

燃料費を削減するボイラ燃焼ソリューション

Boiler Combustion Solution for Reducing Fuel Costs

稲村 康男 INAMURA, Yasuo

小澤 秀二 OZAWA, Shuji

赤尾 幸造 AKAO, Kozo

富士電機は、ボイラの燃焼効率を改善し、排ガス熱損失の低減により燃料費を約1%削減できるボイラ燃焼ソリューションを発売した。燃料に対する空気の量を極限まで下げる超希薄空気燃焼によりボイラ排ガス O₂ 濃度を 2.40% から 0.86% に低減し、450 t/h の温水ボイラで年間約 28 百万円の燃料費が削減できる。ボイラ排ガス中の CO 濃度は、リアルタイム測定が可能なレーザ方式 CO 分析計と組み合わせることで、環境基準値内に抑えることができる。熱源供給用ボイラで試運転を行い、良好な結果を得た。

Fuji Electric has launched a boiler combustion solution that is capable of reducing fuel costs by about 1% by improving combustion efficiency and reducing the heat loss of boiler exhaust gas. The solution decrease the O₂ concentration of boiler exhaust gas from 2.40% to 0.86% by applying ultra-low excess air ratio combustion control that supremely reduces oxygen fuel ratio. This results in a reduction of fuel cost by approximately 28 million yen a year at a 450 t/h boiler. Combining this solution with a laser CO analyzer capable of taking real-time measurements can suppresses CO concentration in boiler exhaust gas to meet environmental standards. Trial runs were conducted with a heat source boiler and good results were obtained.

1 まえがき

資源エネルギー庁の“長期エネルギー需給見通し”における基本方針は、安全性、安定供給、経済効率性および環境適合を達成する中で、省エネルギー（省エネ）と火力発電所の効率化などを実現する必要があるとしている。また、産業部門における省エネ対策は、高性能ボイラなど高効率設備の設置、IoT（Internet of Things）を活用した工場のエネルギーマネジメントの徹底、革新的技術の導入などにより、2030年までに1,042万kL（重油換算）の削減を目指すとしている。

これを受けて富士電機は、2015年11月にボイラ燃焼ソリューションを発売した。従来では実現できなかった超希薄空気燃焼により、ボイラの燃焼効率を改善し、約1%のボイラ燃料費を削減するものである。

2 ボイラ燃焼ソリューション

ボイラのエネルギー効率の改善は、主に機械的な手法により進められてきた。例えば、ボイラの大型化、出力蒸気の高圧化と排熱回収量の増加などである。しかし、これらは、既に限界に近いといわれている。ボイラ燃焼ソリューションは、今までの方法とは異なり、従来のボイラ制御装置にソフトウェアパッケージとレーザ方式CO分析計を追加することで、ボイラの燃焼効率、すなわちボイラ効率を改善するものである。

2.1 ボイラ制御と最適燃焼

ボイラは、電力を供給するための事業用や、PPS（Power Producer and Supplier）、IPP（Independent Power Producer）などの汽力発電所、工場や事業所内設備に電

気や蒸気を送る自家用汽力発電所、蒸気や温水などを作る熱供給設備など多くの場所に設置されている。

また、ボイラは負荷側の設備の稼働状況が変化しても、規定の圧力と温度の蒸気を安定的に供給する必要がある。ボイラの制御には多くの方法があり、現在では、図1に示す方法が一般的となっている。

(1) 燃料流量制御設定値の演算（図1①）

主蒸気流量信号は、ボイラ負荷側の使用蒸気量が増えたり減ったりした際に最初に変化するので、この信号から蒸気を発生させるために必要な燃料量を算出し、この値を燃料流量制御の設定値とする。ボイラ負荷の変動により主蒸気流量信号が変化した場合、燃料流量の設定値が直ちに更新され、燃料の制御性を向上させる。

(2) 最終燃料流量設定（図1②）

ボイラ出口の蒸気圧力が規定の設定値になるように主蒸気圧力制御演算を行う。燃料流量の設定値は、制御性向上のため主蒸気流量信号により定められたが、この信号を主蒸気

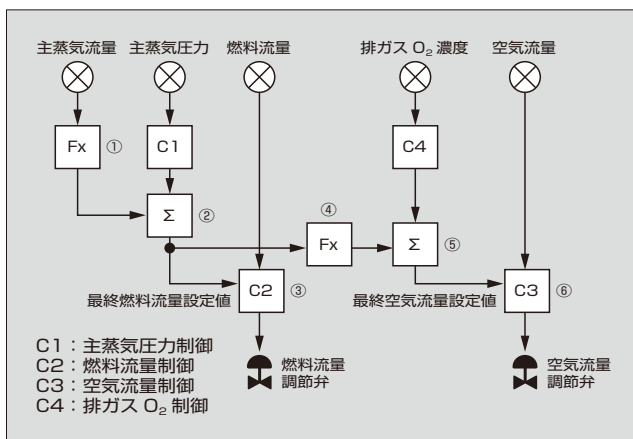


図1 ボイラ自動燃焼制御基本ブロック図

圧力制御演算の出力で補正して最終燃料流量設定値とする。これにより、ボイラ出口蒸気圧力を一定値に保つ主蒸気圧力制御とボイラ負荷の変化に対する燃料制御性の向上を両立させる。

(3) ボイラ燃料制御 (図1③)

最終燃料流量設定値に基づき燃料流量の制御演算を行い、ボイラ燃料を制御する。

(4) 空気流量設定 (図1④)

最終燃料流量設定値に相当する燃料を燃やすために適切な空気量を算出し、その値を空気流量設定値とする。

(5) 最終空気流量設定 (図1⑤)

ボイラの排ガス中の O₂ 濃度の制御演算を行い、排ガス O₂ 濃度が制御目標値となるように空気流量設定値に補正を加え、最終空気流量設定値にする。

(6) ボイラ空気量制御 (図1⑥)

最終空気流量設定値に基づき、空気流量の制御演算を行い、ボイラ空気量を制御する。

2.2 ボイラ燃焼ソリューションの仕組みと特徴

ボイラの燃焼では、理論空気量と空気過剰率が重要である。ボイラの燃焼における理論空気量とは、燃料と空気が理想的な状態で混合し完全燃焼するときに使われた空気量のことである。実際のボイラでは、理論空気量をボイラに投入しても燃料は完全燃焼せず、CO や黒煙を多量に発生する。このため、CO や黒煙が発生しないように理論空気量よりも過剰に空気を投入する必要がある。空気過剰率とは、式(1)に示すように理論空気量に対する、実際にボイラに投入した空気の比率である。

$$\text{空気過剰率} = \frac{\text{実際の投入空気量}}{\text{理論空気量}} \dots\dots\dots(1)$$

図2に示すボイラ燃焼の熱損失は、空気過剰率に大きく左右される。燃料を燃焼させるために適切な空気よりも多くの空気をボイラに投入する、すなわち空気過剰率が大きすぎると、燃焼に関与しない空気が多くなり、この空気がボイラ内の熱を持ち去り、排ガスとして煙突から排出されるので熱損失が発生する。一方、燃料を燃焼させるため

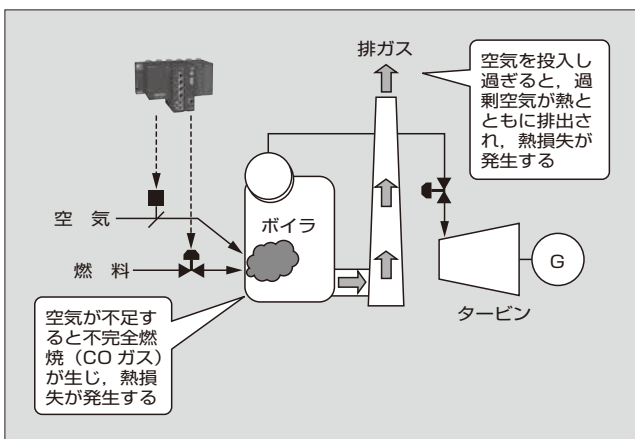


図2 ボイラ燃焼の熱損失

に不十分な空気量をボイラに投入する、すなわち空気過剰率が小さすぎると不完全燃焼による CO や黒煙が発生し、これらを排ガスとして煙突より排出するので、同様に不完全燃焼による熱損失となる。

ボイラ燃焼ソリューションは、熱損失を最小にしてボイラの熱効率を改善するものである。図3に、ボイラ最適燃焼領域を示す。この図は、過剰空気による熱損失と不完全燃焼による熱損失の関係を示したグラフである。

この図に示す過剰空気と不完全燃焼の熱損失を合わせた総合熱損失が最小になる領域は、従来の空気燃焼領域より左側の超希薄空気燃焼領域にある。

この考え方は以前からあったが、この領域で連続的に、しかも安定的に自動運転を継続できる技術は確立されていなかった。富士電機は、独自に考案した燃焼計算と応答速度の速いレーザ方式 CO 分析計を組み合わせることでこの技術を確認した。次にその技術の基本的な考え方を述べる。

過剰空気による熱損失と不完全燃焼による熱損失は、一般に式(2)と式(3)で表すことができる。

$$L_{\text{air}} = \frac{1}{0.21} C_{\text{PA}} (T_0 - T_1) (G \times O_2) \dots\dots\dots(2)$$

$$L_{\text{CO}} = G \times \text{CO} \times H_{\text{CO}} \dots\dots\dots(3)$$

- L_{air} : 過剰空気による熱損失
- L_{CO} : 不完全燃焼による熱損失
- C_{PA} : 空気の比熱 (kJ/Nm³・K)
- T_0 : 排出ガス中の空気温度 (K)
- T_1 : 吸込み空気温度 (K)
- G : 排ガス流量 (Nm³/h)
- O_2 : 排ガス O₂ 濃度 (%)
- CO : 排ガス CO 濃度 (ppm)
- H_{CO} : CO の熱量 (kJ/Nm³)

排ガス流量 G は、燃料の成分が事前に分かっている場合に限り計算で求めることができるが、実際のボイラでは燃料の成分に変動があり常に一定とは限らない。また、複数の燃料を混焼する場合もある。このため、式(2)と式(3)を

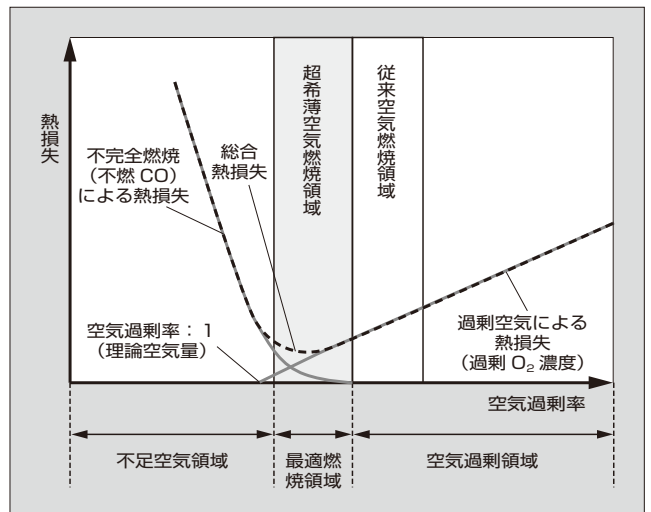


図3 ボイラの最適燃焼領域

使った最適熱損失計算は、測定して代入すべきパラメータが多すぎるため実用的でない。

富士電機は、従来のボイラ制御では使用されていない熱力学や燃焼反応などの燃焼理論式を活用した独自の制御ロジックを開発した。この制御ロジックは、現地試験でボイラの各蒸気負荷ごとに測定して代入すべき数あるパラメータを自動で設定すると同時に、超希薄空気燃焼領域における燃焼を実用化できる。

ボイラ燃焼ソリューションは、次の特徴を持っている。

- (a) ボイラの燃料の種類や混焼の有無にかかわらず適用できる。
- (b) ボイラの各負荷の最適空気過剰率点で制御できる。
- (c) 環境基準がある場合は、ボイラ排ガス中のCO発生量を基準値内に制御することができる。
- (d) ボイラ排ガス中のCOの異常増加を防ぐことができる。超希薄空気燃焼領域での燃焼は、空気過剰率が一時的に変動したとき、空気の不足によりボイラ排ガス中に発生するCOが過大になるリスクがある。その対策としてボイラ燃焼ソリューションは、ボイラ排ガス中のCO濃度を高速に測定可能なレーザ方式CO分析計を使用し、あらゆるボイラの挙動に対して、ボイラ排ガス中のCO濃度を設定した上限値以下に抑え込む制御ソフトウェア（ボイラ排ガスCO異常高ブロック制御）を備えている。
- (e) 既設のボイラ制御装置のメーカーに関係なく導入で

きるほか、既設のボイラ燃焼制御方式を大きく変える必要がない。

図4に、ボイラ燃焼ソリューションの設置方法を示す。

2.3 CO濃度の高速測定

ボイラ燃焼ソリューションにおいて、ボイラ排ガス中のCO濃度の高速測定は、超希薄空気燃焼を実現するために重要である。

(1) ボイラ排ガスCO異常高ブロック制御

ボイラ燃焼ソリューションは、超希薄空気の状態でボイラの燃料を燃焼させ、常時炉内で微量の不完全燃焼を連続的に発生させながら制御を行う。また、図3に示すように、不完全燃焼は空気過剰率があるしきい値以下になると3次曲線的に増大し（排ガスCO濃度が増加）、さらにある空気過剰率以下で黒煙が発生する。

したがって、ボイラの挙動が次に示す三つの場合においても、高速応答のレーザ方式CO分析計を使って過大な不完全燃焼を防ぐのが、ボイラ排ガスCO異常高ブロック制御である。

- (a) ボイラのバーナが点火し、一時的にボイラの燃料量と空気量のバランスが変化したとき
- (b) ボイラの蒸気負荷は変動していないにもかかわらず、燃料の発熱量が変化したことにより燃料量と空気量が自動制御で動作し、一時的に空気過剰率が変化したとき
- (c) ボイラの蒸気負荷が急増した際、空気量と燃料量はエアリッチ（空気過多）制御により、黒煙発生を防止するように制御されるが、一時的に空気過剰率が減少する方向に変化したとき

(2) 最適燃焼ロジック演算

CO濃度の信号は、前述のボイラ排ガスCO異常高ブロック制御のほかに、次のように燃料を削減するための超希薄空気燃焼制御においても使用される。

- (a) 最適空気過剰率の計算
- (b) 環境基準値内にボイラ排ガスCOを抑止するための制御

2.4 レーザ方式CO分析計

富士電機は、レーザ方式ガス分析計を国産として初めて商品化し、多くの実績を持っている。図5に、レーザ方式CO分析計の構成を示す。また、その特徴を次に示す。

(1) 高速応答

センサ部をボイラの排ガスダクトに直接挿入するので、ガス採取による時間的な遅延が発生せず、煙道内のガス濃度変化を瞬時に捉えられる（応答時間1～2秒）。

(2) 容易なメンテナンス

直接挿入式のため、ガスサンプリング系統におけるフィルタ交換などの日常的なメンテナンスが不要であり、校正作業は半年に1回でよい。

(3) CO測定に対する他ガスによる低干渉性

本分析計は、COガスが吸収する赤外線波長が水分や他

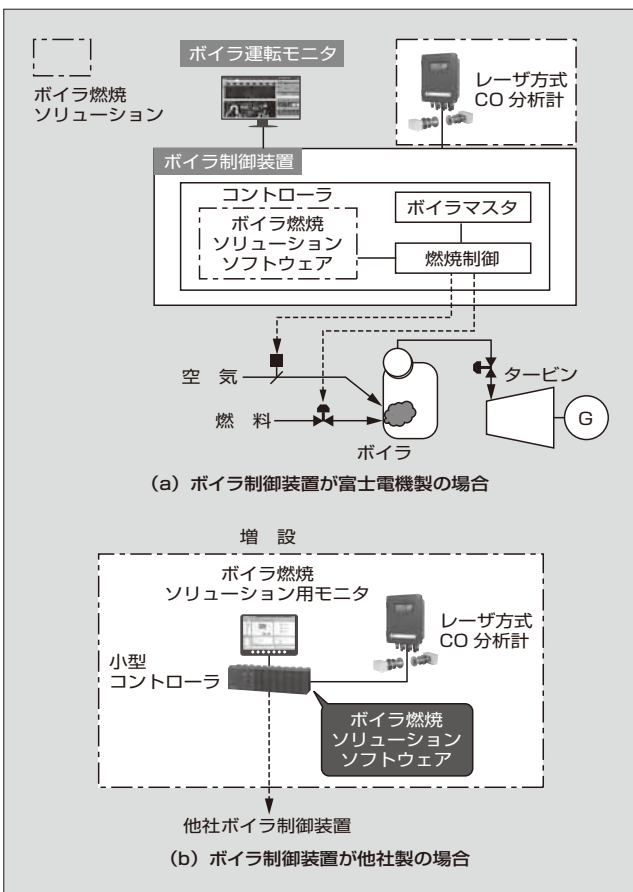


図4 ボイラ燃焼ソリューションの設置方法

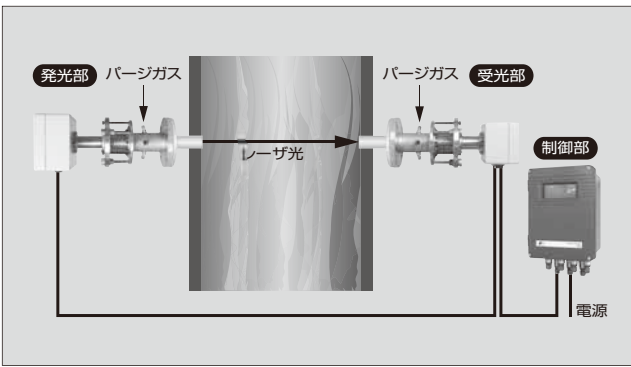


図5 レーザ方式 CO 分析計の構成

ガスの波長と重ならないので、原理的に他のガスによる干渉の影響を受けにくい。

③ 熱源供給ボイラにおけるボイラ燃焼ソリューション試運転結果

2016年3月、パリ市内の広範囲に圧力1.5MPaの温水を供給するためのインフラ設備として、ボイラ容量450t/hの熱源供給用ボイラがRCU社により新設された。これにボイラ燃焼ソリューションが採用された。自動制御試験において良好な結果を得ており、現在順調に運用されている。超希薄空気燃焼自動制御試験、およびボイラ燃焼ソリューション緊急停止試験とも良好な結果を得た。

3.1 試運転設備概要

このボイラの制御装置は他社製であったので、ボイラ燃焼制御用のソフトウェアパッケージを搭載した富士電機製小型コントローラは、壁掛け盤に収納する方式としている。壁掛け盤は、高さ760mm、幅600mm、奥行き300mmとコンパクトである。また、ボイラ制御装置と送受信する信号は、制御・インタロック信号が10点、監視用信号が20点程度であり、プロセスI/O接続とした。

表1にボイラの概略仕様を、図6にボイラ燃焼ソリューションを搭載した壁掛け盤とレーザ方式CO分析計の設置状況を示す。

3.2 試運転結果

(1) 超希薄空気燃焼自動制御試験

図7は、ボイラ燃焼ソリューションを作動させ、超希

表1 ボイラ概略仕様

項目	仕様
ボイラ容量	450t/h (max.) ホットウォータ
ボイラ容量出口圧力	1.5 MPa (max.)
ボイラ出口温度	171℃ (max.)
燃料	ナチュラルガス
ボイラ排ガス温度	176℃ (max.)
ナチュラルガス流量	36,830Nm ³ /h (max.)



図6 壁掛け盤とレーザ方式 CO 分析計の設置状況



図7 超希薄空気燃焼自動制御試験結果

薄空気燃焼自動制御試験をバーナロード50%で実施した結果である。ボイラ排ガスO₂濃度が2.40%から0.86%まで低下したので、排ガス熱損失などの改善により、計算上、年間約28百万円の燃料費が削減できる。

(2) ボイラ燃焼ソリューション緊急停止試験

図8は、ボイラ燃焼ソリューションを即座に停止させる緊急停止試験の結果である。ボイラ燃焼ソリューションは、ボイラプラントの安全性を十分に考慮しており、関連機器の異常、入出力ケーブルの断線、プロセス極上下限異常、制御モード不成立などにより、緊急停止する。ボイラ燃焼ソリューションが緊急停止し、ボイラ制御装置と切り離された場合、ボイラ燃焼ソリューションを導入する前のボイラ排ガスO₂制御の状態に自動的に移行し、以前の空気過剰率で制御が継続される。

図8は、ボイラ燃焼ソリューション試運転結果における空気過剰率最適指令信号値、ボイラ排ガスO₂濃度とボイラ排ガスCO濃度などのプロセス値のトレンドチャートを示している。チャート中央付近でボイラ燃焼ソリューションが緊急停止し、同時に空気過剰率最適指令信号が急降下し、ボイラ排ガスCO濃度の値が消滅し、そしてボイラ排ガスO₂濃度が上昇しながら制御を継続している。



図8 ボイラ燃焼ソリューション緊急停止試験結果

4 あとがき

燃料費を削減するボイラ燃焼ソリューションについて述べた。現在、IoTを活用したシステムに発展させ、遠方のお客様に対しても、ボイラ燃焼状態の監視や保守サービスを提供し、さらには相互情報交換のツールに発展させるための検討を進めている。これからも、付加価値の高い情報・制御システム、ソリューションパッケージソフトウェアやサービスを開発し、お客様に新たな価値を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁. 長期エネルギー需給見通し関連資料. 2015.
- (2) 広井和夫. デジタル計装制御システムの基礎と応用. 工業技術社. 1987.
- (3) 仲町一郎. 新版ガス燃焼の理論と実際. 一般財団法人 省エネルギーセンター. 2012.



稲村 康男

エネルギー、原子力、窯業、清掃工場など制御システムのエンジニアリング、IoT推進業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部IoTプロジェクト室主席。



小澤 秀二

エネルギー分野の計測制御システムのエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部素材ソリューション事業部技術第二部担当課長。



赤尾 幸造

ガス分析計の開発・設計業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部コア技術研究所計測技術開発センター計測ソリューション開発部主査。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。