

IHI 小型貫流ボイラのフラッグシップモデル K-3000SE の開発

Development of the K-3000SE, the Flagship Model for IHI's Compact Drum-Less Boilers

河 岡 幸 伸 株式会社 IHI 汎用ボイラ 技術部 次長

その手軽さから、設置台数が急増している小型貫流ボイラ。株式会社 IHI 汎用ボイラは、ボイラの構造に工夫をこらし、運転効率の向上と環境負荷の低減を図ってきた。新たな燃焼制御技術と大容量化によって、省エネルギー化と設備コスト削減を達成し、販売を開始した IHI 小型貫流ボイラのフラッグシップモデル K-3000SE について紹介する。

The volume of sales for compact drum-less boilers has been rapidly increasing thanks to their simplicity. Through our employing ingenious techniques for the construction of the boiler, we have been working to reduce environmental impact and to improve operating efficiency. We have started sales of the K-3000SE type boiler, which is the flagship model for IHI's compact drum-less boilers and has achieved energy saving and lower equipment costs thanks to its increased capacity and the new combustion control technology that has been adopted. We introduce its development in this paper.

1. 開発の経緯

小型貫流ボイラは、小型ボイラ取扱業務特別教育受講者を取り扱えることから、一般産業分野で設置台数が急増しており、複数台設置することによって、大型ボイラの代替機種として使用されているが、設備費および設置スペースの低減と省エネルギー化のため、大容量化と高効率化が求められている。同型式のボイラでは、負荷変化に追従して、燃焼量を段階的に変更する制御方法が採用されてきたが、株式会社 IHI 汎用ボイラ (IBK) は一般的な工場の平均的な熱負荷が最高負荷の 40% 程度であることを把握し、それまで一般的であった 3 位置制御 (100% (定格負荷), 50%, 0% (停止)) では 50% を下回る熱負荷の場合、50% ~ 0% を繰り返すことになり、バーナ消火後の火炉パージに伴う熱損失を生じていると考え、4 位置制御 (100%, 60%, 20%, 0%) のボイラを開発し、低負荷時における停止、再起動に伴うパージ熱損失防止を図った。その技術と環境性能を評価され、2009 年に一般財団法人日本産業機械工業会主催、経済産業省後援による「第 35 回優秀環境装置表彰」を受賞している。

しかし、近年では他社も同様の方法を採用するようになり、さらなる高効率運転を可能とする新たな制御方法の開発が急務となった。

K-3000SE 型ボイラは大容量化と新たな燃焼制御技術によって、他社との差別化を図った製品として開発を行った。

K-3000SE 型ボイラの主要目は以下のとおりである。第

1 図に外観を示す。

法規区分	小型貫流ボイラ
換算蒸発量	
高燃焼	3 000 kg/h
中燃焼	1 200 ~ 2 400 kg/h (比例制御によって可変)
低燃焼	600 kg/h
ボイラ効率	98%
使用燃料	天然ガス, LP ガス
設備電力	13.3 kW
外形寸法	1 090 (幅) × 3 210 (奥行き) × 2 640 (高さ) mm (同容量では業界最小幅)
製品質量	2 800 kg (ドライ)



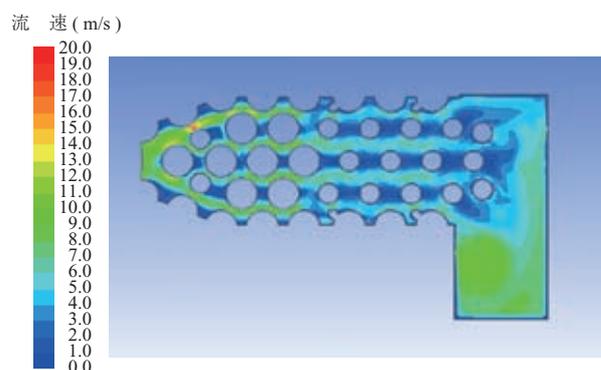
第 1 図 K-3000SE 型ボイラの外観
Fig. 1 Appearance of K-3000SE type boiler

2. K-3000SE 型ボイラの構造と効率

第2図に本ボイラの構造を示し、水・蒸気・燃焼ガスの流れを示す。燃料を燃焼し、発生した高温燃焼ガスの保有する熱量で蒸発管内を流れる水を温め、蒸気を発生させるとともに、排出燃焼ガスの残熱量を給水予熱器（エコマイザ）で回収する。ボイラ本体は多管式貫流構造となっており、燃焼室（火炉）と上下の管寄せに連結された蒸発管群で構成されている。給水ポンプで加圧された給水はエコマイザで予熱後、下部管寄せに通水され蒸発管内で加熱されて、蒸気と液体が混合した気液二相流となり、上部管寄せより気水分離器内に流入した後、蒸気と水に分離される。分離された蒸気は主蒸気弁より負荷側に供給され、水は降水管から下部管寄せに戻る。

本ボイラでは 10 m² を超えない法定伝熱面積で大容量化を達成するため、本体収熱率の向上を図る必要があり、流体解析によって本体内部の燃焼ガス流れ状態を可視化して、伝熱計算との整合を行い、伝熱面配置の見直しを行った。第3図に流体解析による本体内部の燃焼ガス流速分布の一例を示す。伝熱面を構成する蒸発管群の中央部に燃焼ガス流を集中させるとともに、蒸発管に接しない燃焼ガス流をなくしている。

また、本体から排出される燃焼ガスの流れ方をエコマイ



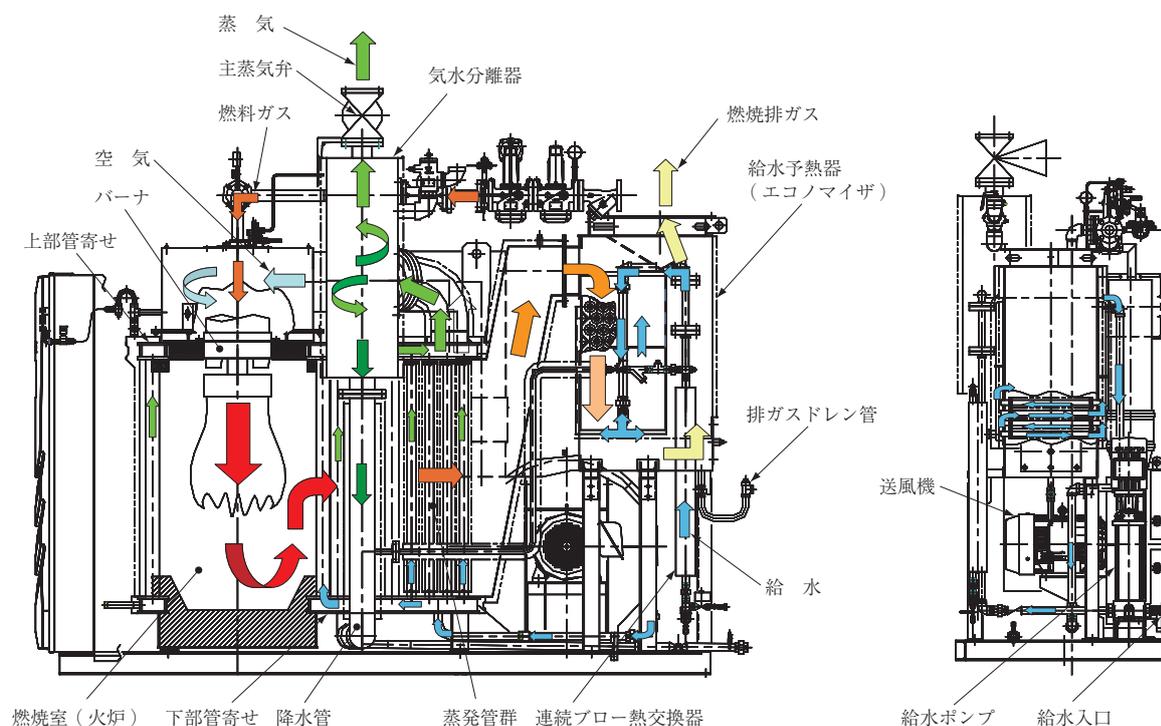
第3図 本体内部のガス流速分布
Fig. 3 Flow gas velocity distribution inside boiler

イズ上部から下部へとすることで、発生するドレンの効率的な排出が可能となり、伝熱性能をさらに改善することができた。第4図に本ボイラの負荷別効率グラフを示す。一般的な排ガス損失法による効率では、負荷の低下に伴い本体の放熱損失が増加するため低負荷では効率が低下するが、常温給水の場合、潜熱回収が可能となり排ガスのドレン化量が増加するため、効率は向上し、燃料の低発熱量ベースでは 100% を超える。

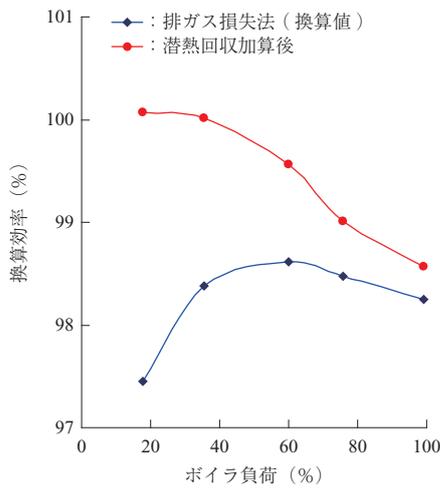
3. 新たな燃焼制御技術

3.1 基本コンセプト

従来の段階燃焼制御では、固定された燃焼負荷



第2図 ボイラの構造
Fig. 2 Structure of boiler



(注) 条件：常温(25℃)時における給水

第4図 ボイラ効率
Fig. 4 Boiler efficiency

(100%, 60%, 20%, 0%)を切り替えることによって負荷追従しているが、負荷に応じて水位を変更する小型貫流ボイラでは、過渡的な蒸気品質の低下と圧力変動が問題となる場合があった。また、インバータ駆動される送風機との組合せでは、頻繁に行われる駆動周波数の変動に伴う制動損失が生じていた。

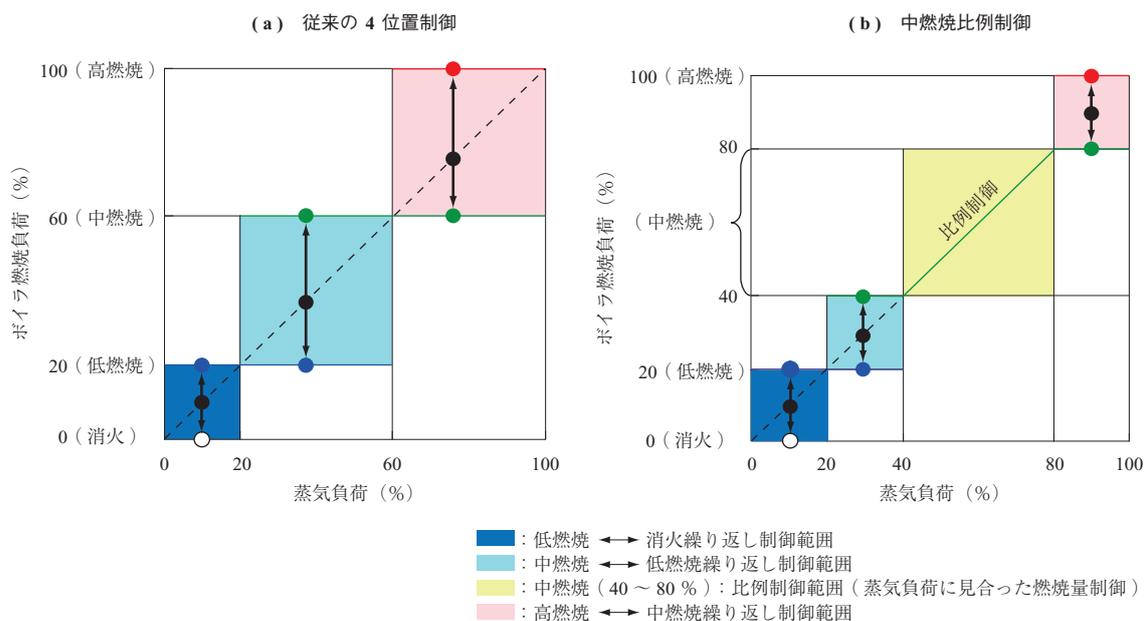
一方、負荷に応じて燃焼量を微増減する比例制御では、急激な負荷変動に対する追従遅れを生じる場合があり、また従来の段階燃焼制御方法に対し、マイコン制御基板の改編など、大幅なシステムの変更が必要となることが難点であった。

今回開発した燃焼制御技術(中燃焼比例制御)は、比例制御される中燃焼域(40~80%)と固定された高燃焼(100%),低燃焼(20%)の組合せによって、蒸気圧力の変動防止と負荷の急変動に対する追従性を両立するもので、中燃焼域では比例制御を行い、負荷の急変動があった場合には、ただちに高燃焼または低燃焼に切り替えることで、負荷追従することが可能である。領域を制限した比例制御域を中燃焼に代替することで、従来の制御方法の概念は変更せず、外部機器の一部変更で対応可能である。

また、IBKは長年4位置制御ボイラを販売してきた実績から、中燃焼域(40~80%)は給水温度の変動など、種々の条件下で高、低燃焼時より効率が向上することを経験しており、中燃焼をターンダウン比の拡大を目的とした高燃焼から低燃焼へ移行するための通過点と考えるのではなく、最も運転効率が高くなる燃焼域として捉え、この領域を比例制御化することによって、ボイラ単体の実運転効率を向上できると考えている。

なお、複数台のボイラを台数制御する場合、各ボイラを優先的に中燃焼とする台数制御装置を開発済みであり、本ボイラと併用することによって、ボイラ設備全体の効率をさらに向上させることが可能である。

第5図に従来の4位置(段階)制御と中燃焼比例制御における蒸気負荷に対する燃焼負荷変化の比較(燃焼制御方式の比較)を示す。従来の方法で負荷75%を維持するためには、100%と60%の燃焼負荷を頻繁に切り替える必要があるが、新たな燃焼制御方法では比例制御によっ



第5図 燃焼制御方式の比較
Fig. 5 Comparison of combustion control methods

て一定の状態に保たれるため、4 位置制御に対しインバータ駆動される送風機の駆動周波数の変動は少なくなり、電力費も削減される。具体例としては、ボイラの運転時間を 3 750 時間（15 時間/日× 250 日/年）とし、電力単価を 15 円/kW・h とした場合、平均負荷率が 75%では、15 万円/年の省電力効果が見込まれる。

3.2 実現のための手法

従来の 4 位置制御では各負荷は固定のため、燃料流量の設定は電磁弁の開度調整で行い、空気量は各負荷に応じた風量をダンパで制御していたが、新たな燃焼制御では中燃焼域を比例制御化するため、燃料流量は調量弁とそれを駆動するコントロールモータで行い、空気量はインバータ駆動される送風機の運転周波数の変更と補正用ダンパの組合せで行っている。

多管式貫流ボイラは保有水量が少ないため、自己蒸発がほとんどないことから、負荷追従性を向上するため、出力の変化は高速であることが求められる。具体的には、全閉から全開に要する時間が短いコントロールモータを使用し、高、低燃焼を含め全負荷を 10 ポイントに分割して、その内の 8 ポイントを 40～80%の比例制御域に割り当てることで、出力変化量を比較的多くしている。また、各負荷ポイントは空燃比がほぼ一定となるように燃料弁の開度割合および送風機の運転周波数を初期設定しており、補正も可能である。

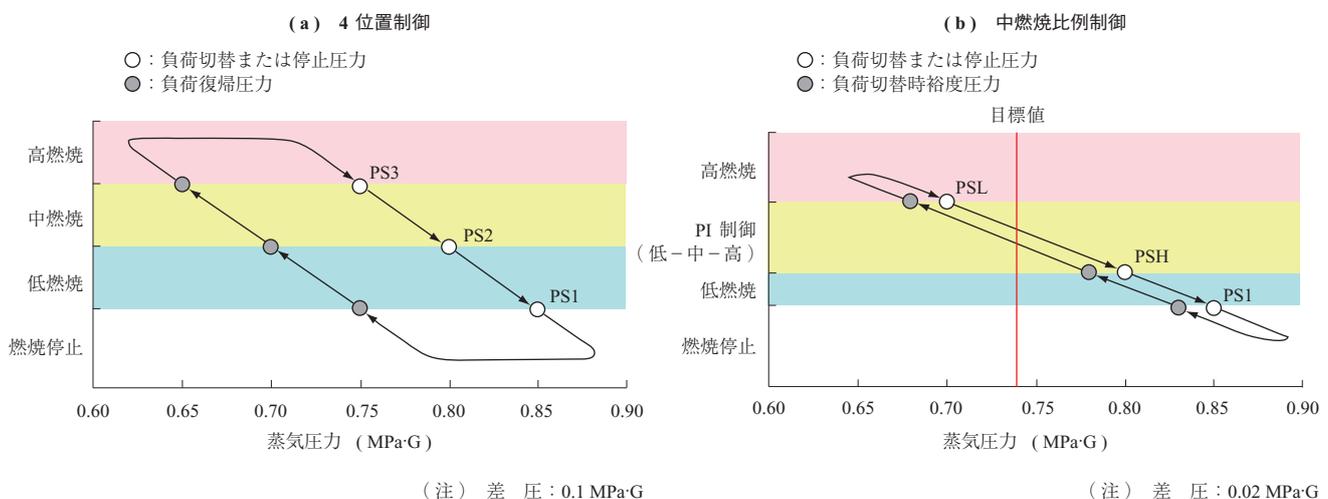
一般的に蒸気負荷は圧力の変化で検出される。すなわち、蒸気負荷が増加すれば圧力は低下し、蒸気負荷が減少すれば圧力は上昇する。

第 6 図に 4 位置制御と中燃焼比例制御の運転圧力設定

値の比較を示す。4 位置制御では、高燃焼から中燃焼に移行する圧力（PS3）、中燃焼から低燃焼に移行する圧力（PS2）、燃焼停止する圧力（PS1）を設定し、負荷増減（圧力減増）に伴い燃焼負荷を切り替えることで負荷追従しており、負荷上昇時の切り替え圧力と負荷降下時の再起動差圧を個々に設定して、定格運転時にはほぼ運用圧力になるように調整する必要があった。

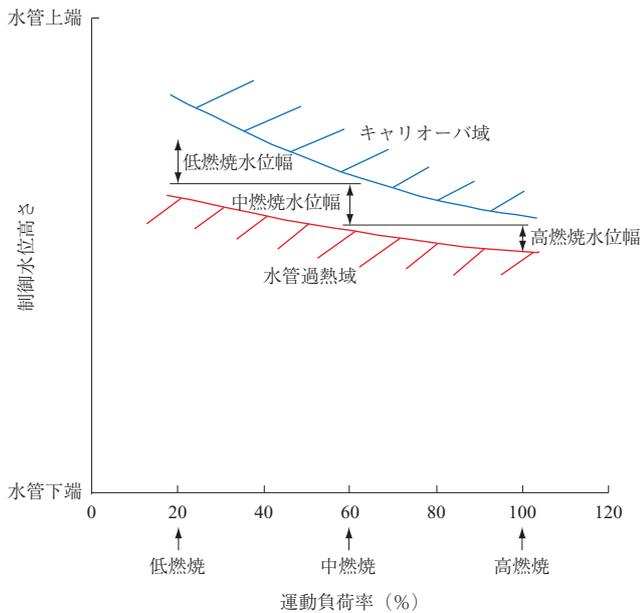
中燃焼比例制御では、目標圧力と比例帯における下限圧力（PSL）と上限圧力（PSH）を設定すれば、負荷変動しても目標圧力を維持するように全燃焼負荷ポイントを使用した PI（Proportional Integral：比例積分）制御によって燃焼負荷を自動調整する。なお、圧力が PSL を下回る場合は強制的に高燃焼となり、PSH を上回る場合は低燃焼となることで、比例帯を超えるような負荷の急変動に対応している。これらの数値は操作画面上で簡単に設定可能である。

多管式貫流構造のボイラでは、水管内で蒸気（気液二相流）を発生することから、水位を上げると飽和水をもち出すキャリオーバー現象を生じて蒸気品質の低下を招き、水位を下げると冷却不足によって水管の過熱を生じる。また、ボイラ本体の防食を図るため、低負荷時には水位を上昇させて一定の循環力を確保する必要があり、負荷別に適正な制御水位高さや幅を検証し、設定している。第 7 図に従来の 4 位置制御の負荷別水位制御を示す。各負荷に対して 3 段階で適正な水位、幅を設定しているが、水位の高い低燃焼より急に負荷増加する場合、段階的に変化する燃焼負荷に対し、水位の追従遅れによって、過渡的な蒸気品質の低下を生じる可能性があった。

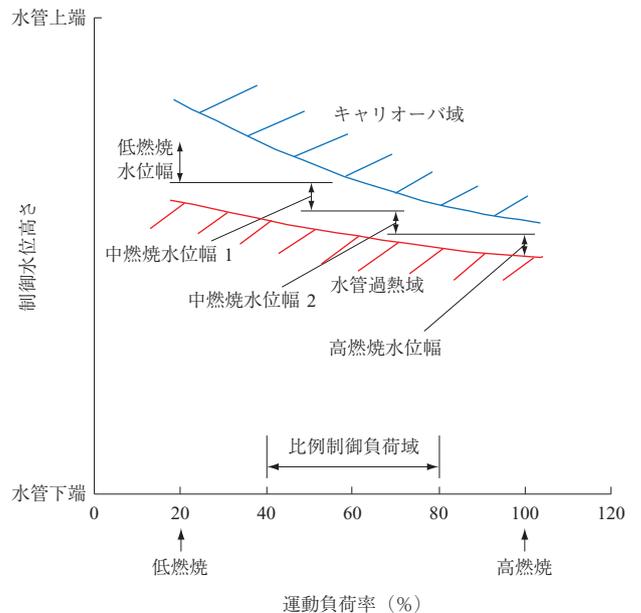


第 6 図 4 位置制御と中燃焼比例制御の運転圧力設定値の比較

Fig. 6 Set point of the operating pressure for hybrid control (4 stage control with proportional control for the middle range) and 4 stage control of combustion



第7図 4位置制御の水位制御
Fig. 7 Water level control of 4 stage control



第8図 中燃焼比例制御の水位制御
Fig. 8 Water level control of hybrid control

第8図に中燃焼域を比例制御とした場合の負荷別水位制御を示す。運転頻度の高い40～80%の負荷を40～60%と60～80%負荷に区分し、中燃焼水位1、2間で段階制御しており、負荷の急変動時には、水位の中間部となるこの領域から高燃焼または低燃焼水位に移行する4段階で制御しているため、水位の変動が少なく、過渡的な蒸気品質の低下防止と全運転負荷域で蒸気品質の確保が可能である。

4. その他の特長

(1) 中燃焼着火による起蒸時間の短縮

着火負荷を低燃焼(20%)から中燃焼(40%)とすることで、無圧状態から蒸気が発生する時間の短縮を図った。

(2) 高速回転直動送風機の開発

送風機を高速回転型とすることで、インペラ口径を小さくし、コンパクト化とインバータ駆動による比例制御との最適化を図った。

(3) デザインの一新と機能向上

意匠はIHIの文字をイメージしたデザインとし、機能美と精巧感を表現している。正面は真空成形による大型樹脂成形品を鋼板製の扉の表に装備し、運転状態をカラーLEDで視認できるスリットを設けるなど、従来の業界にはない新規性のある形状とした。また、細部は使い勝手とリスクアセスメントに配慮している。

5. 期待される省エネルギー化への貢献

K-3000SE型ボイラは、K-SEシリーズのフラッグシップモデルとして大容量化と電力消費の削減を考慮した高効率ボイラとして開発した。今後、工場の省エネルギー化への取組みはさらに加速すると予想され、大容量化による設備費の削減と幅広い負荷域で高効率を維持し得る製品として、一般産業分野の省エネルギー化に貢献できることを期待している。