

大容量石炭燃焼ボイラの中間負荷運用技術

New Technology of Mid Load Range Operation for Large Capacity Coal Fired Boilers

今後建設される火力プラントは、石炭火力プラントがその主力となる。現在運転されている石炭火力は、ベース火力としての位置付けにあるが、今後建設される石炭火力は、原子力発電の増大から、運用形態は中間負荷運用へ移行していくものと予測される。

そこで石炭火力の中間負荷運用上制約となるミル(微粉炭機)設備をもつボイラ設備について、日立製作所の技術及び既納の石炭燃焼ボイラの運用実績に基づき、石炭燃焼ボイラの中間負荷運用の問題点とその対応技術について検討を進めてきた。

本稿では、ミルウォーミング方法の改良などの運用性能向上技術について述べるとともに、中間負荷運用設計ボイラの一例を紹介し、今後の参考に供したい。

磯田 嘉悦* *Kaetsu Isoda*
 岸 光男* *Mitsuo Kishi*
 川瀬 隆世** *Takayo Kawase*
 乾 泰二*** *Taiji Inui*
 二川原誠逸*** *Seiitsu Nigawara*

1 緒言

石炭火力は、オイルショック以来石油代替エネルギーとしてその有用性が見直され、今後、計画及び建設される火力プラントは石炭火力が主流となっている。石炭火力は、油、ガス燃焼火力に比べ複雑な操作を必要とし、また応答の遅いミル設備をもっていることから、負荷追従性、起動特性などの運用性能に制約があり、これまでベースロード運転用として考えられていた。しかし、原子力発電の増大に伴い火力プラントは中間負荷運用を要求され、石炭火力であってもこの要求を満たすことが必要となってきた。

このような背景下で、日立製作所では中間負荷運用を可能とする石炭燃焼ボイラの検討を進めてきた。その結果、ミルウォーミング方法の改善などミルシステム運用の改善、タービンバイパスシステムの採用、及び最新制御技術の導入など

による起動時間の短縮、負荷変化率向上などの中間負荷運用技術、急速負荷遮断時の所内単独運転技術の見通しを得たので、その概要について述べる。また国内に先駆けて中間負荷運用を目指したオーストラリアQEGB(クイーンズランド電力公社)タロン発電所1号ボイラ(350MW自然循環変圧ボイラ)は、タービンバイパスシステムをもったプラントであるが、順調に試運転に入っており、その試運転結果についても一部紹介する。

2 石炭燃焼ボイラの運用上の制約事項

2.1 中間負荷火力に要求される性能

中間負荷運用に要求される主な性能は、
(1) DSS(毎日起動・停止)

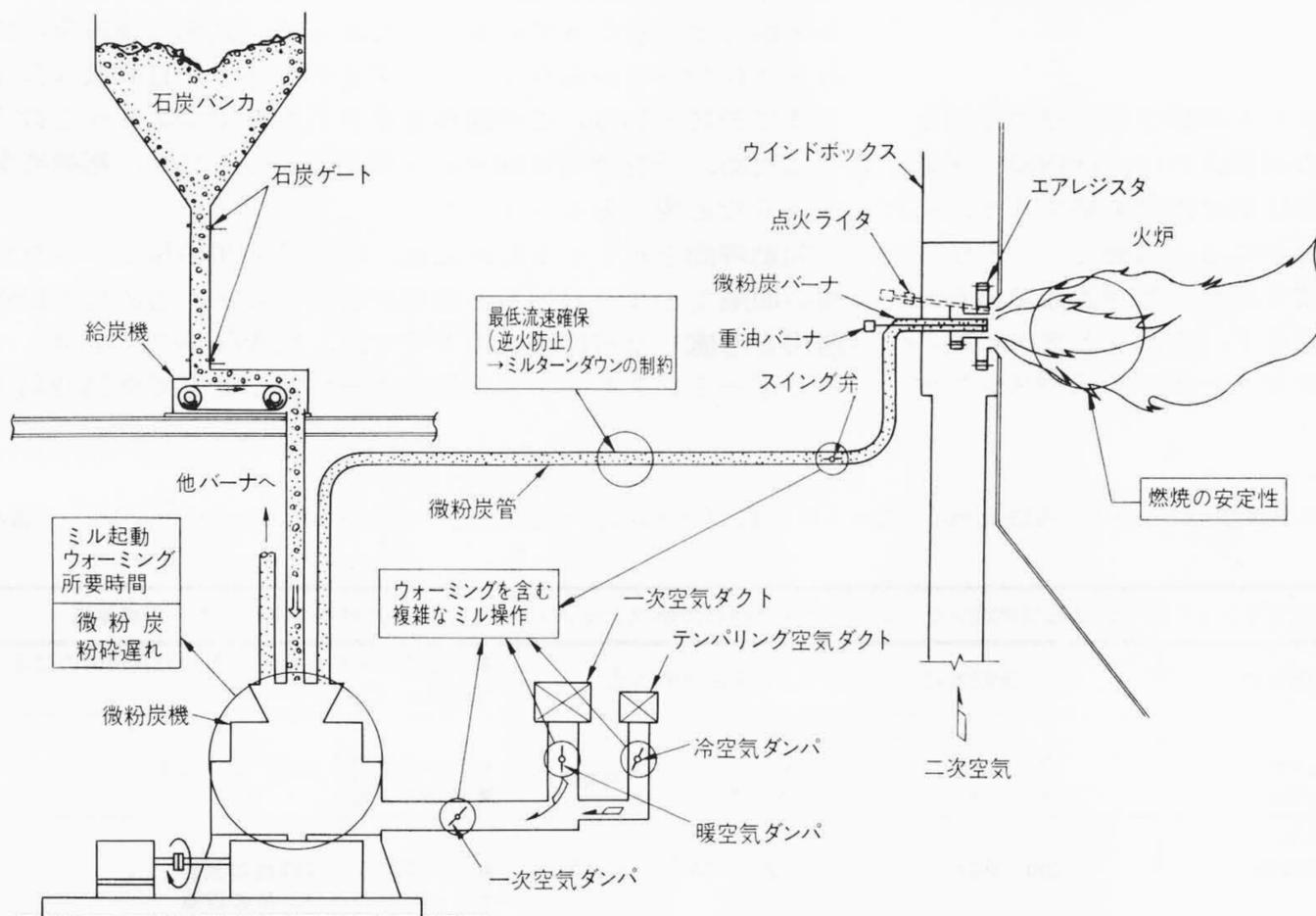


図1 ミル設備起動・停止操作の問題点 ミル周り系統により、運用上問題となる箇所及び内容を示す。

* バブコック日立株式会社 ** バブコック日立株式会社呉工場 *** 日立製作所電力事業部

- (2) 高負荷変化率
 - (3) 最低負荷の切下げ
 - (4) 所内単独運転
 - (5) 部分負荷時の効率向上
- などが挙げられる。

現状の石炭火力は、図1に示すように油、ガス燃焼火力に比べ石炭燃料の追従性が劣ること、燃焼の安定性が劣ること、複雑なミル起動・停止操作を伴うことなどのボイラ側の制約から、ベースロード火力として運用されている。

したがって、石炭火力の中間負荷運用を行なうためには、これらの問題を解決することが必要となる。

2.2 石炭燃焼ボイラ運用上の問題点

現状の石炭火力と油、ガス燃焼火力の運用比較を表1に示すとともに、以下に運用上の問題点について述べる。

(1) 起動時間の短縮

DSS運用を行なうためには、起動・停止時間を短縮することが重要な課題である。石炭燃焼ボイラでは、油、ガス燃焼ボイラに比べミルの起動・停止操作、ウォーミング操作、残炭パージなど、ユニット起動・停止時間の短縮を阻害する要因がある。また、石炭特有のスラッジング、ファウリングの問題からボイラ構造が大きくなり、起動初期のボイラ昇温にも長時間を要する。したがって、起動時間を短縮するためには、ミル操作及び昇温特性の改善が重要である。

(2) 負荷変化率の向上

石炭燃焼ボイラでは、負荷変化中、ミル起動・停止に伴う燃料量のステップ状の変化及び燃料要求指令に対する炉内への燃料投入遅れが蒸気温度制御系への外乱要因となり、その結果、負荷変化速度を抑制する必要が生ずる。

(3) 最低負荷の低減

石炭火力の最低安定負荷は、微粉炭の安定燃焼に影響される。すなわち、投入燃料量の少ない低負荷域では火炉内雰囲気温度が低下し微粉着火が悪化するため、燃焼性が不安定になる。また、燃焼上の制限は使用される石炭固有の特性に大きく影響される。

(4) 所内単独運転

現在の石炭火力は、油、ガス火力と同様な所内単独運転を行なうことは困難である。今後の石炭火力に、所内単独運転機能をもたせることが必要か否かは更に検討を要するが、石炭火力で所内単独運転を行なう場合には、燃焼性、炉内圧変動などの制約から急速に燃料を絞り込むことが困難であるため、余剰発生蒸気をタービンに通さず、ボイラとタービンの負荷を切り離れた運用を可能とするタービンバイパスシステム

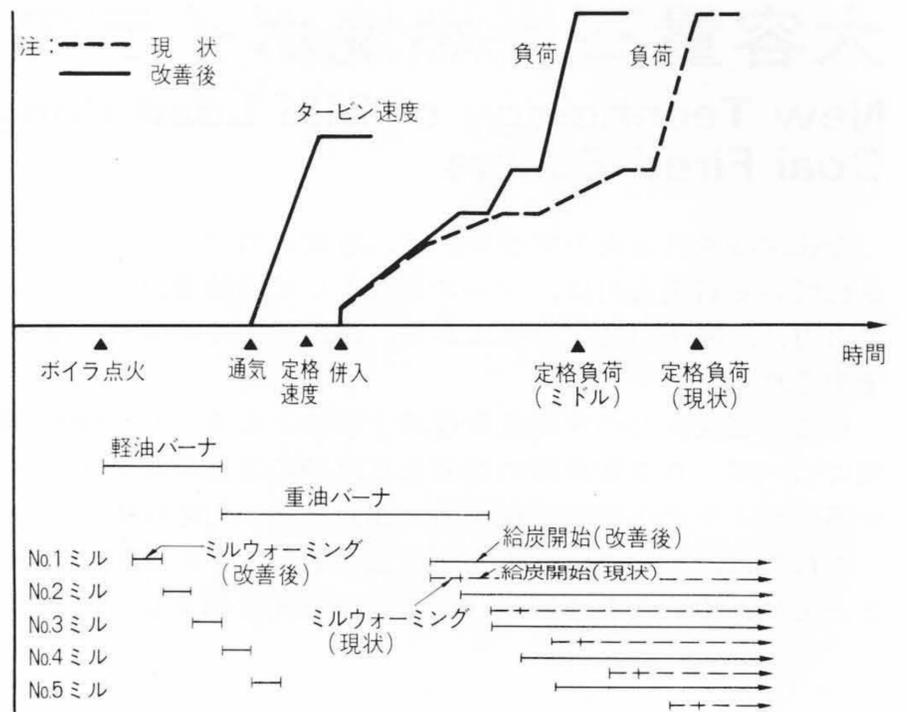


図2 ミルウォーミング手順 現状の石炭火力とミドル形石炭火力のウォーミング手順を比較して示す。

ムの設置が不可欠となる。

3 石炭燃焼ボイラ運用性向上のための対応策

3.1 ミルシステムの運用改善

起動時間の短縮、負荷変化率の向上を図るためには、ミルシステムの運用、操作の改善が必要となるが、以下にその内容について述べる。

(1) ミルウォーミング方法

ミルは石炭投入初期に原炭中水分による粉砕部への石炭付着に起因する粉砕の阻害を避け、安定した燃焼を維持できるようにウォーミングを行なう必要がある。ウォーミングはミル起動指令後ただちに開始されるが、ウォーミング空気によるNOx(窒素酸化物)増加など燃焼への外乱を与えるため、ミル1台ごとに行なっている。したがって、従来の運用方法ではミル起動指令からウォーミングを行ないミル自動投入に至るまで約10~15分、この操作を逐次行なって全数ミルを投入するため、所要時間は50~60分程度かかっており、起動時間が長くなる要因となっていた。

起動時間を短くするためには、石炭投入開始後できるだけ短い間隔でミルを追加する運用が必要となる。このためDSS運用を考慮した石炭燃焼ボイラでは、点火後早期に全数ミルのウォーミングを完了し、待機させておくことで起動時間の

表1 石炭燃焼プラントと油、ガス燃焼プラントの運用性比較 石炭火力と油、ガス燃焼火力の運用性能の比較を挙げ、石炭火力の運用上の問題点を示す。

項目	油、ガス燃焼プラント	現状石炭燃焼プラント	中間負荷石炭燃焼プラント	石炭燃焼中間負荷運用化考慮事項
運用方式	変圧運転方式	定圧運転方式	変圧運転方式	●変圧運転方式採用による部分負荷時の効率向上
負荷変化率 最低負荷~50%負荷 50~100%負荷	3%/min 5%/min	0.5%/min 1.0%/min	2~3%/min (目標) 3~5%/min	●ミルの運用及び操作性の改善 ●制御性改善
起動時間 (ホットスタート8時間停止後) 点火-全負荷	100~120min	300~360min	120~150min (目標)	●ミル運用及び操作性の改善 ●タービンバイパス系の設置
最低負荷	10~15%負荷	約35%負荷 (炭種により異なる。)	約35%負荷以下 (炭種により異なる。)	●低負荷時の微粉炭安定燃焼 (炭種により異なる。)
所内単独運転	可能	不可能	可能	●タービンバイパス系の設置 ●火炉ドラフト変動対策

短縮を図ることができる。すなわち、ミルウォーミング操作をミル起動操作と切り離すことにより、ユニットの起動時間がミルウォーミング時間に影響されなくなり、ユニット起動(ホットスタート：点火-全負荷)の短縮が可能となる。このミル運用法の例を図2に示す。

(2) 石炭バーナカット運用

通常、微粉炭バーナの点・消火は当該ミルの起動・停止により行なうため、バーナターンダウンは、ミルの最低負荷により制約されることになる。ミル最低負荷は、微粉炭管内流速を確保するための最低一次空気量と微粉炭量の割合(空気/石炭比)から影響を受ける燃焼面から決められ、炭種によっても異なるが一般に40~50%程度である。したがって、負荷変化時ミルの起動・停止が頻繁になり、これが負荷変化運用上の制約要因となっていた。より高い負荷変化率を達成するためには、ミルのターンダウンを広げ、ミルの起動・停止を極力少なくする必要がある。

このため、中間負荷石炭燃焼ボイラに対しては1台のミル内で任意のバーナを単独に点・消火可能なシステムを採用し、低負荷時に点火中のバーナの流速を確保してミルのターンダウンを広げること検討している。これにより負荷変化中のミル切替操作を減らし、バーナの単独点・消火操作により蒸気温度制御系への外乱を軽減でき、高負荷変化率の達成が可能となる。

3.2 タービンバイパスシステム

石炭火力の中間負荷運用、負荷遮断時の所内単独運転移行など、系統運用の柔軟性を高める手段の一つとして、再熱器の蒸気冷却機能をもつタービンバイパスシステムが挙げられる。

タービンバイパスシステムの特徴を以下に述べる。

(1) 設置目的

(a) 起動特性の向上

従来の起動バイパスシステムでは、タービン通気前は再熱系に蒸気が流れないため、タービン入口再熱蒸気温度が低く、タービン通気後は再熱器からの高温蒸気が流れるため、併入前後で再熱蒸気温度が急上昇する傾向にあった。また、再熱器メタルの蒸気冷却が行なわれなため、通気前の再熱器保護上、燃料投入量が制約され起動時間が短縮できない要因になっていた。

これに対しタービンバイパスシステムを設置することにより、タービン通気前に再熱器へ蒸気が流れるため、通気後の再熱蒸気温度の急上昇が緩和され、良好な昇温特性を得ることができるとともに、再熱器蒸気冷却が可能となり、起動燃料投入量を増大することが可能となる。したがって、点火-通気間の起動時間の短縮を図れるとともに、タービン通気時のメタルマッチング(蒸気とタービンメタルとの温度差を最小化する。)を容易に行なうことが可能となる。

(b) ボイラ負荷とタービン負荷の差の吸収

ボイラ負荷応答を超える急激な負荷降下時にボイラ応答遅れ分を吸収したり、送電線事故時に所内単独運転へ移行する場合、タービンの極小負荷に相当する蒸発量とボイラ最低負荷相当の蒸発量との差を吸収し、所内単独運転を可能にする。具体的には、ボイラからの余剰蒸気を、タービンをバイパスして復水器へ排出することによって、蒸気圧力の上昇を許容値内に抑制する。またボイラ燃焼系の所要応答速度を緩和し、安定燃焼の維持を可能とする。

(c) 過熱器安全弁としての機能

過熱器の安全弁を省略し、圧力上昇時は、タービンバイパスシステムで余剰蒸気を復水器へ排出し、過熱器安全弁

表2 タービンバイパスの設置目的と容量 タービンバイパスの使用目的に対応させたタービンバイパス容量を示した。

No.	設置目的		容量(%定格重量流量)				
			20	40	60	80	100
1	起動特性の向上	再熱器の蒸気冷却	<input type="checkbox"/>				
		タービンメタルマッチング	<input type="checkbox"/>				
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	<input type="checkbox"/>				
		(2b) 送電線事故時の所内負荷運転への移行				<input type="checkbox"/>	
3	過熱器安全弁としての機能						<input type="checkbox"/>

として機能させる。この安全弁としての機能については、各国の法規により取扱いが異なる。

(2) タービンバイパスシステムの容量

タービンバイパスシステムの必要容量は、その設置目的に応じて変わる。その一般的な選択幅を表2に示す。

(a) 起動特性の向上

タービン通気前に再熱器蒸気冷却を可能とする場合には、バイパス容量はほぼ燃料投入量に見合う分が必要となる。従来どおり起動時の燃料投入量を10%程度とすれば、バイパス容量は起動時圧力でMCR(ボイラ最大連続蒸発量)の約10%となる。

また、起動時の燃料投入量を更に増加してボイラ昇温特性を改善し、ボイラタービンメタルマッチングを向上させ起動時間の短縮を図る場合の効果的バイパス容量は、起動時圧力で20~30%MCR程度となる。この場合、全圧時(定格出力時圧力)に換算すると、約60~90%MCR相当となる。

(b) ボイラ負荷とタービン負荷との差の吸収

送電線事故時の所内負荷運転については、油、ガス燃焼ボイラでは、FCB(ファーストカットバック：再熱器保護燃料量以下まで急速に燃料を絞り込む技術)が確立されている。しかし、石炭燃焼ボイラでは、燃料遮断に伴う炉内圧変動の抑制、燃焼の安定性を確保するために、ミルの絞り込みを油、ガス燃焼ボイラ並みに急速に行なうことができない。そのため、一般には全圧時70%MCR以上のバイパス容量を必要とする。なお、低圧バイパス弁の必要容量はFCB発生時の再熱圧力の上昇や、FCB終了後の再起動を考慮して選定する必要がある。タービンバイパスシステムの技術は、ヨーロッパ、特にドイツとフランスで発達したが、西ドイツでは表2のNo.(1)(2)(3)を、フランスではNo.(1)を目的としているケースが多い。

(3) タービンバイパスシステムの系統構成

タービンバイパスシステムの系統概念を図3に示す。タービンバイパスシステムは、高圧バイパス弁、低圧バイパス弁、同スプレー弁で構成される。タービン起動前、ボイラ発生蒸気は高圧バイパス弁で減温、減圧され高圧タービンをバイパスして再熱器を通り再加熱後、低圧バイパス弁を通り、中・低圧タービンをバイパスし、減温後復水器へ排出される。高圧タービン排気部には、タービンへの蒸気逆流を防止するため逆止め弁が追設される。

タービンバイパスシステムをもつプラントのタービンの起動は、中圧タービンにより昇速、初負荷をとる中圧起動方式

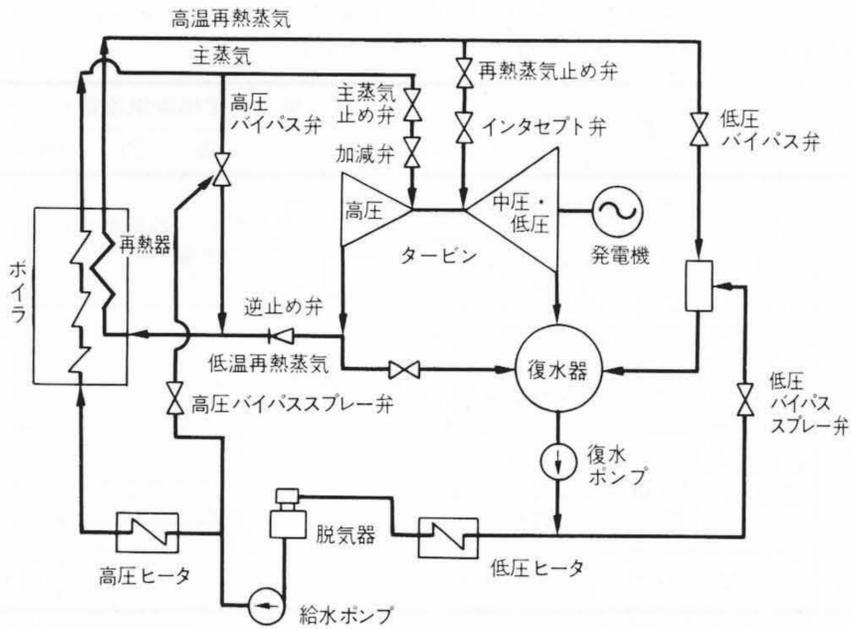


図3 タービンバイパス系統概念図 タービンバイパスシステムの基本構成を示す。

を日立タービンの標準としている。

3.3 石炭燃焼ボイラの制御技術

中間負荷石炭燃焼ボイラとして制御上の主要課題は、

- (1) 負荷追従性の向上
- (2) 運転の信頼性向上
- (3) 運転の省力化

が挙げられるが、複雑な補機操作、緩慢な応答性をもつ石炭燃焼ボイラに対してはデジタル制御技術が不可欠となる(図4参照)。

(1) ボイラ負荷追従性の向上

ボイラの負荷追従性を向上するためには、ミルシステムをもつボイラの応答遅れを改善しなければならない。このため、プロセスの変化を早期に検出してフィードバックの修正動作を早める予測適応制御手法や、ボイラの入力エネルギー(燃料)の変化に応じてボイラの入出力間のエネルギーバランスを維持させる動的バランス制御手法などが用いられる。

予測適応制御は主蒸気温度制御などに適用される。図5にその機能を示すが、これはカルマンフィルタの原理に基づき過熱器内流体の特性を物理式で表わした簡略モデルにより、まず現在の主蒸気温度を計算し、これと実測主蒸気温度との偏差に評価フィルタを加えて蒸気温度の推定値を求める。次に、同一モデルを用いてその時点のボイラ入力量に対する数分先の蒸気温度を算定し、この予測された蒸気温度をスプレー又は燃料量のフィードバック修正信号として用いることにより、蒸気温度が変化し始める初期段階で調整が可能となる。

課題	対応技術	デジタル制御技術
ボイラの負荷追従性の向上	石炭燃料系の応答遅れや外乱によるボイラ蒸気温度変動の抑制	現代制御理論に基づく予測適応制御の適用
ボイラの運転信頼性の向上	制御装置の信頼性向上によるボイラ運転の維持	制御装置の自己診断と制御機能の分散化、冗長化構成
ボイラの運転省力化	ミルを含むボイラ運転の全自動化と集中監視	自動化範囲の拡大とグラフィックCRTによる監視の集中化

注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

図4 石炭燃焼ボイラ中間負荷対応制御技術 石炭ボイラ負荷追従性、運転性能向上のためのデジタル制御技術を示す。

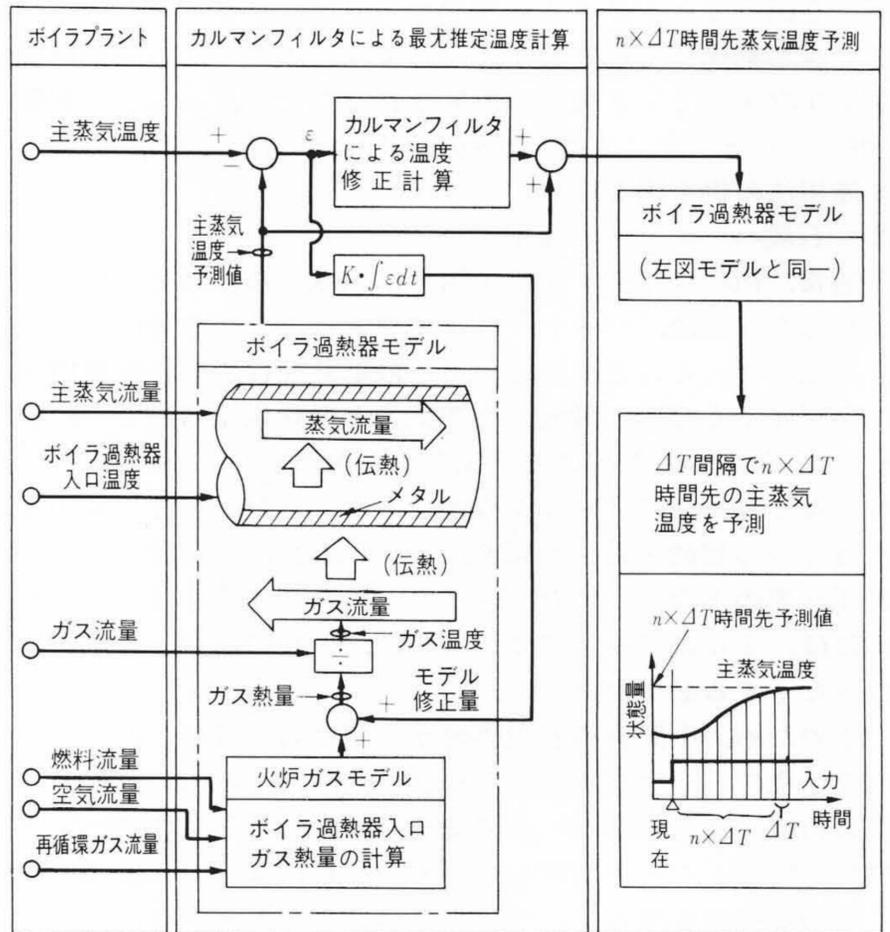


図5 カルマンフィルタを用いたボイラモデル予測手法 制御装置に内蔵したモデルを用いて蒸気温度の予測を行なう。

動的バランス制御は再熱蒸気温度制御やミル制御などに適用され、石炭の性状などに応じて操作端を先行的にオーバ(又はアンダ)操作する機能である。

これら制御手法を用いることにより、油、ガス燃焼ボイラ並みの負荷応答性3~5%/分の実現の見通しを得ている。

(2) ボイラ運転信頼性の向上

複雑なミルシステムをもつ大容量石炭燃焼ボイラでは、信頼性の高い制御装置が要求される。このため、制御装置の分散化、冗長化を図るとともに、自己診断機能を付加することを可能としたデジタル制御技術を採用することにより、システム全体の信頼性を確保することが可能となった。

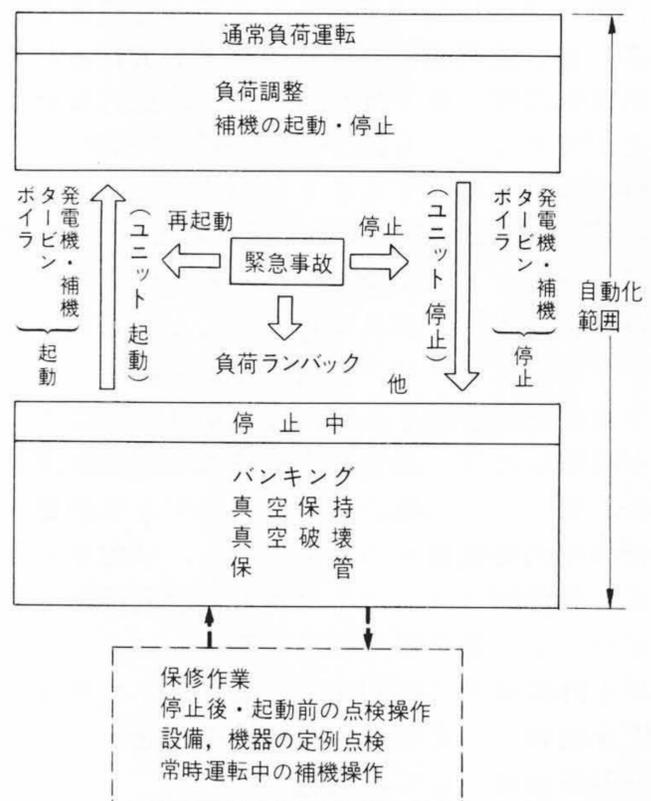


図6 自動化範囲概念図 保守作業や点検操作を除いた全範囲を自動化し、運転操作の省力化を図る。

表3 ボイラ仕様 350MWタロン発電所1～4号缶の主仕様を示す。

項目	仕様
定格出力	350MW
ボイラ形式	バブコック日立自然循環変圧ドラム式
主蒸気流量	1,047t/h
ボイラ出口主蒸気圧力	ゲージ圧179kg/cm ²
過熱器出口蒸気温度	541℃
再熱器出口蒸気温度	541℃
燃料	石炭専焼
通風方式	平衡通風
一次空気システム	コールドエアシステム
ボイラ制御装置	日立デジタルボイラ制御装置(HIACS2000)
主蒸気温度制御	二段主蒸気スプレー
再熱蒸気温度制御	パラレルダンバ
タービンバイパス容量(高圧, 低圧)	100%

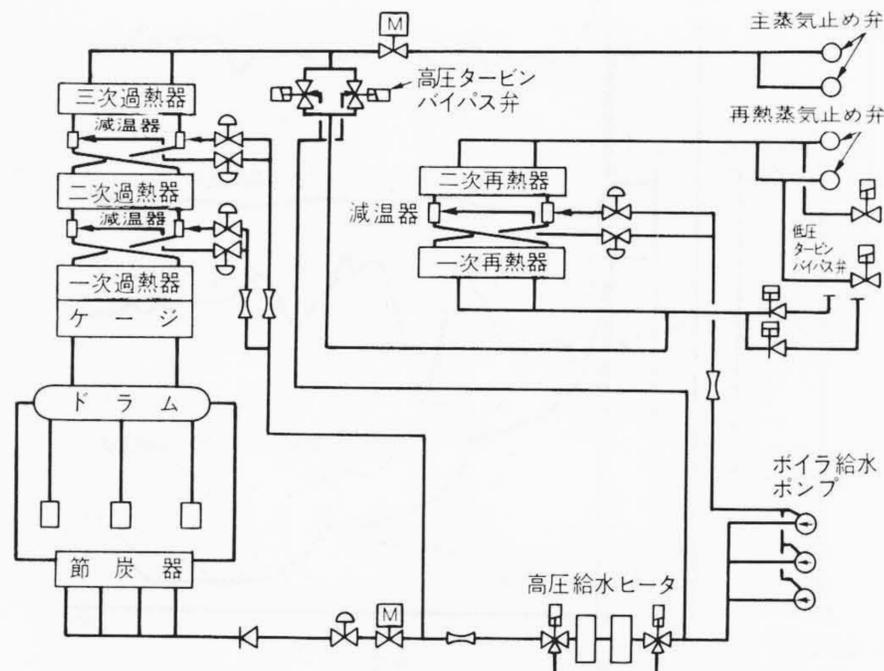


図7 水蒸気系統図 350MWタロン発電所1～4号缶の水及び蒸気系統図を示す。

(3) ボイラの運転省力化

大容量石炭燃焼ボイラを小人数の運転員で対応するためには、複雑なミル起動・停止操作、ボイラ昇温・昇圧操作などを必要とするプラントの起動・停止運転及び通常の負荷運転の全過程を自動化し、プラント運転状態を集中監視できるようにしなければならない。図6に運転操作の自動化範囲の概要を示すが、日立は操作のほぼ全領域にわたる自動化については数多くの実績をもっており、大容量中間負荷石炭火力の全自動化は可能である。

4 350MW中間負荷石炭燃焼ボイラ

4.1 ボイラ概要

オーストラリアQEGBタロン発電所1～4号缶は、タービンバイパスシステムをもつ石炭燃焼中間負荷運用ボイラである。ボイラ仕様を表3に、水蒸気系統を図7に、またボイラ

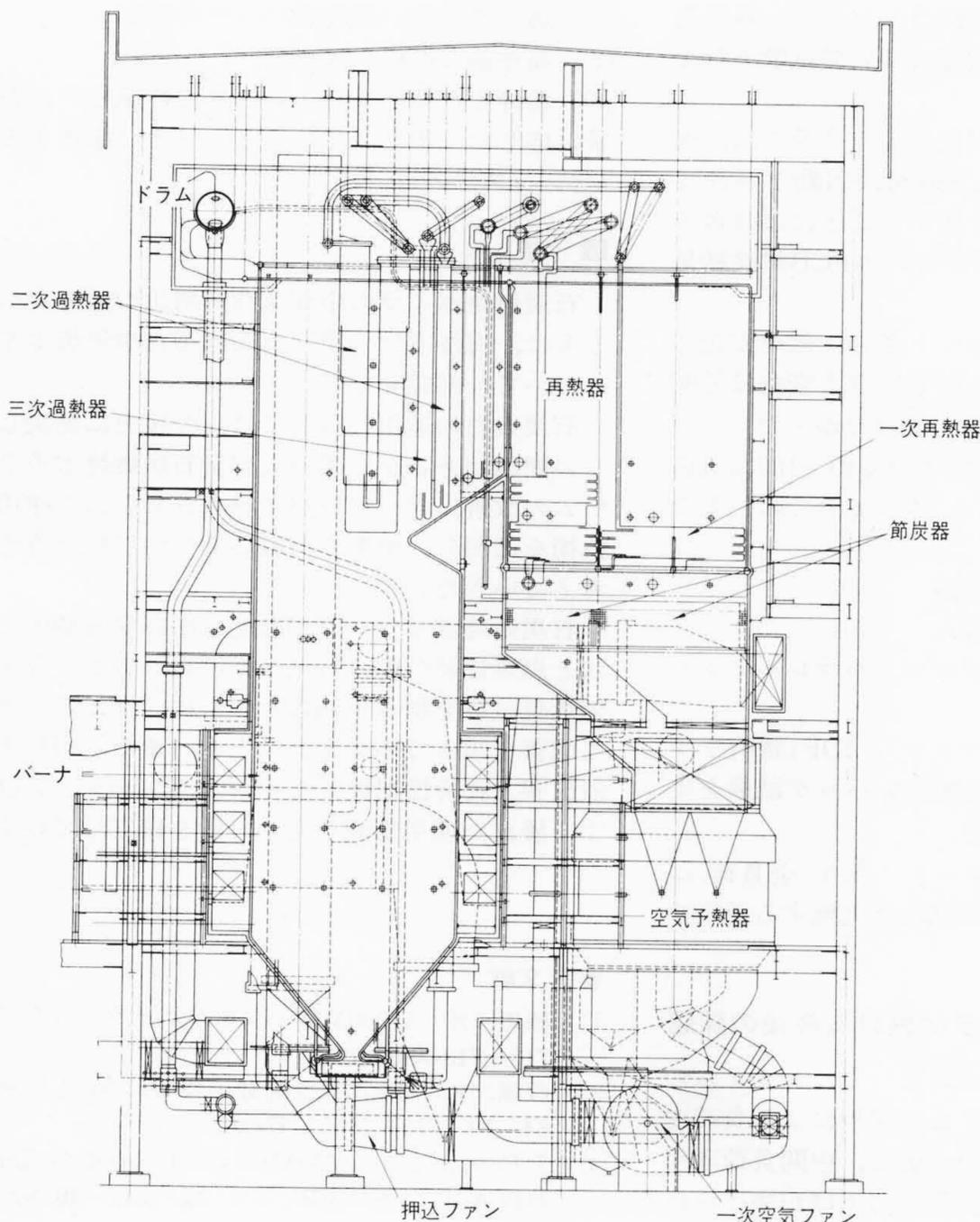


図8 ボイラ構造図 350MWタロン発電所1～4号缶のボイラ側面図を示す。

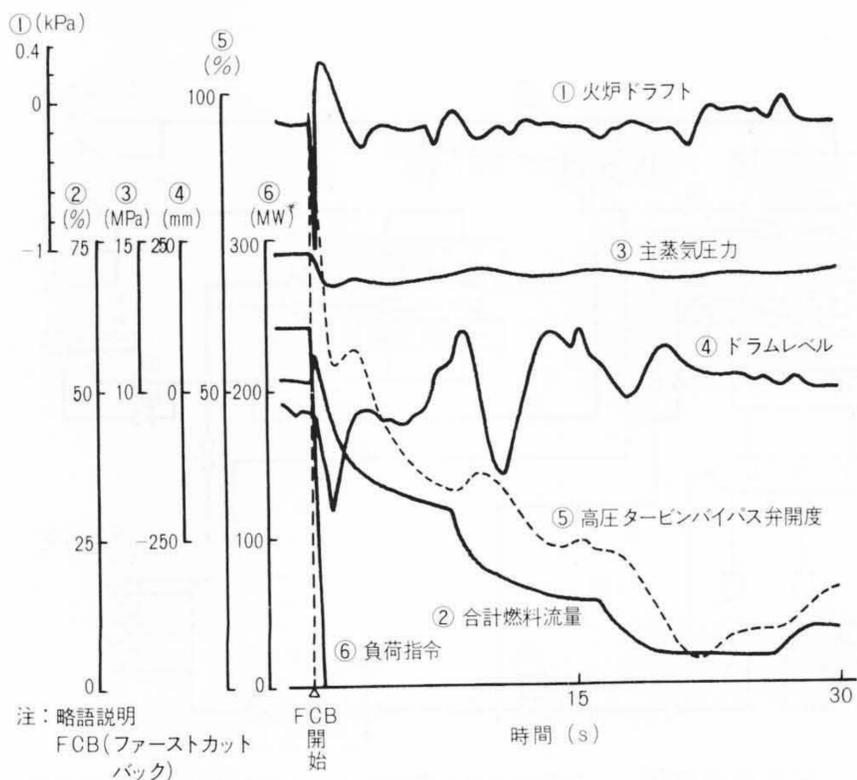


図9 FCB試験結果 350MWタロン発電所1～4号缶のファーストカットバック試験結果を示す。

構造を図8に示す。

タービンバイパスのほかに2段主蒸気スプレーによる主蒸気温度制御、パラレルダンパによる再熱蒸気温度制御、変圧運転方式の採用による部分負荷効率の向上など、中間負荷運用のための考慮をボイラ設計に種々取り入れている。

4.2 試運転実績

起動・停止試験をはじめ、FCB、補機ランバック、負荷追従試験など、中間負荷運用に必要な機能について試験を行っている。

通常平衡通風方式を採用している石炭燃焼ボイラでは、火炉インプロージョンの危険性からFCB運用は困難とされていたが、タービンバイパスシステムを用いることによりボイラ負荷を漸減させて克服した。240MWからのFCB試験結果を図9に示す。

本試験ではミル4台から2台までカットさせ、燃焼安定のために軽油による助燃を行なった。火炉ドラフト変動は約90mmAq程度の低下であり、問題となることはなかった。

本ユニットの負荷変化特性を図10に示すが、40～100%負荷で3%/分の負荷変化率を達成している。本ボイラでの主要な改良点は下記のとおりである。

- (1) オーバ・アンダファイアリング回路
- (2) 再熱蒸気温度に予測適応制御の導入
- (3) 二段過熱器スプレー、再熱器スプレー、パラレルダンパに動的バランス先行信号を付加

試運転としては、その他FDF(押込ファン)、IDF(誘引ファン)、PAF(一次空気ファン)などの補機ランバック試験を実施しており、順調な成果を挙げている。

本プラントの起動時間(ホットスタート：点火-全負荷)は70分の計画であり、今後、短時間起動試験を実施する予定である。

5 中間負荷大容量石炭燃焼ボイラにおける今後の課題

石炭火力の中間負荷運用化の要求に対し、ミルシステムの運用改善及びタービンバイパスシステムの採用による負荷変化率、起動特性の向上について述べた。更に、中間負荷運用に要求される重要な機能として最低負荷の切下げが挙げられ

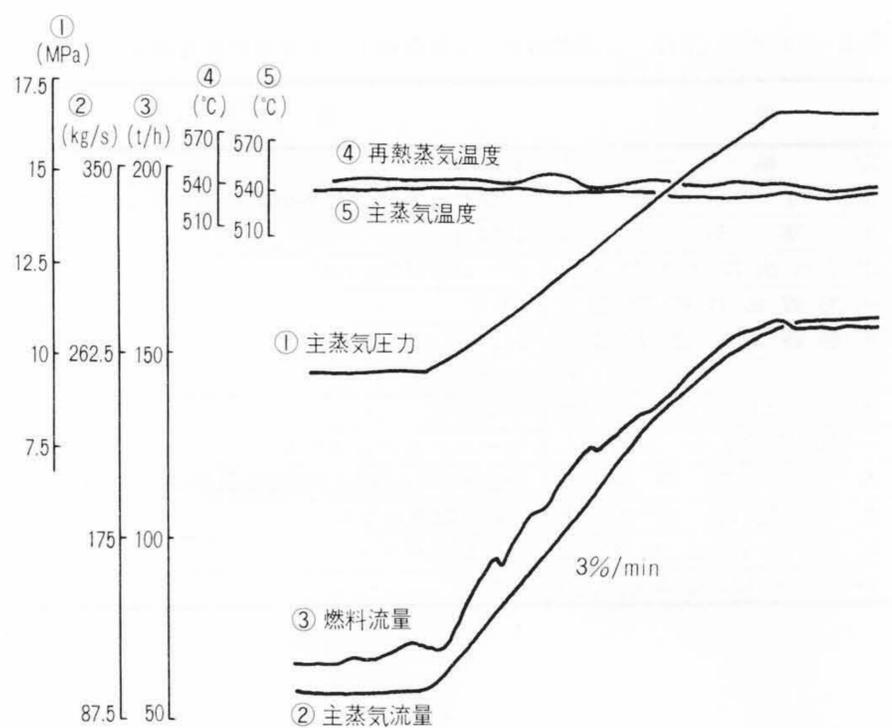


図10 負荷追従試験結果 350MWタロン発電所1～4号缶の負荷変化特性テスト結果を示す。

る。最低安定負荷は微粉炭の燃焼性に依存し、石炭性状に大きく影響され、燃料比が相対的に高く燃焼性の悪い海外炭燃焼時には35～40%程度となる。したがって、最低負荷の切下げについては石炭燃焼特有の微粉炭燃焼そのものが制限要素となっており、運用性、制御性の改善だけでは対応できない問題を抱えている。

これらに対しては今後以下の検討が必要である。

- (1) 燃焼性の良い微粉炭バーナの検討
- (2) 高性能な微粉炭設備
- (3) 粉碎した微粉炭を、いったん貯蔵ビンに蓄え、必要燃料量に応じた一次空気流によりバーナに搬送する貯蔵燃焼方式(ビンシステム)の検討

6 結 言

石炭燃焼ボイラの中間負荷運用化の対応について述べるとともに、海外向けの中間負荷運用石炭燃焼ボイラの運転実績について一部紹介した。

石炭火力の運用性改善には、今後更に解決しなければならない問題があるが、国内大容量石炭燃焼ボイラではミルシステムの改善、タービンバイパスシステムの採用及び最適制御技術を適用し、中間負荷機能をもつ石炭燃焼ボイラの計画を考えていきたい。

石炭燃焼ボイラの運用機能に影響する要因として、石炭性状と燃焼性及び環境対策が挙げられるが、今後は多種銘柄炭の燃焼試験を積み重ねるとともに、実缶でのデータを反映して改善を図っていく考えである。また、石炭燃焼ボイラの性能改善と動特性把握のためシミュレーション技術を駆使し、より優れた運用性能をもつ設計を確立していく考えである。

参考文献

- 1) 磯田, 外: 1,000MW石炭燃焼ボイラ, 日立評論, 64, 10, 713～718(昭57-10)
- 2) 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, 773～780(昭57-10)
- 3) J. Fujie, et al.: 350MW Coal Fired Boiler in Australia, HITACHI REVIEW, Vol. 33, p.41～46 No 1. (Feb. 1984)