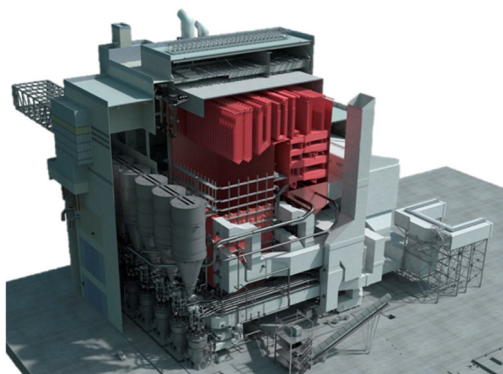


変化する汽力発電所の期待とそれを支える技術について

New Functions and Technologies of Steam Power Plant
which are Expected to Change for Recent Power Grid Necessity.



堂本 和宏*¹
Domoto Kazuhiro

石脇 稔朗*²
Ishiwaki Toshio

三田 尚*³
Sanda Hisashi

三宅 盛士*⁴
Miyake Seishi

竹ノ内 哲也*³
Takenouchi Tetsuya

武居 功一*⁵
Takei Koichi

エネルギーのベストミックスを根幹とする日本の電源構成において、再生可能エネルギー導入量の増加に伴い、電力需要や気候条件に応じた、電力の安定供給は非常に重要な課題となっている。その解決手段として、石炭焚き汽力発電所が負荷調整力を向上することで、電力の安定供給の役割を果たすことが期待されている。本報では、三菱日立パワーシステムズ(株)(以下、当社)の最新の石炭焚きボイラの負荷調整能力向上メニューについて解説し、より容易に多様な運用が可能となった最新の石炭焚き汽力発電所とそれを支える技術について紹介する。

1. 当社の最新のボイラ負荷調整能力向上メニュー

再生可能エネルギー導入量の増加に伴い、汽力発電所は、昼間は最低出力もしくは停止し、太陽光発電の出力が低下、かつ需要が増加する夕方の時間帯は出力を増加する運用が見られ始めている。本報では、汽力発電所/石炭焚きボイラが有する能力を最大限引出し、現状より負荷調整能力を向上させる改善メニューを紹介する。図1や表1に、当社の”最新のボイラ負荷調整能力向上メニュー”を示す。

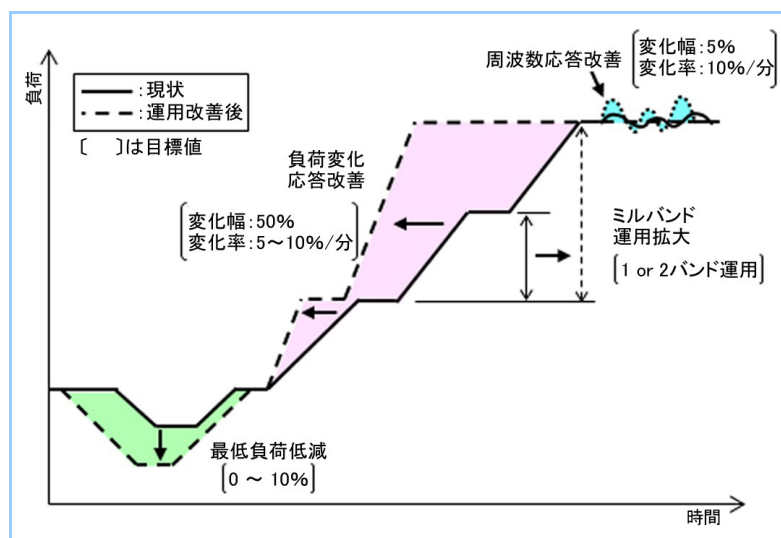


図1 最新のボイラ負荷調整能力向上メニュー

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部ボイラ技術総括部ボイラ戦略部 次長

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部プロジェクト総括部呉プラント技術部 次長

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部プロジェクト総括部電力計画部 主席技師

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部プロジェクト総括部呉プラント技術部 主席技師

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部ボイラ技術総括部ボイラ戦略部 主席技師

表1 最新のボイラ負荷調整能力向上メニュー表

■ 負荷変化向上メニュー

運用メニュー			現状	目標			主な改善メニュー	参照
周波数 応答	GF AFC	変化率	5%/分	10%/分			・オーバーロード弁 ・復水絞り	2章
		変化幅	3%	5%				
負荷変化 応答	DPC	変化率	3～5 %/分	目標①	目標②	目標③	目標① ・パラメータ調整	3.1章 3.2章
				5%/分	7%/分	10%/分	目標② ・パラメータ調整 ・ロジック改造(専用BIRロジック) ・T2制御ロジック(主蒸気温度制御向上)	
		変化幅	20～ 25%	50%	50%	50%	目標③ ・パラメータ調整(操作端/設定値の変化 レート) ・ロジック改造 ^{*1} (専用BIRロジック) ・T2制御ロジック(主蒸気温度制御向上) ・負荷変化初動対応ロジック(復水絞り機 能の活用) ・蓄熱システムの活用(開発中)	

※1 適正な制御偏差の見直し含む

■ 負荷幅向上/最適運用メニュー

運用メニュー		現状	目標	主な改善メニュー	参照
多炭種	多炭種制御	3炭種の燃焼試験	1炭種の燃焼試験	新多炭種制御	4.2章
	発熱量変動補正	手動発熱量補正 水燃比補正	運転状態からの自動補正	発熱量変動補正	4.3章
最低負荷低減		20%～15%	15～10% ～0%	低NO _x バーナ ミルモータインバータ化 蓄熱システム(開発中)	5.1章
停止・起動での熱回収		起動損失として廃熱	廃熱回収で電力に変換	蓄熱システム(開発中)	
ミルバンド運用拡大		3バンド ミル3台:30～50% ミル4台:50～75% ミル5台:75～100%	2バンド or 1バンド ミル3台:30～50% ミル4or5台:50～100% または30～100%	低NO _x バーナ ミルモータインバータ化	5.2章

2. 汽力発電所の周波数応答

電力系統の周波数変動や電力需要変動に対応できるように、汽力発電所は出力制御機能を有している。負荷変動周期と負荷変化幅により制御機能は分かれており、GF (Governor Free: ガバナフリー)、AFC (Automatic Frequency Control: 自動周波数制御)、DPC (Dispatching Power Control: 基準出力制御) に分かれている(図2)。

各制御機能は、主にタービンガバナ開度、ボイラの給水/燃料/燃焼用空気の増減等により、ボイラ/タービン/発電機が安定的に出力調整可能となっている。

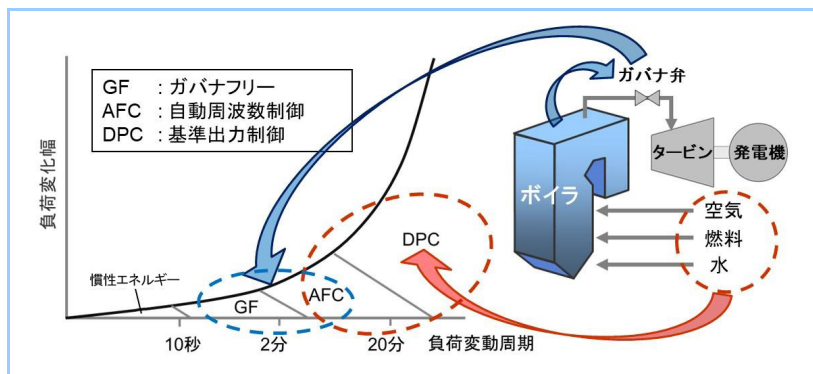


図2 負荷変動周期/変化幅と制御能力

しかし、高効率運転を重視するプラントの場合、タービンガバナは常に全開に近い状態で運転しているため、現状より負荷増加をするためには、タービンガバナ開度に制御裕度を確保することや、タービンへの蒸気流量を増加することが必要となる。その方法として、“OLV (Over Load Valve: オーバーロード弁)”や“復水絞り”が有効な手段として考えられ、図3に各方法の機能を示す。OLVは新設ユニットへの適用、復水絞りは新設と既設ユニットへの適用が有望と考えられる。

またいずれの方法においても、ボイラから安定的に蒸気量が供給されることが必要であるが、石炭焚きユニットにおいては、石炭粉碎による燃料投入遅れや石炭の燃焼性の点で、油/ガスを燃料とするユニットより難しい。次章以降では石炭焚きボイラの制御技術について主に紹介する。

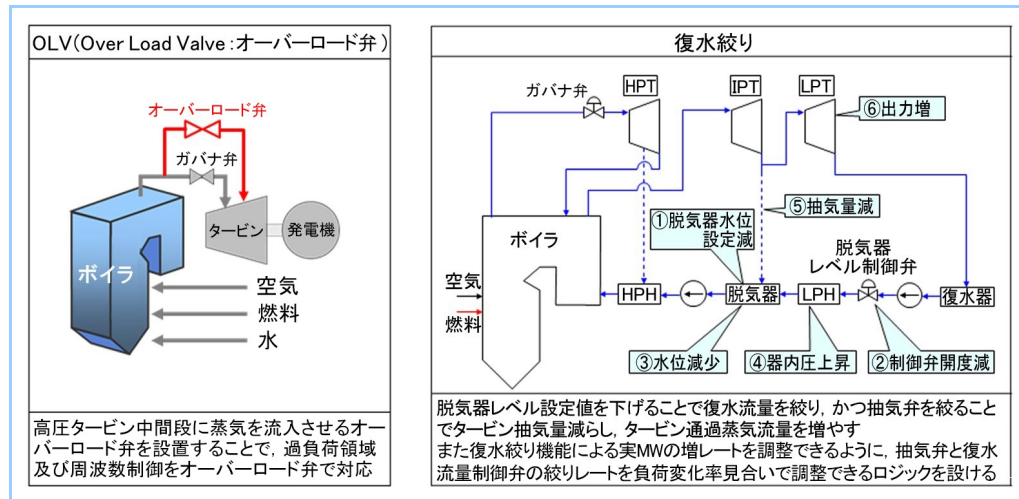


図3 高効率ボイラの負荷増加方法

3. 石炭焚きボイラの動特性の改善

3.1 動特性試験について

燃焼試験（静特性試験）の完了後、動特性試験を行う。超臨界圧変圧ボイラでは、負荷上げ時、圧力上昇に伴う飽和温度の上昇分や各伝熱面の温度上昇分だけでなく、ボイラ自体の保有熱を上昇させるために、ボイラ入力加速信号(BIR)を調整することにより、水/燃料/空気を静特性の設定値に加算して投入する。また、各制御操作端が、負荷変化に対して十分な応答性や容量が必要である。不足すれば、火炉出口の過熱度が低下し、主蒸気圧力の低下を招き、制御が発散する等のリスクがある。一方負荷下げ時は、ボイラ自体の保有熱分を考慮し、BIRにて燃料投入量を少なめに制御を行う。負荷変化率に応じてBIRのみではなく、BIR入切りの変化レートの調整や補機のターンダウンの確保が重要となる。

また、石炭焚きボイラでは、石炭を微粉炭機で粉碎するプロセスがあるため、粉碎された石炭が火炉へ投入されるまでの時間や、石炭の燃焼性を考慮した調整が必要となる。当社の高負荷変化試験の実績と、更なる高負荷応答技術について紹介する。

3.2 高負荷変化実績

当社が設計/製作/据付/試運転を行ったユニットAでは、70%から90%負荷への負荷上昇試験、及び100%から70%負荷への負荷降下試験にて5%/min (Net)を達成している。その運転トレンドを図4に示す。主蒸気温度と高温熱蒸気温度の偏差もクライテリア内であり、安定した負荷変化が達成できた。このユニットも含めた従来のユニットでは、ボイラの最終過熱器(FSH)出口蒸気温度は、水燃比(燃料流量)と2次スプレイ水で制御しており、お互いが干渉し合うため、FSH出口蒸気温度の整定が遅い場合があった。この課題を解決する為ために、次項で紹介するT2制御を開発し、実機にて効果を確認している。

3.3 高負荷応答技術の向上(T2 制御)

T2 制御の制御概念図を図5に示す。T2 制御は、水燃比(燃料流量)で火炉上部に配置した2次過熱器(2SH)出口蒸気温度を制御し、2次スプレイ水で3次過熱器(3SH)出口蒸気温度を制御させる方法であり、3SH 出口温度制御は2次スプレイに専念させた。これにより、火炉と 2SH の吸熱変化への対応力が向上し、さらに 3SH 出口蒸気温度制御の燃料とスプレイ水の干渉も回避された。図6に、従来制御による負荷変化試験実績と、T2 制御による負荷変化試験実績を示す。実機においても、T2 制御を採用したユニットの方が FSH 温度の整定が早いことが確認できている。また、T2 制御は制御系統がシンプルであるため、従来より調整しやすい利点もあり、従来よりも短時間で動特性試験の完了が可能となった。

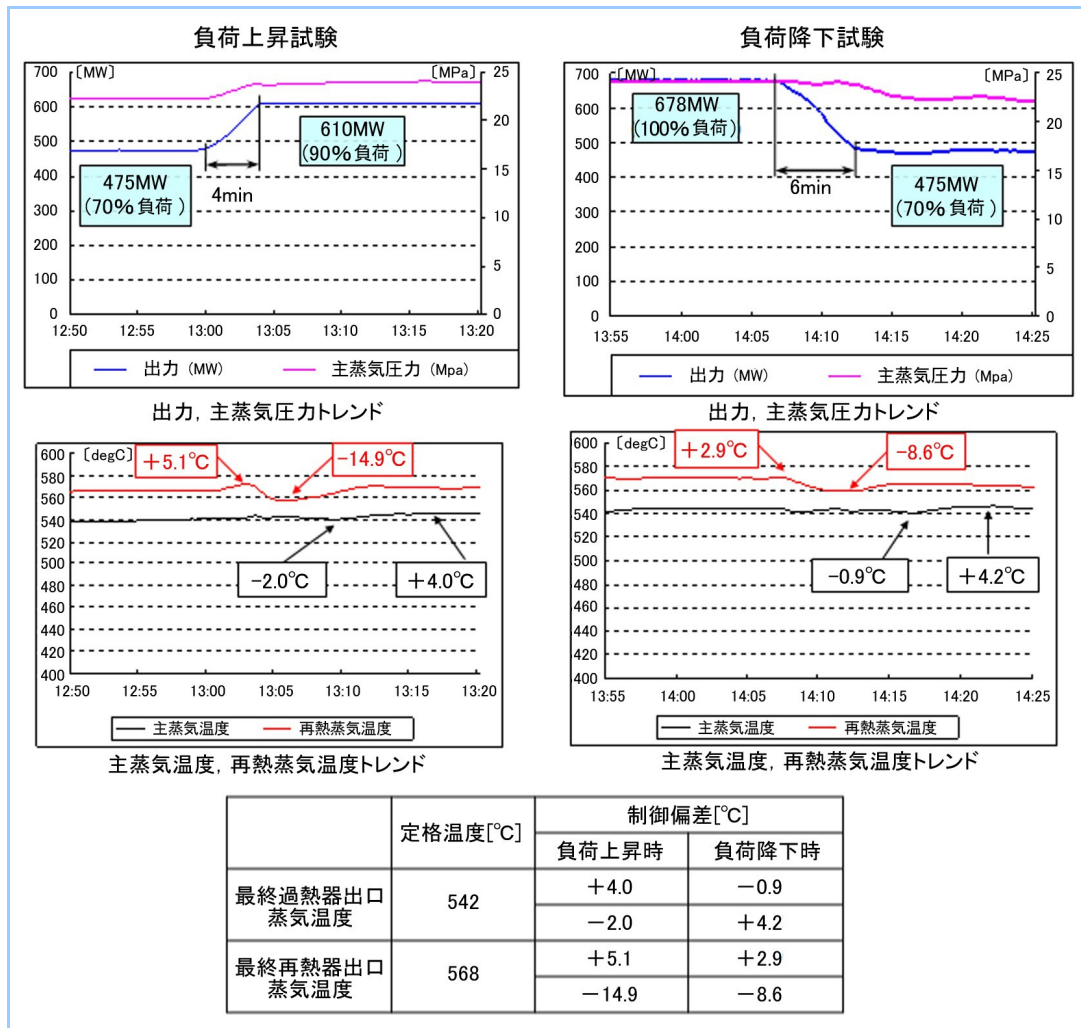


図4 高負荷変化時の対応実績

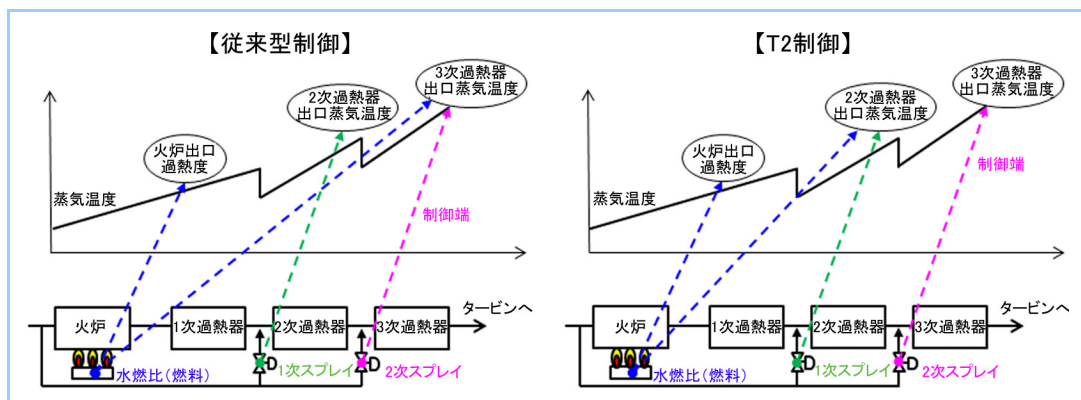


図5 従来制御とT2 制御の比較(各出口温度の制御端)

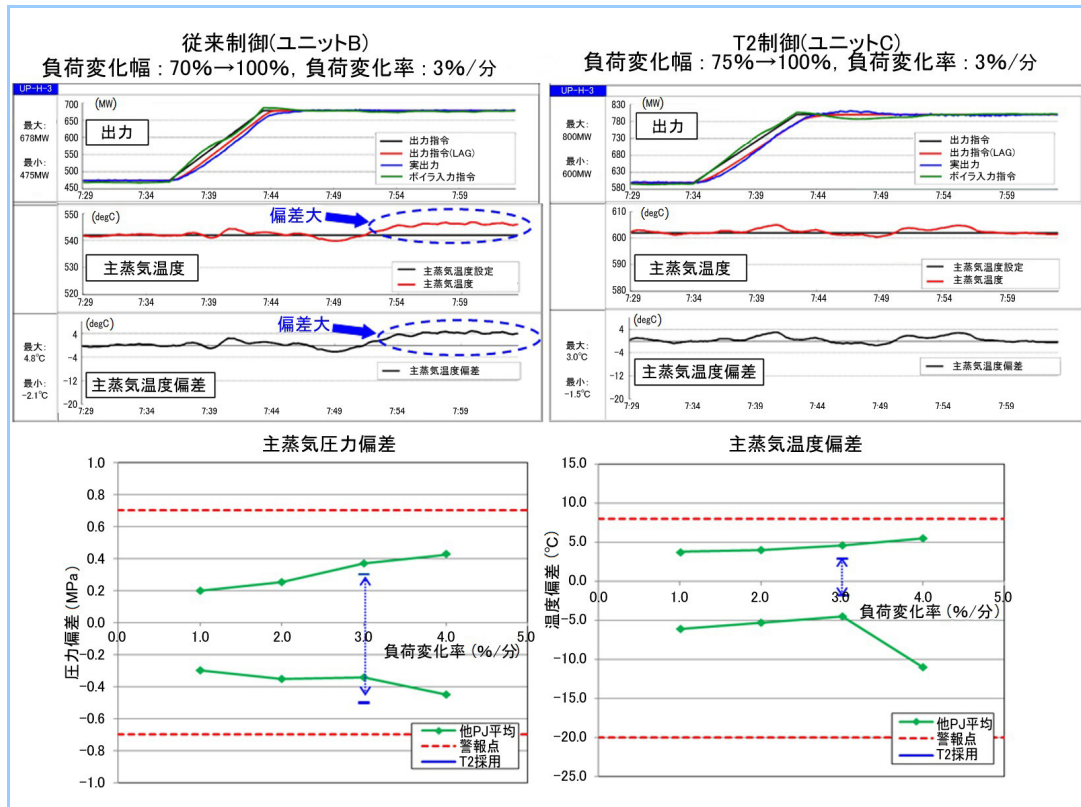


図6 従来制御とT2制御の実機実績比較

3.4 負荷変化初動対応ロジック(復水絞り機能の活用)

石炭焚きボイラでは、石炭を微粉炭機で粉砕するプロセスがあるため、粉砕された石炭が火炉へ投入されるまでの負荷変化初期は、出力指令(MWD)に対して実出力(MW)が遅れてしまう。負荷変化初期の実出力の遅れを改善するため、負荷上げ時開始直後に負荷応答性に優れている復水絞りを活用することで、負荷応答向上を図る。図7に復水絞り機能を活用した際の効果を示す。負荷変化初期は、復水絞りが主に出力増加に対応し、復水絞りによる出力が低下したところに石炭焚きボイラの出力が上昇し、負荷変化後半は石炭焚きボイラにより出力増加に対応する。この機能により、従来より目標負荷への到達が早くなる。

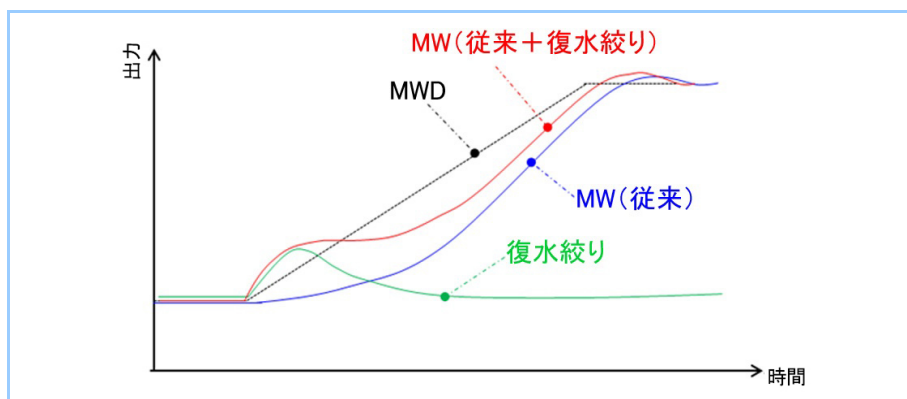


図7 復水絞りの活用による効果

4. 石炭焚きボイラの制御性の改善

4.1 ボイラの静特性について

汽力発電所の試運転では、ユニット出力一定でボイラの静特性を決めた後に、動特性の調整を行う。そのため、石炭焚き汽力発電所の制御性の良し悪しは、石炭焚きボイラの燃焼試験（静特性試験）から決まる静特性による。燃焼試験では、ボイラ効率や排ガス特性のみならず、ボイラの左右温度バランスや蒸気温度の制御性（スプレイ弁やダンパ開度）の裕度を確保することが重要な調整ポイントである。特に石炭焚きボイラでは、石炭の炭種（性状）やバーナ運用パターン等によってもボイラの性能が左右される。当社は、石炭の炭種が変わっても安定運転できる多炭種制御技術を採用している。

4.2 多炭種制御について

図8に、多炭種制御の概念図を示す。多炭種制御は、ボイラの運転状態より HAI (Heat Absorption Index) 信号を演算し、HAI 信号に応じて最適なボイラの静特性を自動で再現する機能である。また、HAI 信号から、負荷変化時の先行制御や負荷変化後の設定を自動で判別し、調整する。この多炭種制御の HAI 信号は、制御ロジック上に伝熱モデルを持ち、伝熱モデルで計算された収熱比（ $=2RH \text{ 収熱量} / WW \text{ 収熱量}$ ）を用いて正規化された HAI 信号を導入している。しかし、この伝熱モデルは複雑であり、多炭種制御の調整を困難とする一因であった。また、これまでの多炭種制御は、試運転期間中に3炭種（高・中・低燃比）の燃焼試験結果をもとに多炭種制御の設置値を決定してきた。その為ため、1炭種の調整時間に比べて約3倍の時間が必要とされたのが課題であった。調整期間を短くするため、ボイラの性能計算より設定値を理論的に作成し、試運転では標準炭1炭種の理論値と実測値のズレを確認し、他の炭種の設定値へ反映させる新多炭種制御を現在開発中である。なお、この新しい多炭種制御が確立できれば、これまで多炭種制御が導入されていないボイラにも容易に多炭種制御を組み込むことが可能となる。

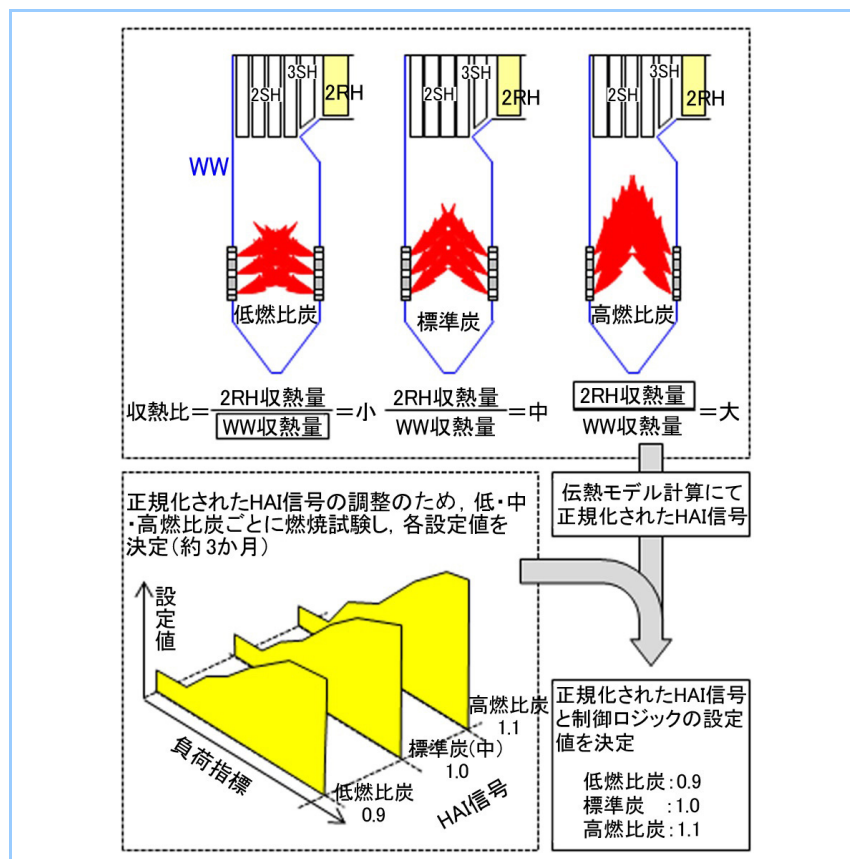


図8 多炭種制御の概念

4.3 発熱量変動の補正について

石炭は銘柄によって発熱量が異なるため、石炭焚きボイラは石炭の発熱量変動を避けられない。従来、お客様にて石炭の発熱量を把握し、全てのバンカーが均質な石炭になるように運用し、お客様が手動にて発熱量補正を実施頂いてきた。また、同一石炭銘柄内での発熱量の変動は、蒸気温度制御を行う水燃比補正が0(ゼロ)になる発熱量設定が、その時の発熱量の真値であるとの考え方に基づき、水燃比補正量に応じて発熱量を補正した。従来から、これを自動で行う機能を具備していたが、蒸気温度偏差⇒水燃比⇒発熱量補正は、応答性が遅いという課題があり、高速化を狙って発熱量補正の制御ゲインを強め過ぎると、水燃比による補正とハンチングする恐れがあるため、非常にゆっくりと補正をかける必要があった。

発熱量変動に対する補正の対応を早めるため、ボイラ効率の算出式の関係から、常時発熱量を算出し、“制御上の発熱量”と“算出の発熱量”にズレが生じた場合、発熱量補正を加える方式に見直した。図9に示す改善した発熱量補正プログラムを適用した際の発熱量シミュレーション結果では、発熱量が変動しても自動的に補正されることが分かる。また、図10に示す改善した発熱量補正プログラムを適用した際のボイラ系統シミュレーション結果では、素早く発熱量補正する事により、水燃比を適正な範囲(上・下限値に抵触させない)に保ちながら制御を継続出来ることで、2次過熱器出口温度や過熱度の上昇を抑制させる事が可能となり、安全で、安定したボイラ制御を実現している。

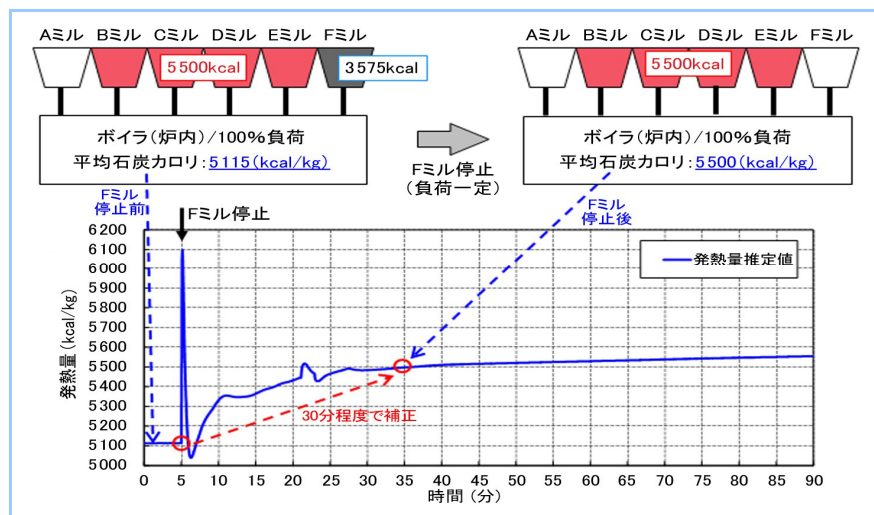


図9 発熱量変動補正回路の改善

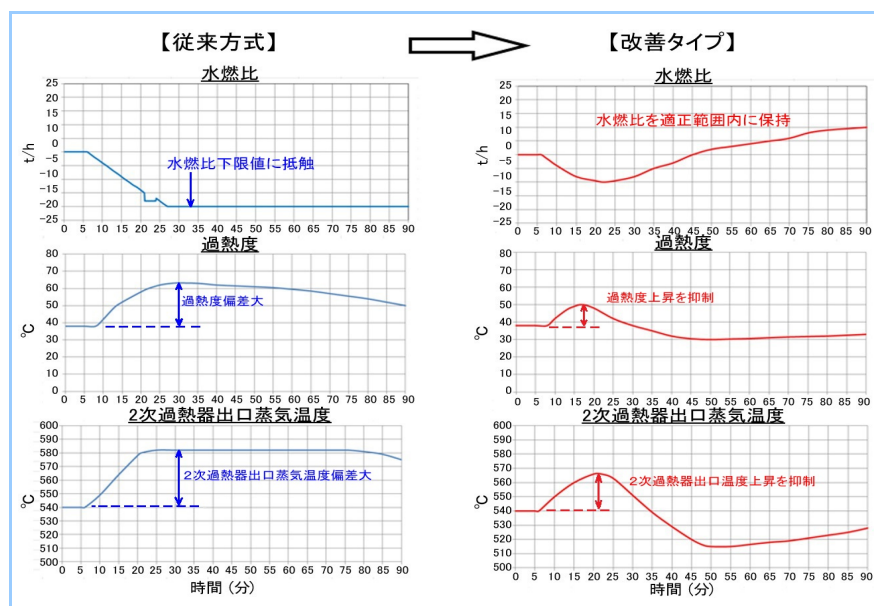


図10 発熱量変動補正回路による蒸気温度制御

5. 石炭焚きボイラの負荷変化幅改善

1ユニット当たりの出力が大きい石炭焚きユニットの負荷変化幅の拡大や、ロングレンジでの負荷変化は、ユニットの調整能力を更に向上させることになる。本章では、石炭焚きボイラの負荷変化幅の改善技術として、最低負荷引下げとミルバンド運用見直しの技術について紹介する。

5.1 最低負荷引下げ

最低負荷引下げの課題として、バーナの着火/燃焼安定性、ミルのターンダウン引下げ、排ガス環境値への対応が主な項目である。バーナの対応として、旋回燃焼向けに M-PM バーナ、対向燃焼向けに NR3 バーナを開発済である。M-PM バーナと NR-3 バーナの概念図を図 11 に示す。また、当社の燃焼試験炉による、M-PM バーナの最低負荷試験結果を図 12 に示す。バーナ負荷 20%での安定着火を確認した。ミルについては、ミルモータにインバータを採用することで、ミルの運転最低負荷を下げ、ミル運用範囲を広げることが有効な手段の一つである。

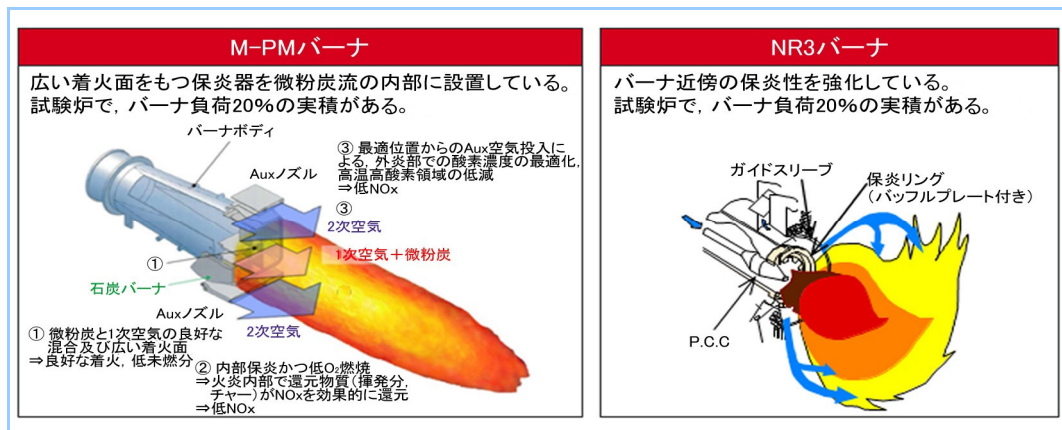


図 11 当社の最新鋭石炭バーナ

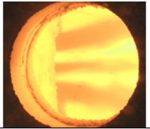
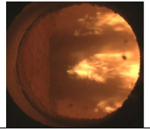
バーナ着火状況 (試験炉)			
バーナ負荷	100%	50%	20%
ボイラ負荷	100%	30%	8%

図 12 試験炉における M-PM バーナ最低負荷試験結果

また、蓄熱システムを活用することにより、ボイラ最低負荷とタービン所要負荷の差としての余剰な熱量を発電機出力が必要となる時間に電力に変換することが可能となる。このような所謂“揚水的”な機能を持たせることで最低負荷を引き下げることの一つの方策であると考えられる(開発中)。この蓄熱システムの運用を停止、起動時に拡大すれば、従来タービンを経由せずに復水器に廃棄していた熱量(主に起動損失)も電力に変換することが可能で、条件次第では相対値で1～3%程度の燃料入熱の節約が見込める。又、起動時燃料の重油と石炭の価格を考慮すれば更に燃料費用の節約も期待できる(図 13)。

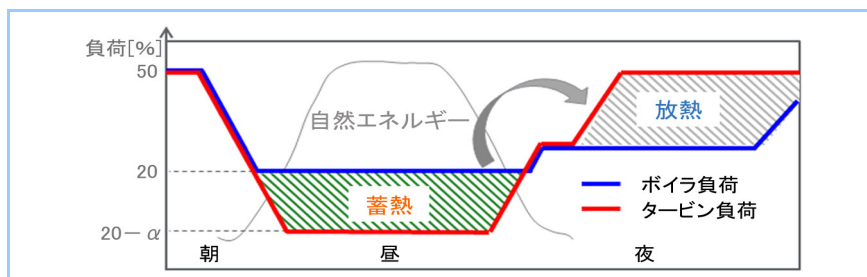


図 13 ボイラ負荷とタービン負荷の差の熱量を蓄熱して電力変換するイメージ

5.2 ミルバンド運用の見直し

従来の石炭焚きボイラでは、貫流運転の範囲はボイラ負荷 30%～100%と広いが、ミルの運転負荷を考慮して、ボイラ負荷 50%や 75%で一度負荷変化を停止し、ミル入切りが必要であった。その都度、30 分間程度の負荷整定が必要であり、これだけでも負荷変化が1時間程度遅れることになる。図 14 にミルバンド運用とボイラ負荷/ミル負荷の関係を示す。

この課題の対策として、図 15 に示すミルモータの容量 UP やインバータの適用により、ミルの運用範囲を広げ、ミル入切りに伴う整定時間をなくすことが有効な手段の一つと考えられる。この場合、バーナの最低負荷も引き下げも必要となるが、M-PM バーナや NR3 バーナを適用することが有効な手段の一つと考えられる。

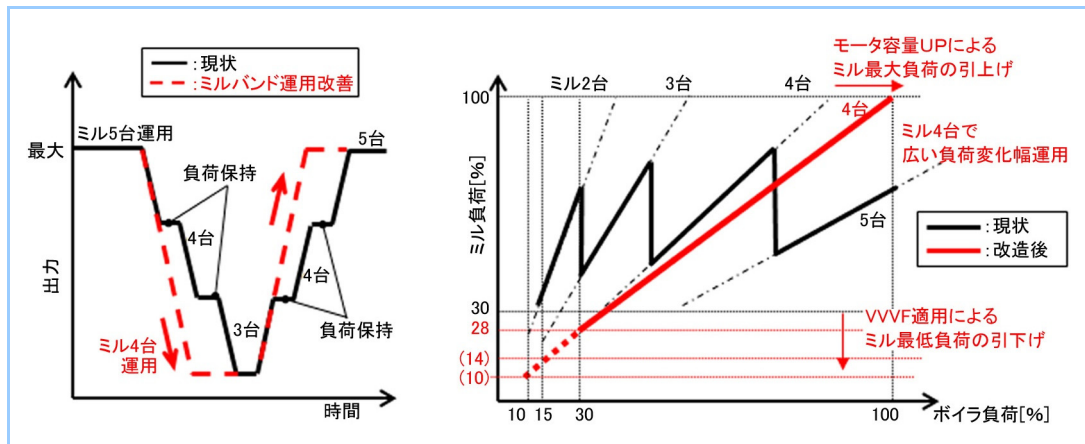


図 14 ミルバンド運用見直しによる運用性改善例

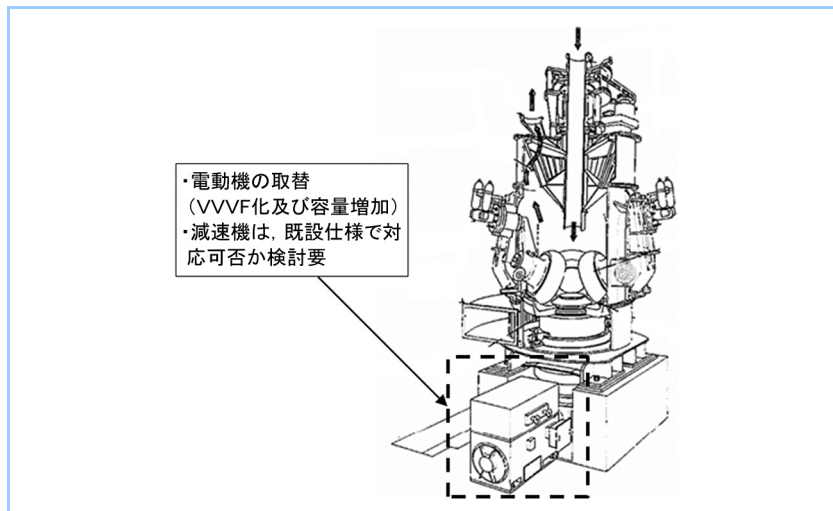


図 15 ミルバンド運用見直しに伴う主なミルの改造
(※既設ミル仕様により、改造範囲が異なる可能性がある)

6. まとめ

汽力発電所の負荷調整能力や、現在も進められている運用性改善技術について本報で紹介した。再生可能エネルギーの導入増加に伴い、再生可能エネルギーの出力抑制が現実に行われ始めている。汽力発電所が更なる負荷調整力を増すことで、電力の需要と供給のバランスが取れた安定した電源の提供や効率運転による経済性向上等のエネルギーのベストミックスの本来のニーズにも応えられると考えられる。今後も、お客様の多様なニーズや困りごとに対応できる技術の開発に努めていく。