

ボイラ燃焼制御最適化の実現

Realization of Boiler Combustion Control Optimization

松迫 淳也^{*1} 中山 文太^{*1} 菅井 康平^{*1}

MATSUSAKO Junya NAKAYAMA Bunta SUGAI Kohei

1. はじめに

我々にとって電気は必要不可欠なものである。多くの発電設備が世界中で稼働しておりその方式は化石燃料を使った火力、自然エネルギーを利用した水力や太陽光、さらには原子力を利用した発電方式がある。中でも発電量の調整が比較的容易でありその価格の安さから火力発電がわが国だけでなくおよそ8割を占めている。しかし近年、火力発電は他の発電方式と比較しCO2排出量が多いため、いかにして効率の良い発電を行うかということに各社とも試行錯誤している現状である。

ここでボイラ制御に着目した。制御パターンにはボイラ追従、タービン追従、協調制御の3パターンがあるがここではそれぞれの詳細説明は省略し、現在主流である協調制御を前提とする。協調制御ではボイラ出口圧力を一定に保つよう投入燃料量を決定するが、燃料性状の変化や伝熱面の劣化などの外乱によりボイラ周りの熱量は常に変動しているためボイラ出口圧力が変動する。その圧力変動をいかに抑制するかが課題である。

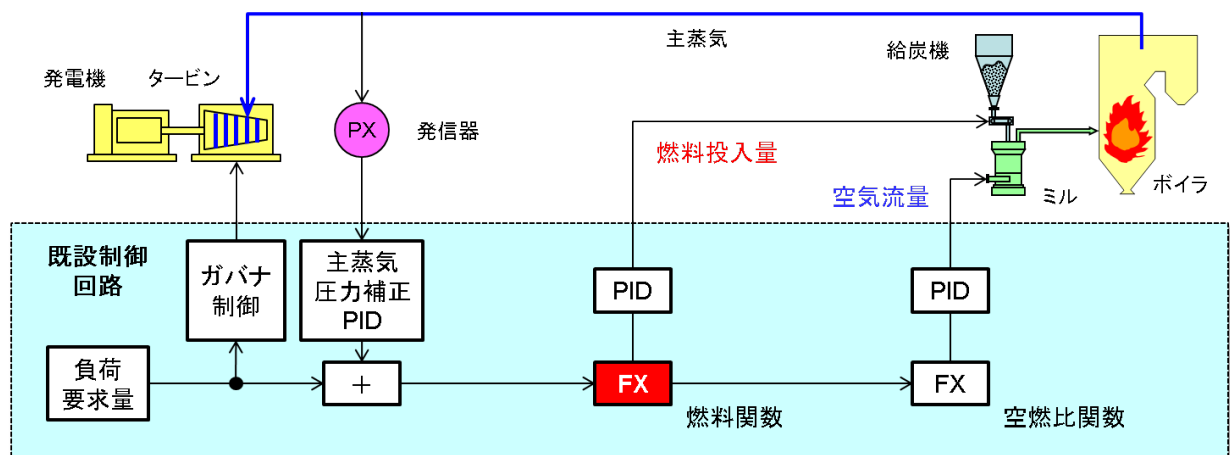
我々はその課題に対しボイラマスタ制御へのアプローチにより解決でき、それだけでなくボイラ出口圧力が安定することで燃料削減にもつながることを見出した。具体的な手法については後述するが主として、ボイラ要求量(発電機出力や主蒸気流量)とそれに主蒸気圧力補正量を加えたボイラマスタ信号の2点を用い、係数を1点ボイラマスタ信号へ乗算するというシステムである。これを製品化したものをULTY(アルティ)と名付けた。

ULTYの特徴は、LNG専焼以外のいかなるボイラへも接続が可能であり、コンベンショナル、CFB(Circulating-Fluidized-Bed)、超々臨界圧貫流ボイラ(USC)などタイプを問わない。また、DCS(Distributed-Control-System)メーカーを問わず後付けも可能である。さらにスイッチによる既設制御とULTY制御の切り替えが可能のため効果検証が容易であるなど、国内外のULTY稼働中プラントは87基である。もっとも、導入プラントにおける平均燃料削減率はおよそ1.0%でありこれは石炭焚き事業用発電プラントにおいて年間約1億円分以上の削減を意味する。本書はULTYによるボイラ制御の改善手法および燃料削減に至るプロセスについて解説する。

2. 火力発電ボイラについて

2.1 ボイラ制御概要

ボイラは、給水、燃料、空気から蒸気を生成する設備でありその基本的な制御は、ボイラで生成される主蒸気の圧力を規定値に整定させるボイラマスタ制御である。ボイラマスタ制御は、発電要求量・発電量・主蒸気流量などから生成されるボイラデマンド信号を先行信号とし、ボイラへの燃料投入量を決定する燃料関数により求められた燃料投入量に係る燃料をボイラに供給し、発生した主蒸気圧力を測定して、これと予め設定された主蒸気圧力との差分に基づいてPID(Proportional-Integral-Differential)制御によってフィードバック補正量を求め、これを負荷要求量に加算してボイラへの燃料投入量を補正するという制御が一般的に行われている。このボイラマスタ信号から燃料関数、空燃比関数を通じて燃料投入量および空気流量を決定する。つまり、ボイラマスタ制御がボイラ全体を制御する根源ともいえ、その制御の安定化がボイラ燃焼の効率に大きな影響を及ぼす(Fig.1)。



【Fig.1】火力プラントの制御概要図

2.2 ボイラ制御の課題

いかなるボイラでも建設当初は安定した運転となるが、経年劣化やその他の外乱が蓄積されてくると、石炭ボイラでは、燃料性状（水分、発熱量など）の変化、炭種の切り替わり、灰付着による伝熱面の汚れ、気温・水温の変化などにより、常に運転状態が変動、燃焼特性が変化し、ボイラマスタ制御が次第に不安定化し、燃焼効率が下がる（Table 1）。ボイラ設備に係る諸因子、例えば、燃料性状や発熱量、火炉汚れ、スーツブロワ、気水温などによる影響により、ボイラの運転状態、特に、主蒸気圧力に変動が生じる場合がある。この因子による影響は、通常ボイラマスタ制御により主蒸気圧力を補正し、変動を安定化させようとする。しかし、それでも主蒸気圧力補正量のみでは、この変動を抑える技術には限界があり、また微調整にも手間がかかり過ぎるために常時特性変化を捉えるには不十分だった。

本来これらの不安定要素を解消する既設制御の課題について着目したので次項に述べる。

Table 1 Factors that make combustion unstable

No.	Factor
1	Difference with designed fuel(Properties,Moisture)
2	Load Fluctuation, Disturbance
3	Temperature(Water or Air)
4	Mixed Burning Rate
5	Boiler Aging

2.2.1 主蒸気圧力補正PIDゲインの課題

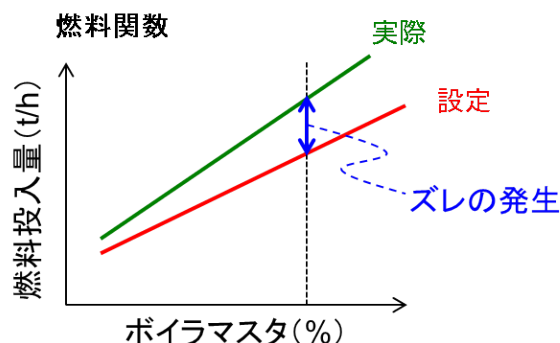
熱容量が大きい石炭焼きボイラは、燃料投入後の入熱が主蒸気圧力に反映されるまでの遅れ時間が長いことが多く、燃料投入から主蒸気圧力の変化まで時間を要する。故に主蒸気圧力補正量は、この時定数に影響されやすいため、本来の燃料流量制御（ボイラマスタ制御）では主蒸気圧力PIDゲインを大きくして、主蒸気圧力変動に対する燃料投入量の追従性を向上させる必要がある。

しかし、経時的な運転状態変化も大きいので、PIDゲインを高く設定しているボイラの場合、高発熱量の燃料を燃焼させた場合などにハンチングを誘発するなど、圧力補正自体が主蒸気圧力の変動を誘発してしまいさらなる変動を誘発することになる。

2.2.2 既設の燃料換算関数の課題

燃料関数は、先にも述べたようにボイラマスタ信号から燃料流量指令値を算出する関数である（Fig.1）。この燃料換算関数パラメータは、試運転調整時の基準燃料熱量（設計炭発熱量）および、その時点でのユニット効率をベースにプロセス応答モデルを作成し無駄時間・時定数・ゲインを導いて最適な制御パラメータでチューニングされている（Fig.2）。このモデルとボイラ特性が合致しているほど制御パラメータが上手く機能していくことでボイラの安定化を図る。しかし、炭種（熱量など）の変更・伝熱面の経時変化などの影響により、設計時のボイラ状態とはかけ離れた状態へと常に変動

し続け、結果的には、設定値と実際の値にはズレが発生する(Fig.2)。この燃料関数のズレは、燃料投入量や主蒸気圧力の偏差を生み、変動の拡大を誘発することになる。



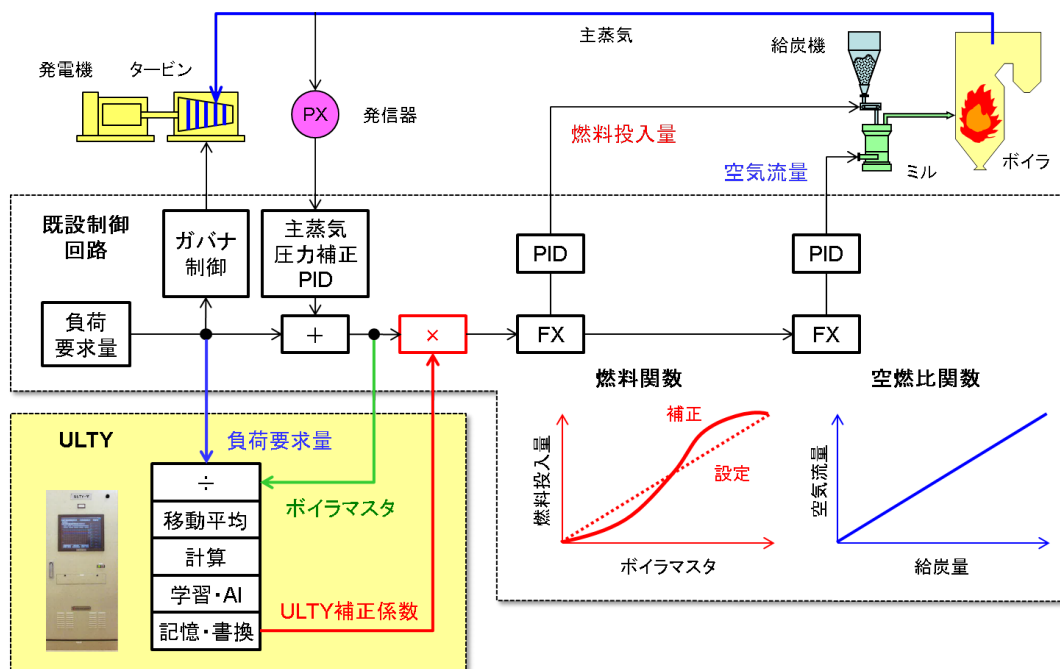
【Fig.2】 燃料関数に於ける実機と設計点のズレ

3. ULTYの制御概要について

3.1 ボイラ制御概要

これまで述べてきた主蒸気圧力PID制御部と燃料関数の課題について、設計当初の良好な制御性を維持させるには、変化するボイラ特性に応じて制御パラメータを最適化していく必要があるが、そのためには外乱の影響を精密に分析する必要があり難解な課題が山積する。このボイラ制御上の課題を解決すべく、長年、発電プラントのエンジニアリングで培ってきた技術力を基盤とし、日本製鉄(株)殿と共同で開発した装置が、ボイラ燃焼制御最適化システム「ULTY (アルティ)」(以下、ULTYと称する。)である。

最大の特長は、既設の制御回路の「負荷要求量信号若しくは主蒸気流量信号」および「ボイラマスタ信号」の2点のアナログ信号のみをULTYに取り入れ、ULTYからの出力信号(以下、補正係数と称す)をULTYへ取り出すボイラマスタ信号の直後に乗算するのみで、補正制御を行うという点である(Fig.3)。



【Fig.3】 既設制御とULTYとの接続

本制御技術は、負荷要求量信号とボイラマスタ信号の関係から弊社が独自で開発したプログラムを利用して指標化することで、リアルタイムにボイラ燃焼状態を判断し、最適制御状態を維持させるべく演算、学習し得られた補正係数を既設ボイラマスタシステムの回路に乗算させ、ボイラマスタ信号を常時補正する制御システムである。これにより石炭発熱量の変化、負荷変化、ボイラ設備の経年劣化などによる主蒸気圧力の変動抑制および、これに起因するボイラマスタの

変動を抑制し、過剰な燃料供給を抑え、ボイラマスタ制御の安定化を実現。常に最適な燃焼状態で運転することが可能となった。

また、開発当時から改良を重ね、現在ではあらゆるメーカーの計算機に接続可能であり、導入可能ボイラは天然ガス焚き以外の全種類の燃料のボイラ、そして石炭焚きの場合には微粉炭燃焼方式・流動床燃焼方式のいずれにも対応でき、USCにおける効果検証も行ない燃料削減率が達成されることを確認した。このように非常に汎用性に優れたシステムである。

3.2 主蒸気圧力偏差PIDの解消加速

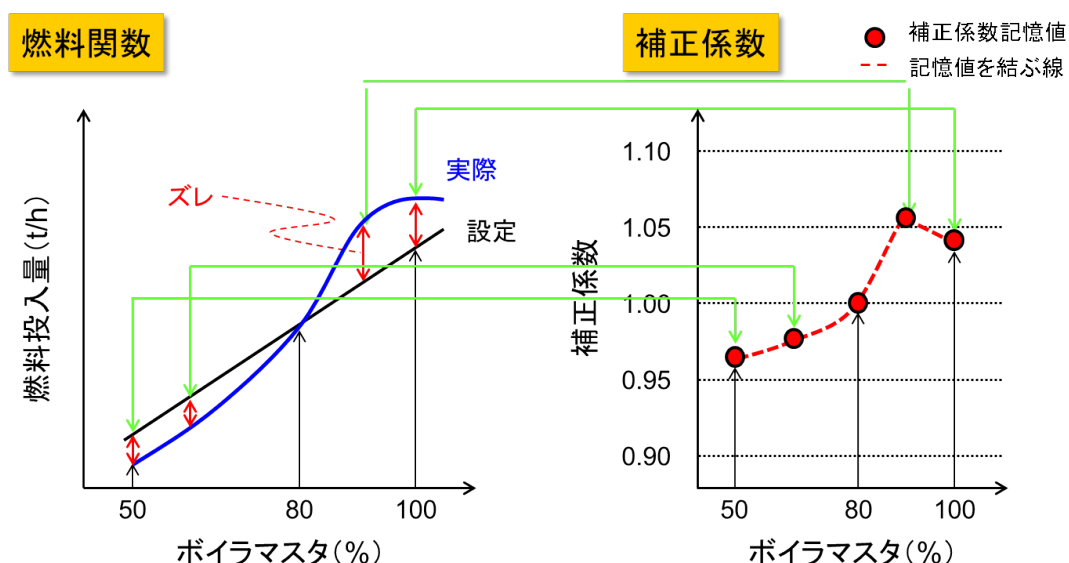
ULTY補正係数は主蒸気圧力の変動に合わせ、燃料挙動を加速させることが出来る。そのため、状況に応じたPIDゲインの増幅が可能となる。

例えば、主蒸気圧力が上昇した場合、既設の主蒸気圧力PIDは上昇した圧力を抑制するため燃料量削減動作をする。その時に、ULTYは燃料投入量を削減する方向へ加速させる。その結果、圧力上昇後の圧力収束が改善する。一方で、主蒸気圧力が低下した場合、既設の主蒸気圧力PIDは下降した主蒸気圧力を回復するため燃料量増加動作をする。その時に、ULTYは燃料投入量を増加する方向へ加速させる。その結果、圧力下降後の圧力収束が改善する。

これまで運用上の制約と定数設定の問題により常に最適な主蒸気圧力偏差PIDの設定にすることが出来なかった場合においても、ULTYの制御により、主蒸気圧力補正PIDゲインを適正にさせ、従来よりもプロセス変動幅を小さくし、プロセス挙動の安定を早める。

3.3 燃料関数の補正

ULTYは、燃料換算関数設定値と実機とのズレを、各運用負荷帯において補正し、常時記憶・書き換えし続けることで、実機曲線を実現する。例えば、負荷変化時にはULTY記憶値のカーブ上を推移するため、実機に適した負荷変化が可能となる。また、負荷変化到達後の負荷一定時には、随時補正係数の更新を実施し、実機に適した状態を提供する(Fig.4)。随時補正係数の更新を実施するので、例え負荷が変化しようとも、実機に適した状態を提供することができる。



【Fig.4】 ULTY補正のイメージ

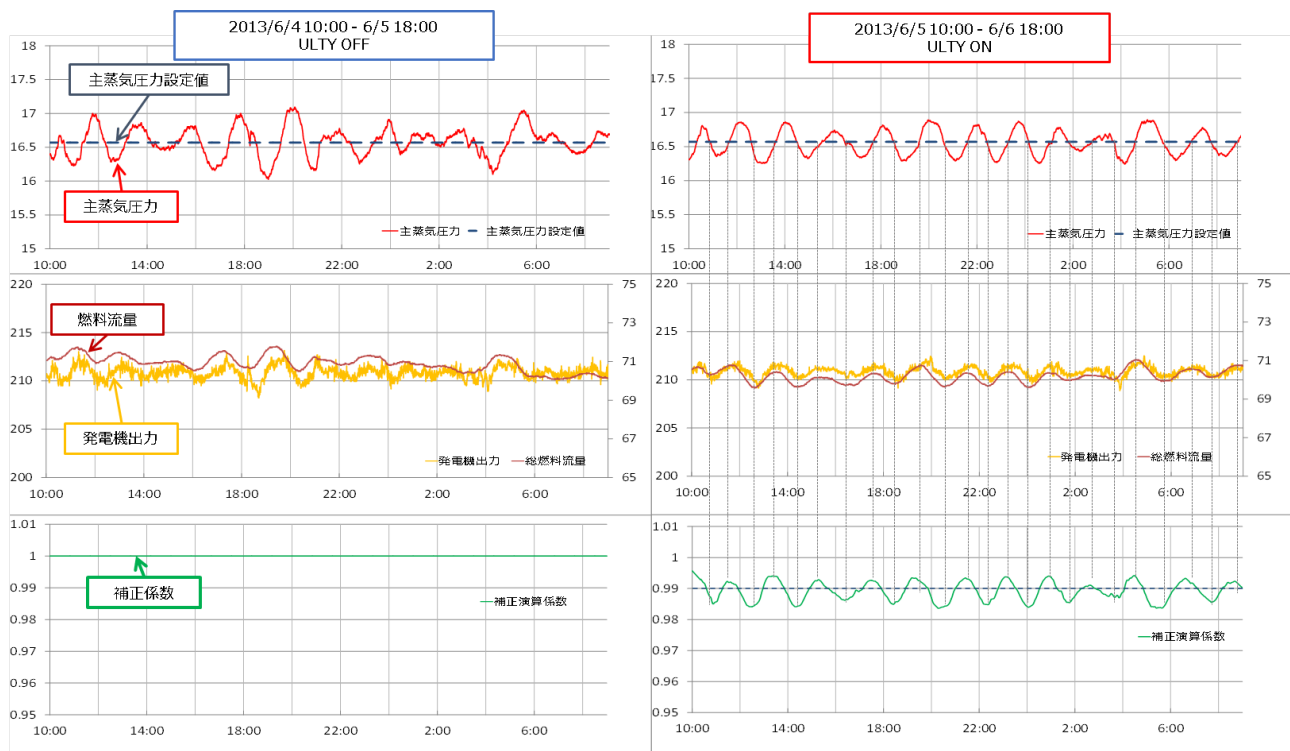
4. ULTY導入効果

ULTYを導入することにより、①主蒸気圧力の安定 ②燃料流量の低減 の効果を期待することができる。

4.1 主蒸気圧力の安定

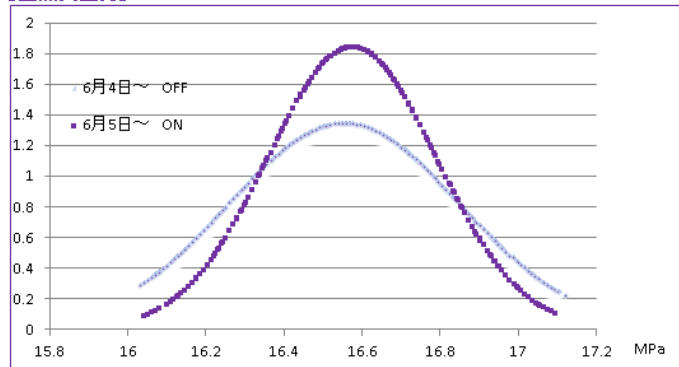
ULTYの制御効果により燃料投入量が最適化されると、燃焼状態が安定するためボイラから生成される主蒸気圧力も同様に安定する。実際にULTYを導入頂いた御客様(E社/216MW/石炭焚き)のボイラデータを用いて、プロセストレンド図示した(Fig.5)。Fig.5は、左側がULTYを除外した時のデータであり、右側がULTYの制御時のデータである。ULTY制御時は、除外時よりも主蒸気圧力の変動幅が小さくなっていることが確認できる。

また、主蒸気圧力の確率密度を示す(Fig.6)。導入後では主蒸気圧力設定値付近に主蒸気圧力の中心が近接し、導入前に比べ裾野が狭まると共に確率密度が高くなり、主蒸気圧力が安定していることがデータ上からも確認できる。



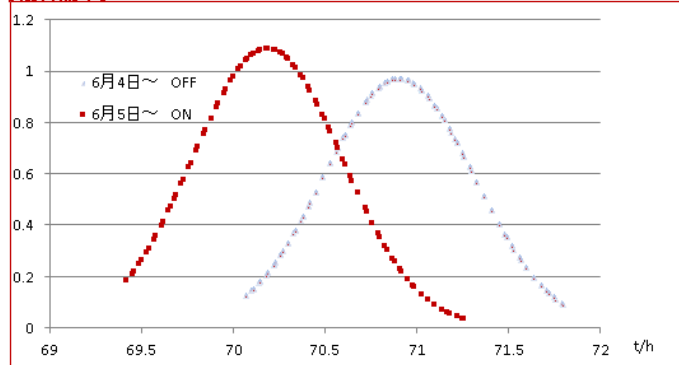
【Fig.5】 ULTY効果1

【主蒸気圧力】



日付	2013年6月4日	2013年6月5日
ULTY	OFF	ON
時間	10:00~翌9:00	10:00~翌9:00
主蒸気圧力 平均 μ [Mpa]	16.5550	16.5765
主蒸気圧力 標準偏差 σ [Mpa]	0.2969	0.2161

【燃料流量】



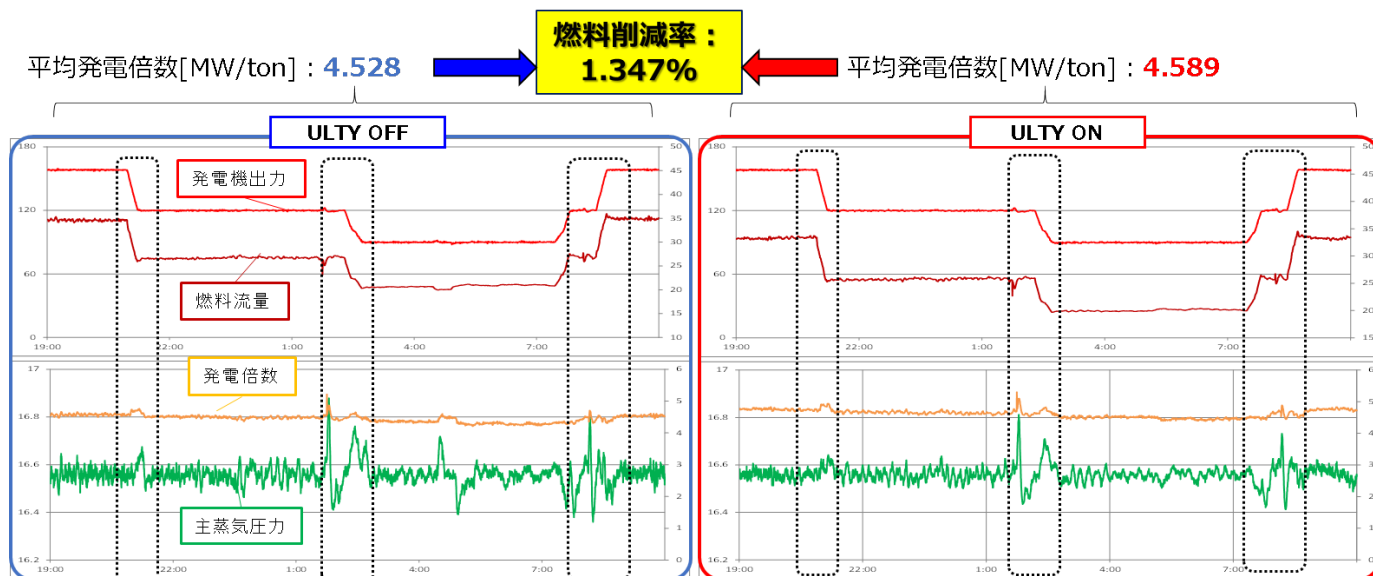
日付	2013年6月4日	2013年6月5日
ULTY	OFF	ON
時間	10:00~翌9:00	10:00~翌9:00
燃料流量 平均 μ [t/h]	70.904	70.189
燃料流量 標準偏差 σ [t/h]	0.4112	0.3672

【Fig.6】 主蒸気圧力と燃料流量の改善データ

4.2 投入燃料の削減

ボイラ燃焼状態の安定は、燃料低減効果として表れる。これは燃料投入量の変動により系外への熱エネルギーロスが生じるためである。燃料低減の実績として納入事例(A社/175MW/石炭焚き)を紹介する(図.7)。本プラントではシステム入・切を繰返してデータ収集を実施頂き、燃料低減率を計測した。燃料低減率は、システム入 / 切時を比較し、発電倍数の向上率から算出した。

システム導入により最大負荷試験において最終的に1.347%程の燃料低減効果が確認された。

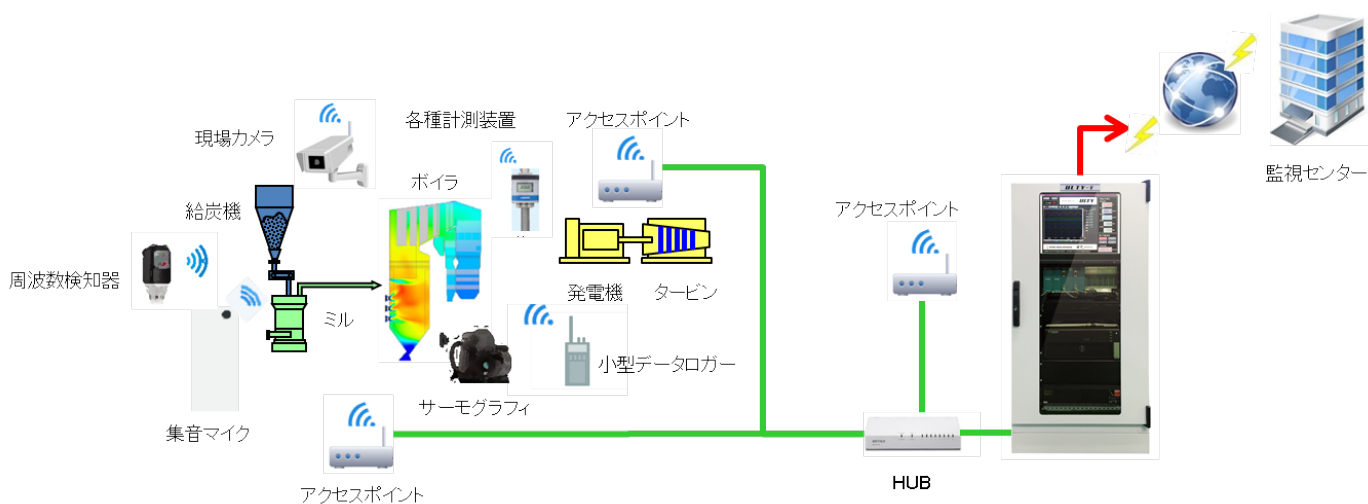


【Fig.7】 ULTY効果2

5. 遠隔監視システム

5.1 ネットワークによる遠隔監視システムの構築

ULTYに遠隔監視システムを組み込んだ際の概要図を示す(Fig.8)。ULTYにはオプション機能としてネットワーク監視機能を有している。これにより、プラントの24時間365日の運転監視が一元化できるとともに、各アクセスポイントから収集したデータをもとにメンテナンス時期の提案などが可能となる。



【Fig.8】 モニタリングシステム図

5.2 遠隔監視システムの優位性(ボイラ稼働中)

ULTYへ各種データを取り込むことで具体的には以下7項目についての計測/分析/予知/監視を行なうことで異常箇所の早期発見と処置が可能となる。

(1)異音の測定

ファン、ポンプ等の回転体の異音をマイクで拾い、所内ネットワークよりULTYへ入力。異常時には警報を発報する。

(2)熱検知

ファン、ポンプ等の回転体の異常発熱を赤外線サーモグラフィで検知し、ULTYへ入力。異常時には警報を発報する。

(3)振動感知

振動状態を監視。データをULTYへ入力し、状態分析を実施。異常時には警報を発報する。

(4)周波数計測

周波数帯域による分析、異常検知を実施。

(5)環境数値分析

水質計等環境計器により状態監視、分析を実施。

(6)映像による監視

機器の作動状況をカメラで監視し、ULTYを経由して画像解析する。

(7)異常予知検知

音、熱、振動のデータを収集・分析し、異常予知検知する。

5.3 遠隔監視システムの優位性(ボイラ停止中)

遠隔監視はボイラ稼働中のみならずボイラ停止中にも優位性を発揮する。例えば以下4項目について、定修時のコスト削減や定修期間の短縮につながる。

(1)保守の記録と情報化

保守状況をタブレット端末へ記録し、情報を共有化。異常箇所の特定が容易となる。

(2)点検項目の記録管理

タブレット端末を用いることにより、保守点検項目の共有化、記録、管理が可能となる。

(3)打音分析

打音検査による異常検査分析が可能となる。

(4)M単体試験への応用

試運転時のM単体試験において、異音、温度、振動監視を記録することにより、異常検知発報が可能となる。

6. 導入実績

ボイラ型式、運転方式、DCSメーカーを問わず、多様なプラントに導入可能な高い汎用性をもつ本システムは2005年に実証試験が終了して以降、電力会社をはじめ製鉄会社、製紙会社、化学会社など様々な業種のボイラへ87基が稼働中であり(Table 2)、全ての導入ボイラにおいて燃料使用量削減およびCO₂排出量削減を達成してきた。投入燃料に関しても石炭やバイオマス、ガス／重油混焼など多岐に渡る燃料投入方式に対応している。

7. おわりに

我が国のボイラ効率は世界最高水準の効率化を達成しているが由に、ボイラ制御技術は既に完成された技術とされ、効率改善の画期的な技術革新が生まれにくいのが現状である。もし仮に開発できたとしても高額な費用が発生するため、既にある程度の高効率を達成できているボイラ単体への新技術導入のニーズは薄い。そこで我々は本システムをシステム導入後の燃料費削減により僅か1～2年間で導入費用が回収可能な価格に抑え、システム導入への敷居を低くしてきた。日本製鉄(株)殿をはじめ、この優れたコストパフォーマンスを高く評価いただき実績を重ねてきた。今後もより適切な燃焼制御を目標に新技術の開発を行っていきたい。

Table 2 Actual list of ULTY

Industry		Conventional	CFB(Circulating-Fluidized-Bed)	USC	Amount
For Business	Power	14	1	1	21
	IPP	5	0	0	
For Industry	Steel	15	1	0	66
	Papermaking	12	14	0	
	Petrochemistry	15	0	1	
	Cement	3	5	0	
Amount		64	21	2	87

*1 郵船出光グリーンソリューションズ(株)
 〒105-6134 東京都港区浜松町2-4-1
 世界貿易センタービル34階
 電話(03) 5408-7128
 E-mail: Sales_Engineering@nyk-idemitsu-gs.co.jp