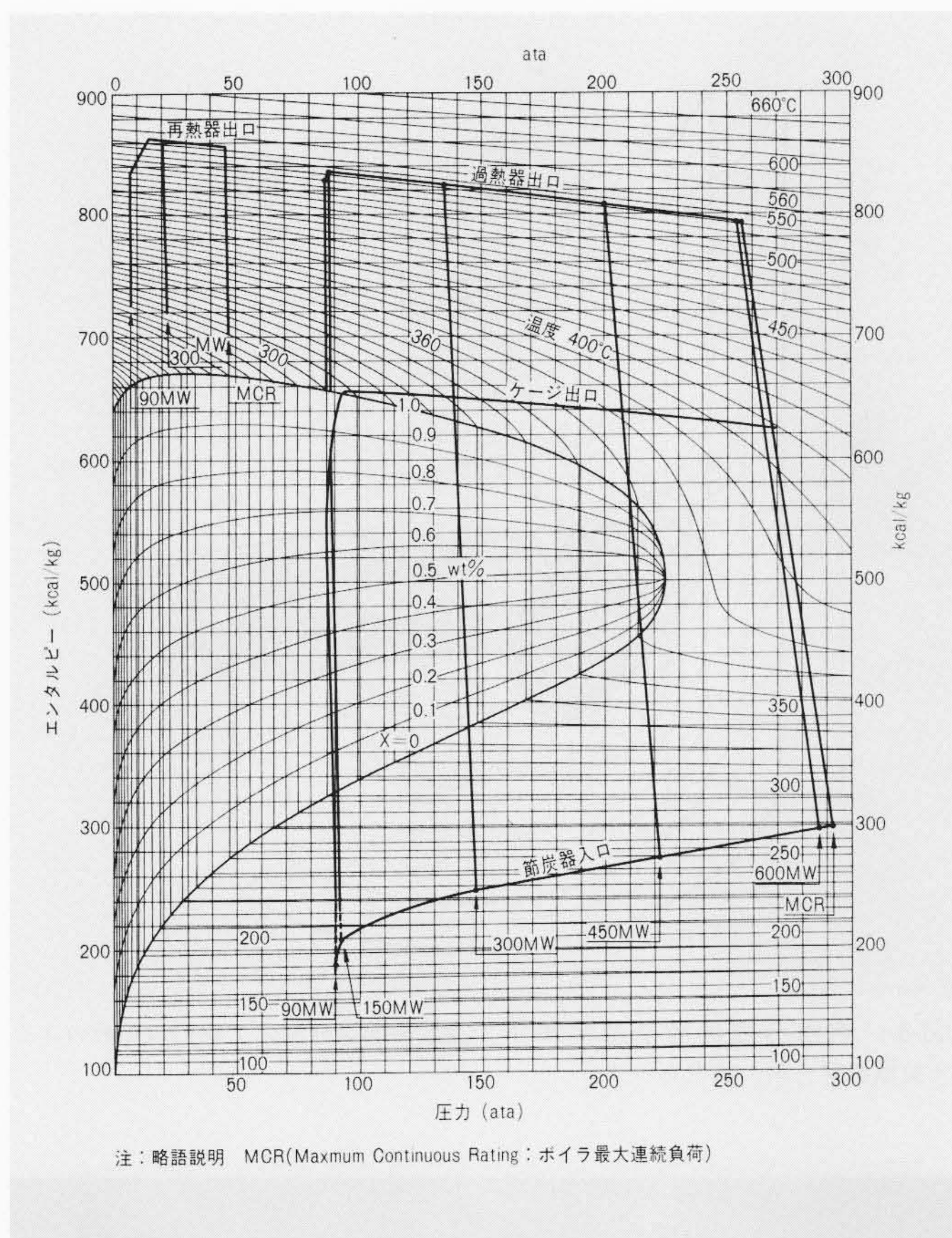


図3 圧力-エンタルピー線図 変圧運転特性を示している。

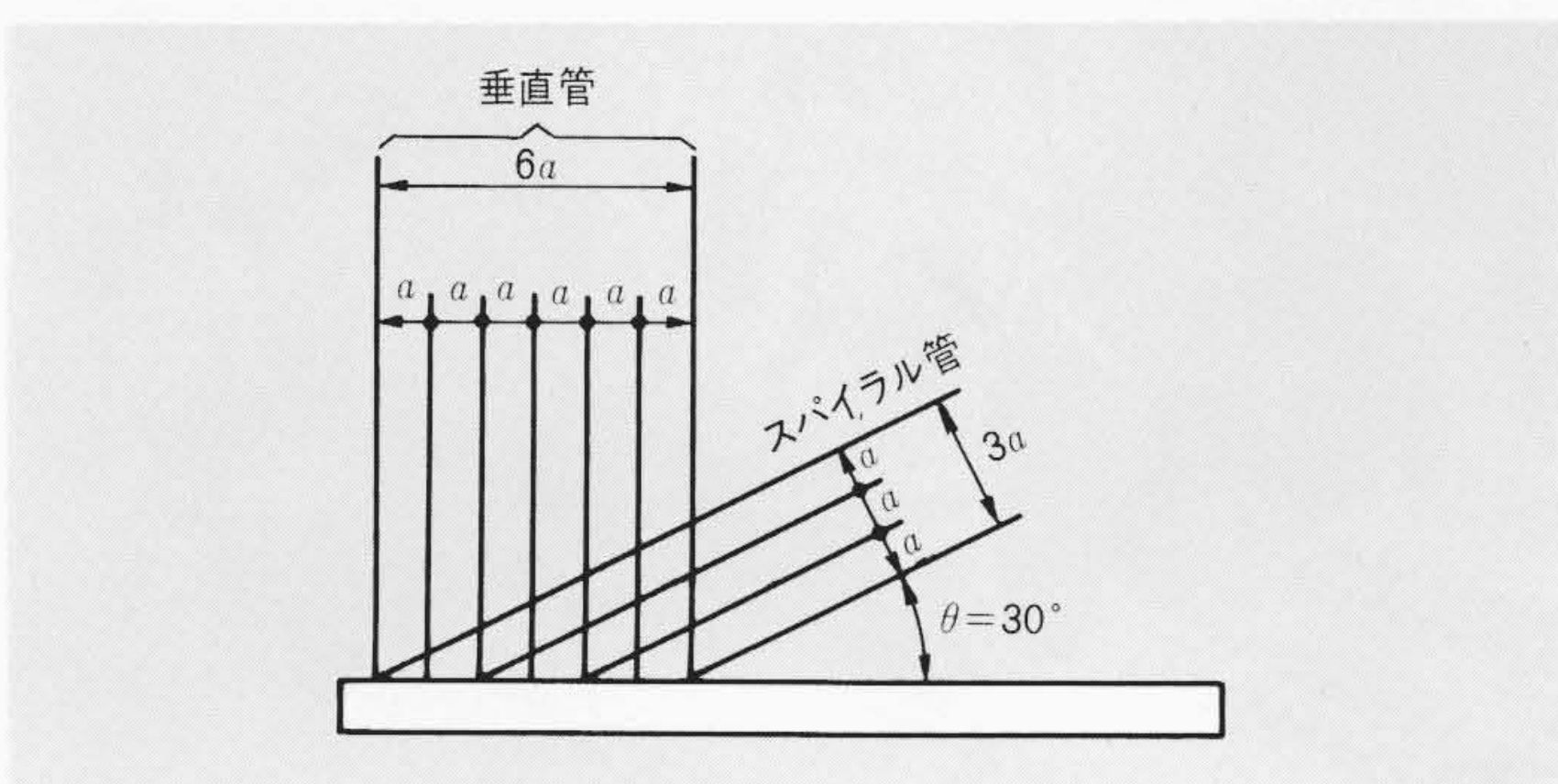


図4 垂直管とスパイラル管の配列 チューブを傾斜すると、本数を低減できる。

表1 最低貫流運転負荷とスパイラル管の構成 火炉を巻く巻数が多いほど、チューブ間熱吸収偏差は小さくなる。

最低貫流運転負荷	スパイラル角度	巻数
25% MCR	18.1°	約1.9
30% MCR	21.9°	約1.6
35% MCR	25.8°	約1.4

荷重を伝達する方式と、図7に示すようにボイラが大容量化するに伴い、スパイラル壁上部の荷重が非常に大きくなるため、スパイラル壁の中間に支持装置を設置して、スパイラル壁の荷重負担を軽減する方式の2方法がある。この後者の方式は、バブコック社で多くの実績をもち、また起動・停止が多いボイラに対しては、温度遅れに伴う過大な熱応力を回避することができる。

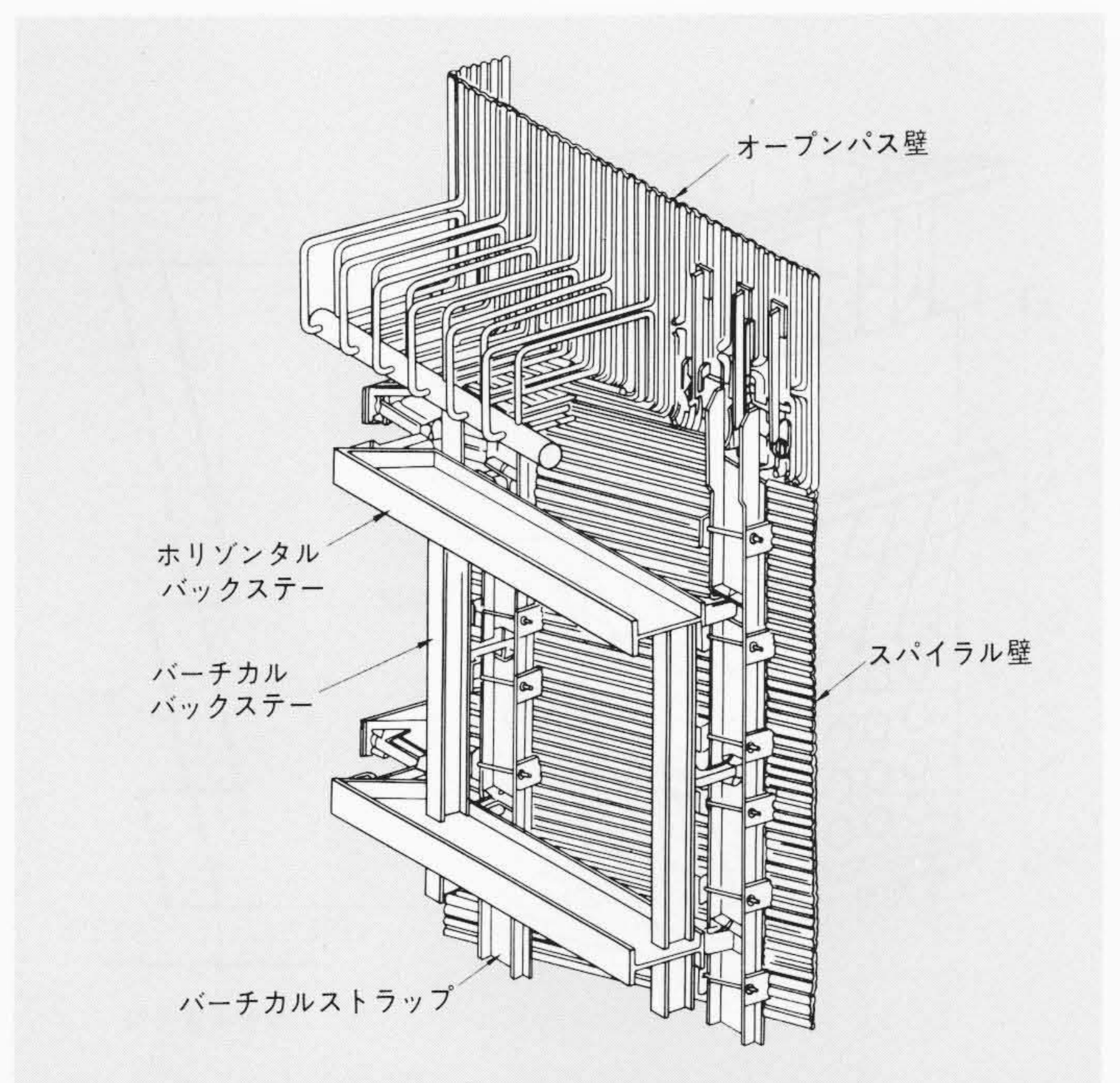


図5 スパイラル壁構造 スパイラル壁に過大な荷重がかからないような配慮がなされている。

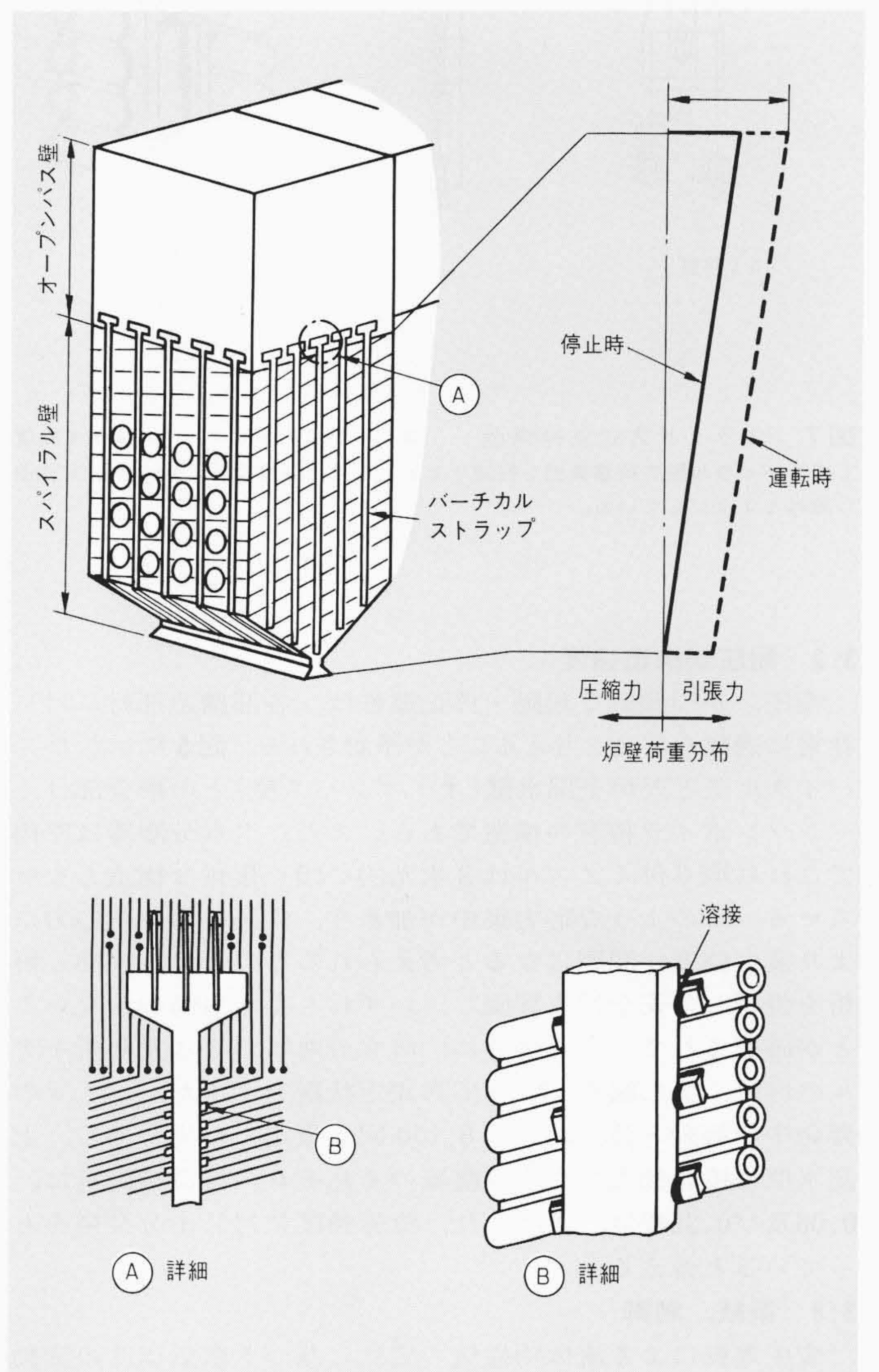


図6 溶接固定式支持構造 スパイラルチューブに溶接されたバーチカルストラップにより支持する。

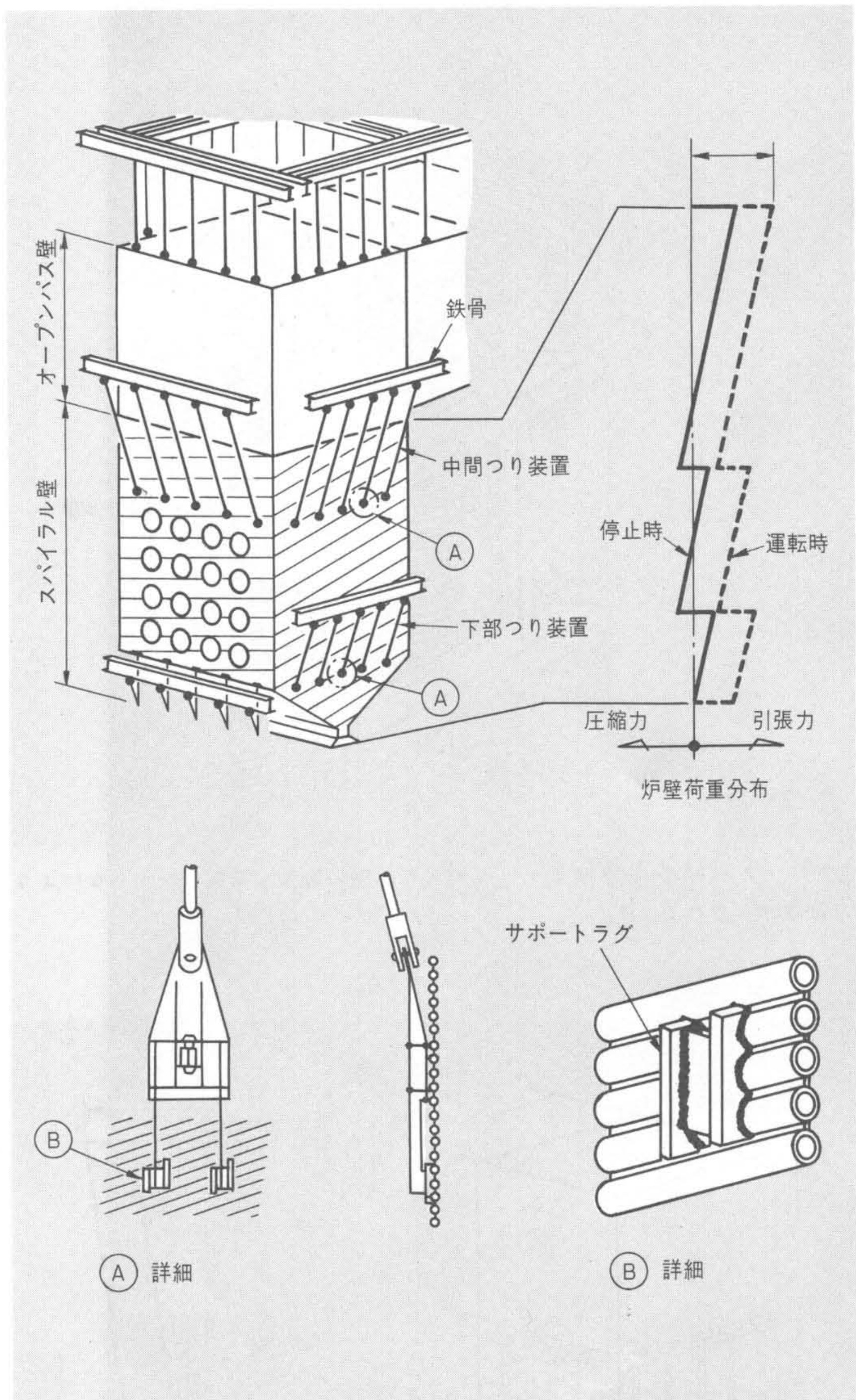


図7 スライド方式支持構造 スパイラル壁中間に、つり装置を設置してスパイラル壁の荷重負担を軽減するとともに、温度変化に伴う伸びを自由に取れるようにしている。

3.2 耐圧部構造強度

変圧、かつ頻繁な起動・停止運転は、各部構造部材に対し非常に過酷な応力を与えることが予想される。図5に示したスパイラル壁と火炉上部水壁(オープンパス壁)との接合部は、ベンソンボイラ特有の構造である。また、汽水分離器は厚肉でこれに取り付くノズルは3次元的に傾く複雑な構造となっている。このような応力集中が加わり、内圧応力や熱応力により疲労強度が問題になると考えられるところは、実験と解析を併用して安全性を評価し、いずれも寿命損傷の少ないことが確認されている。図8に、汽水分離器の3次元解析モデルの例を、また図9にその応力測定状況を示すが、ボイラの寿命中の起動・停止回数を6,100回と仮定した場合でも、上記水壁の接合部及び汽水分離器のそれぞれの寿命損傷量は、0.06及び0.25程度と予想され、疲労強度に対し十分余裕をもっていると言える。

3.3 系統、制御

変圧運転による流体物性値の変化に基づき蒸気温度の変動幅が大きくなること、また起動・停止が頻繁に行なわれることなどに留意し、2段スプレー方式の採用など蒸気温度特性

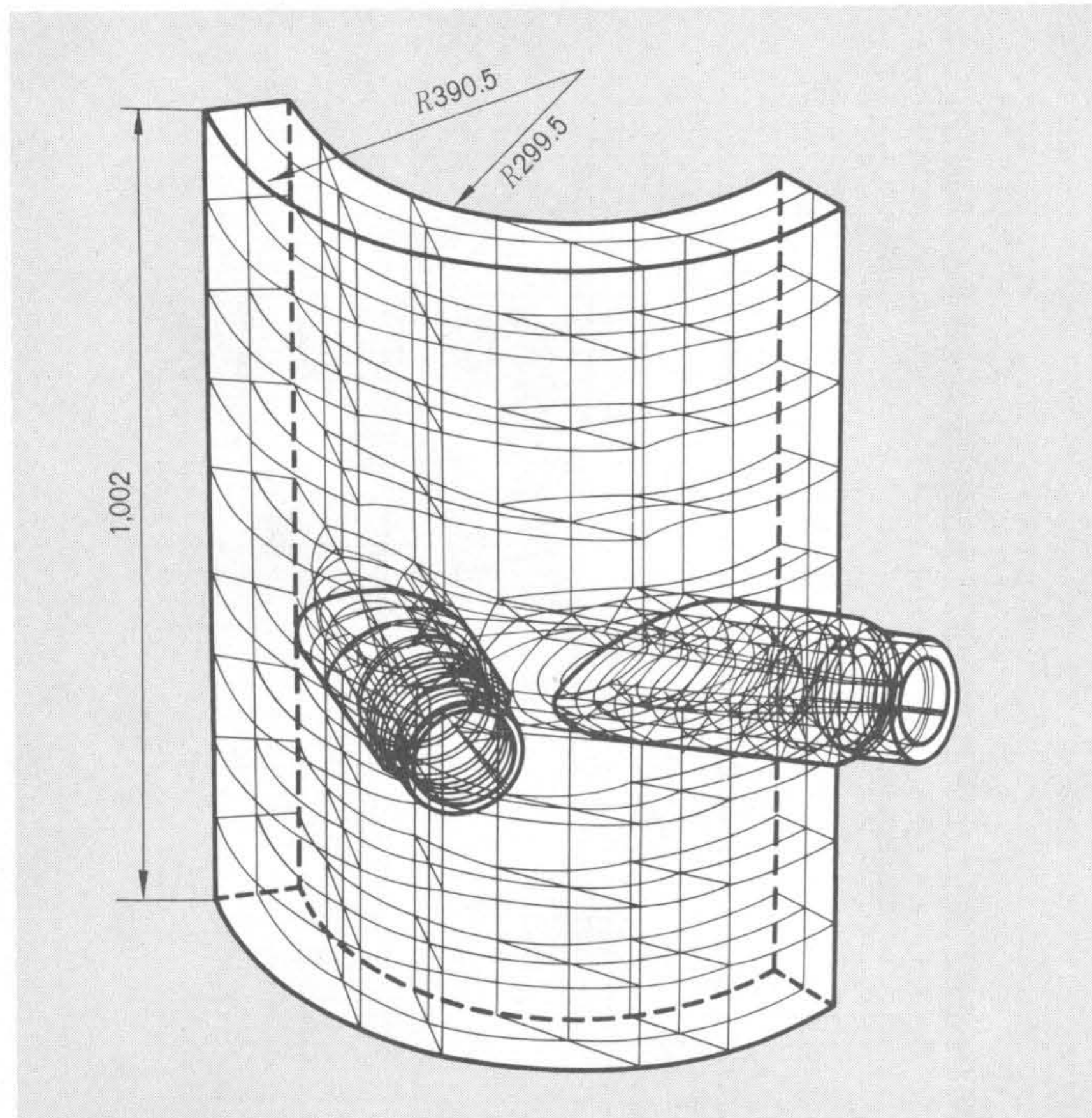


図8 汽水分離器解析モデル 温度分布及び熱応力解析のための3次元有限要素分割の状況を示す。

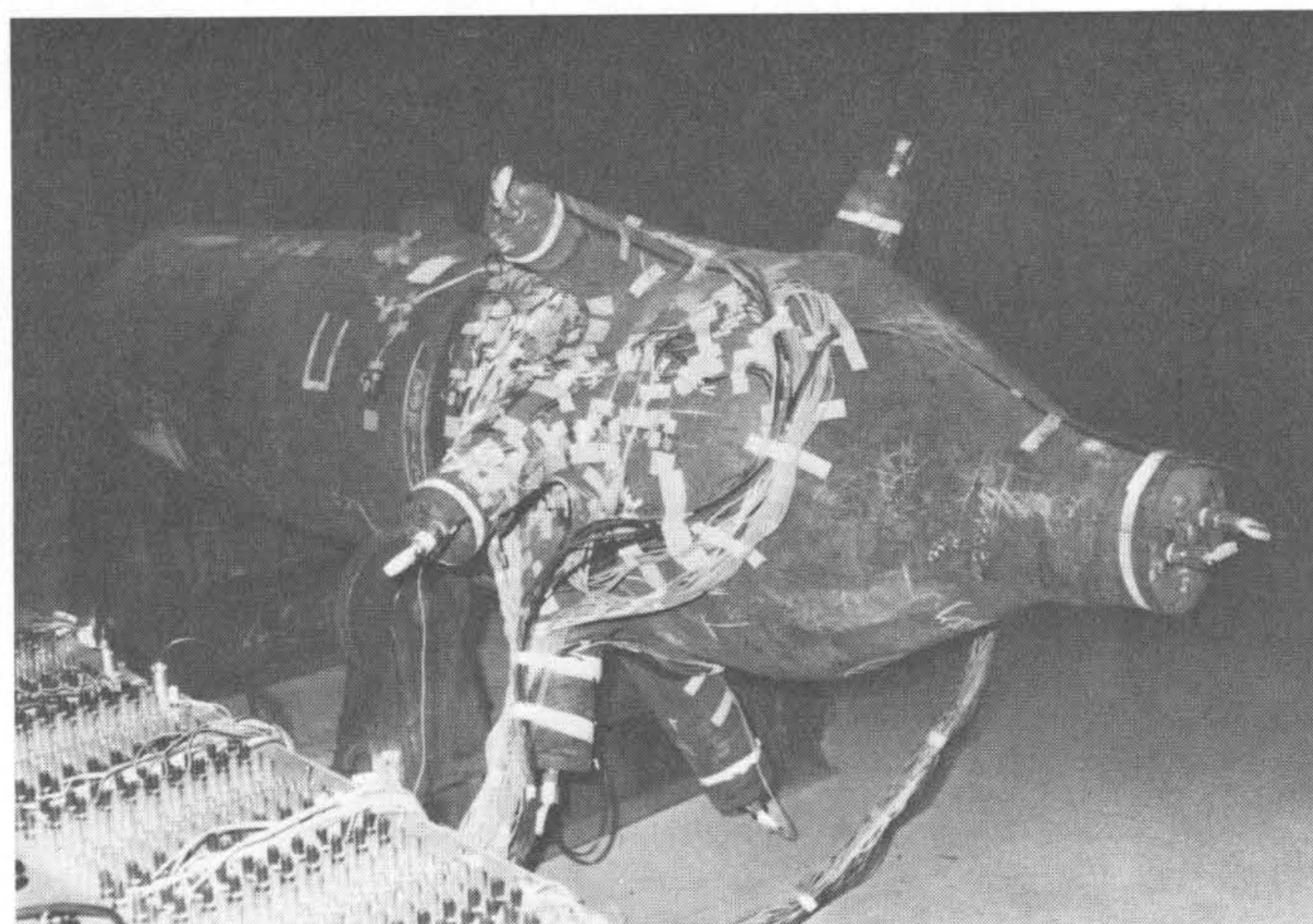


図9 応力実測状況 ノズル開口内面に74個のひずみゲージを取り付け、大気圧～284 kg/cm²の範囲で試験を行なった。

の改善、起動系統などへの配慮が必要となる。

石炭燃焼の場合は、ミルのターンダウンに関連してミルの運用最低負荷に制限があること、またそのために、ミルの起動・停止などの切替操作を伴うなどから、これらを踏まえて十分協調をとった検討が必要である。特に、負荷を急速にしゃ断し、所内単独負荷運転へ移行する必要性が生じた場合は、タービンバイパスシステムを設置することにより可能となる。本システムは、負荷急速しゃ断時のような、ボイラ負荷とタービン負荷との差を吸収する目的のために使用されるだけでなく、起動時に再熱器の冷却を可能とするため起動時間を短縮することができ、また蒸気温度特性改善にも利用できる。表2に、その使用目的と一般的タービンバイパス容量を示す。

表2 タービンバイパス容量 タービンバイパスの設置目的に応じて、容量が異なることを示す。

No.	設 置 目 的		容量 (%定格流量)				
			20	40	60	80	100
1	起動特性の向上	(1a) 再熱器の蒸気冷却					
		(1b) タービンメタルマッ チング					
2	ボイラ負荷 とタービン 負荷との差 の吸収	(2a) 急激な負荷変化に対 する応答遅れの吸収					
		(2b) 送電線事故時の所内 負荷運転への移行	80% 混焼 専焼				

4 中間負荷石炭燃焼ボイラの実績

西ドイツ、ウイルヘルムスハーヘン発電所の720 MW 石炭専焼(重油100%燃焼可能)ボイラは、当初から中間負荷火力を目指して設計製作された最大連続蒸発量2,170 t/h、ピーク出力760MW、主蒸気圧力191bar、主蒸気及び再熱蒸気温度530/530℃、平衡通風方式を採用した西ドイツの誇る最新鋭プラントである。図10にその全体図を示す。本ボイラの設計製作元はドイツバブコック社であり、1976年(昭和51年)9月に営業運転を開始し、現在当初の計画どおり好調に運転されている。以下、プラントの概要と運転実績について概要を紹介する。

本プラントの主要系統図を図11に示す。当初の缶水循環系統は、貯水タンク、脱気器、給水ポンプを介した方式を採用し、プラントは夜間停止又は35%負荷を最低負荷とした運用を行っていた。本系統が採用された主な理由は、計画時点の安価な重油の燃料費に基づく起動損失と設備費との経済性追求の結果である。しかし、重油価格の上昇による起動損失の増加と負荷調整のための運転パターンの変化により、夜間でも低

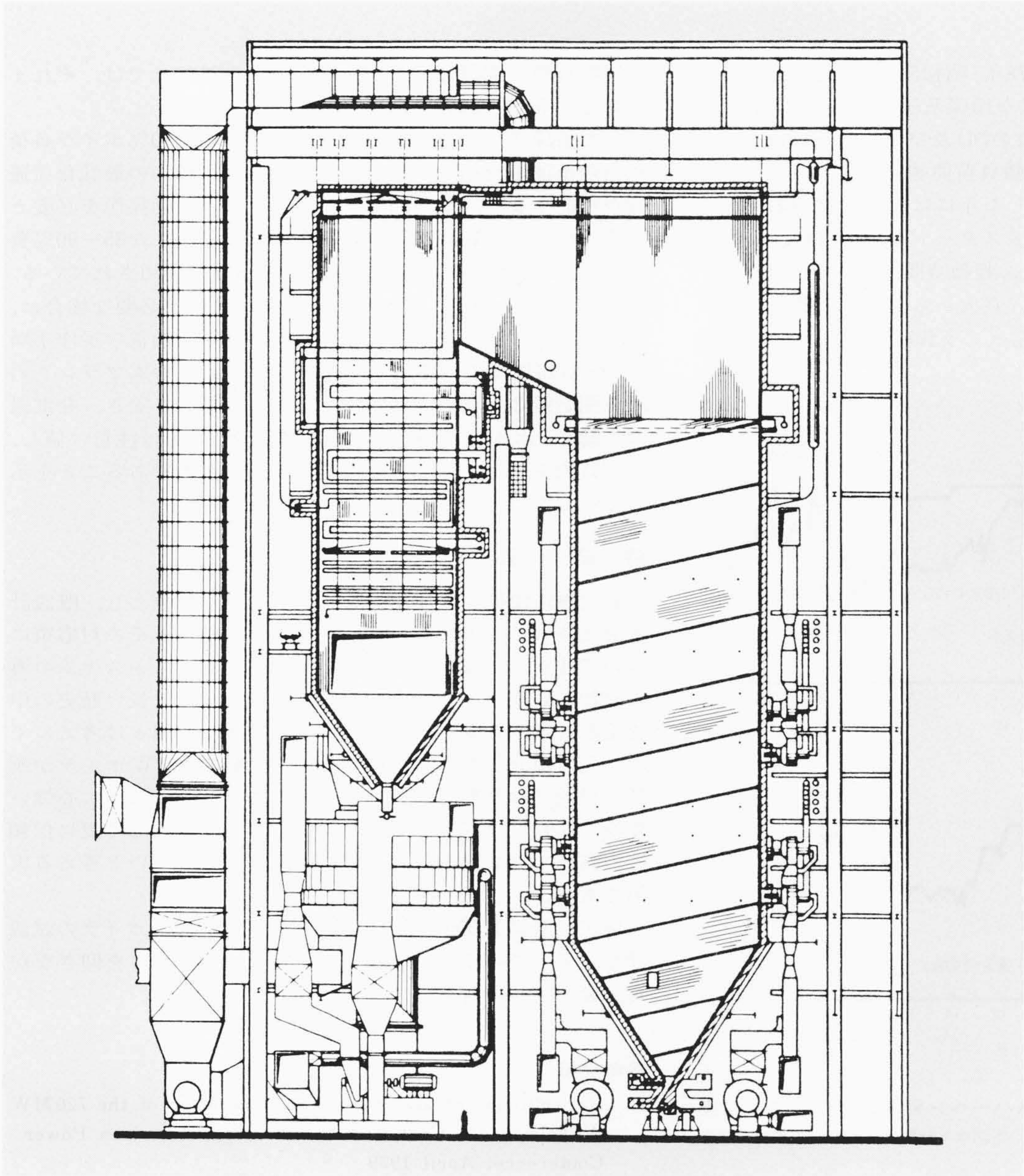


図10 西ドイツ、ウイルヘルムスハーヘン発電所720MWボイラ 中間負荷運用石炭燃焼ボイラ(2,170 t/h, 191 bar, 530/530℃)の概観図を示す。

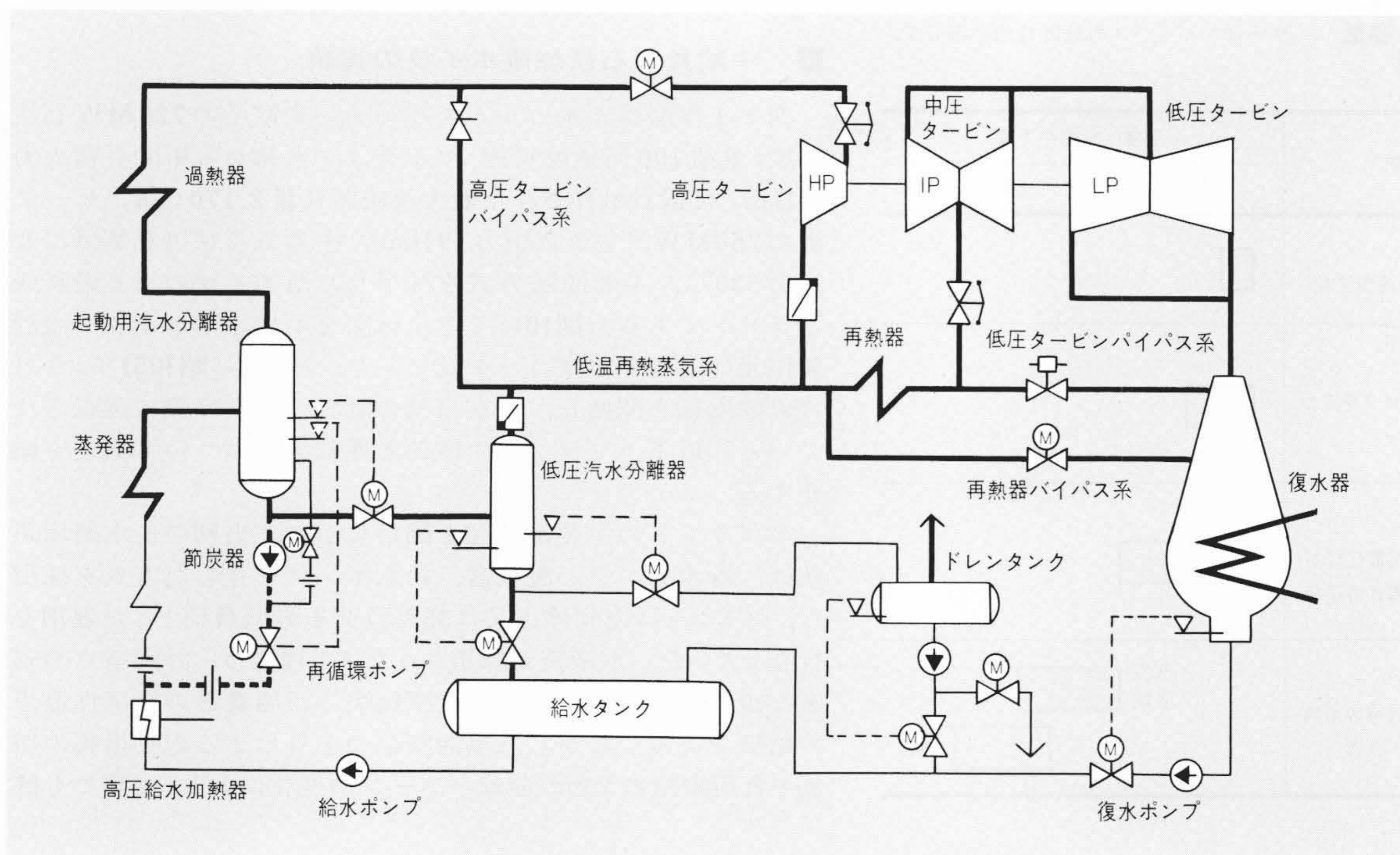


図11 西ドイツ、ウ
イルヘルムスハー
ヘン発電所720MWボイ
ラの起動系統
現在は破線で示した循環
ポンプ付系統で運用され
ている。

負荷運転の必要性が増し、1978年(昭和53年)10月に再循環ポンプを使用した前出図2と同様な循環系統に改造された。図12に、連続負荷調整運転時(上段の図)及びDaily Start Stop運転時(下段の図)の典型的実績負荷曲線を示す。

本プラントは、運転を開始した年には夜間及び週末停止の運用が採られたため、コールドスタート回数は81回、ホットスタート回数は141回であった。起動時間について一例を示すと、8時間停止後起動の場合、点火から通気まで29分、通気から併入間5分、併入から35%ボイラ負荷(MCR:ボイラ最

大連続負荷)間21分であり、35時間停止後起動では、それぞれ46分、5分、21分である。

また循環ポンプ設置後は、1台のミルと約10%ボイラ負荷相当の重油を使用し、効率良くかつ安全に18%の最低負荷運転が可能となり、18~35%負荷間ではミル起動操作を必要とするため、5~10MW/minの負荷変化率で、また35~90%負荷帯では、最高10%/min、通常5.6%/minで運用されている。なお送電系統事故などで、所内単独負荷運転が必要な場合は、タービンバイパス系を使用することにより、通常の手順で30~40MWまで負荷降下が可能である。なお本プラントの運転開始後2年間の実績では、定期検査期間を除き、発電設備で92%、ボイラで96%の稼働率であったことは注目に値し、中間負荷ボイラとして十分信頼性の高いものであることを示している¹⁾。

5 結 言

石炭燃焼中間負荷運用ベンソンボイラを対象とし、既設計重油燃焼ボイラとの対比で、設計上の問題点とその対応策について述べた。技術的には、タービンバイパスシステムの導入が新しい問題として残るが、ヨーロッパでは長い歴史の中で培われてきた既存の技術であり、大きな問題とは考えにくい。先に紹介したドイツバブcock社製720MWボイラが所期の目的どおり順調に稼働していることは、まことに心強いものであり、これらの実績を踏まえた技術を生かして更に信頼性の高いプラントの設計、製作に努めていきたいと考える次第である。

現在、既に1,000MW石炭燃焼変圧ベンソンボイラの試設計も完了しているが、今後とも各電力会社の指導を仰ぎながら、総合技術の研さんに努めていく考えである。

参考文献

- 1) B. Stellbrink et al.: Design and Operation of the 720 MW Wilhelmshaven Coal Fired Generation, American Power Conference, April 1979

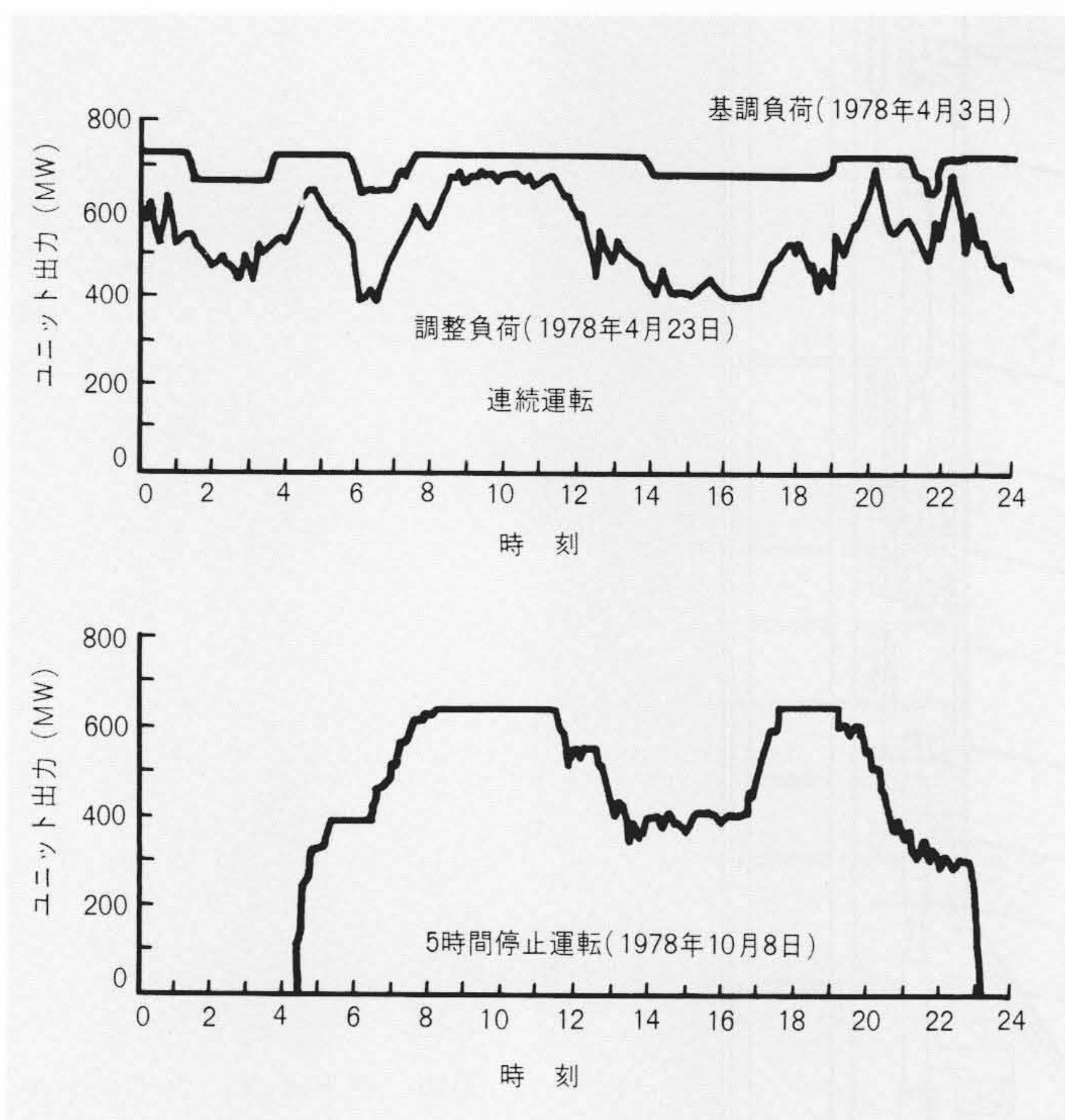


図12 西ドイツ、ウ
イルヘルムスハー
ヘン発電所720MWボイラ実
績負荷曲線 上図は連続運転時の、下図は5時間停止運転時の各負荷変化
特性を示す。