Improvement of boiler efficiency by recovering latent heat

○正 土 本 信 孝 内 山 清 彰 ((株) タクマ)
Nobutaka TSUCHIMOTO, Kiyooki UCHIYAMA (TAKUMA Co., LTD.)

Nowadays, reduction of CO₂ emissions is one of the most important problem in Japanese industry with respect to global warming. The improvement of boiler efficiency is the most effective for reduction of CO₂ emissions in industry boiler field compared with other CO₂ reduction technologies.

The heat loss by flue gas is the major part in the total heat loss of the boiler. The natural gas has increased to be used for small boilers recently. It is easy to recover waste heat from flue gas of boiler. It contains about 15 vol. % of H₂O gas in flue gas of natural gas-fired boiler. So, we can get substantial improvement in boiler efficiency by recovering not only the sensible heat, but also the latent heat from the flue gas.

Key Words: Natural Gas, Reduction of CO₂ Emissions, Condensing Boiler, Latent Heat

1. はじめに

地球環境負荷低減、とくに CO₂ 低減に関し、産業用および民生用ボイラの熱効率向上は重要な課題となっている。ボイラにおける最も大きな熱損失は排ガスによって大気へ放出される排気損失である。近年、環境負荷低減のためボイラ用燃料として都市ガス（天然ガス）が多く使われるようになり、排ガスからの熱回収もしやすくなり、現状でもかなりの高効率（87～96%）となっている。しかし、都市ガスの燃焼排ガスには多量の水蒸気が含まれており、顕熱とともに水蒸気の凝縮潜熱を回収すれば、ボイラ効率の大幅な改善が得られる。

本稿では潜熱回収型多管貫流ボイラの性能特性とエコノマイザーにおける熱伝達特性および物質伝達特性について述べる。

2. ボイラ設備仕様

最近の小型ボイラ（多管貫流ボイラ）は省エネ時代のニーズに応じて高効率化が進んでおり、缶体だけのもので 87～89%、エコノマイザー付きのもので 94～96%が一般的な仕様となっている。このように比較的高効率なボイラの効率を更に向上させるためには、燃焼排ガス中の水蒸気の凝縮熱まで利用する潜熱回収型システムが必要不可欠となる。潜熱回収を伴わないボイラでは排ガス温度の回収は 80～90℃が限界であり、ボイラ効率はせいぜい 95～96%くらいである。これに対し、給水温度を低くして管表面温度を排ガスの凝縮温度以下にすれば、顕熱とともに潜熱も回収可能となり、ボイラ効率の大幅な改善が得られ、低位発熱量基準で 100%を超えることも可能である。しかし、都市ガス 13A の燃焼排ガスの凝縮ドレンは pH が約 3.5 の酸性を示し、伝熱管およびケーシングに腐食耐久性が求められる。また、生成した凝縮ドレンをスムーズに落下・排出させるため、水平伝熱管に上下流排ガスの構造をとる必要がある。

実験に用いた潜熱回収型高効率ボイラは缶体、顕熱回収エコノマイザー、潜熱回収エコノマイザー、およびその他補機類で構成され、スリムで多缶設置対応型となっている。表 1 にボイラ設備の、表 2 にエコノマイザーの主要目を示す。

Table 1 Particulars of Boiler

Boiler Model	TWGN-2000LE
Type	Multi-tube
Equivalent Evaporation	2,000 kg/h
Thermal Output	1,253 kW
Maximum Pressure	1.0 MPa
Working Pressure	0.7 MPa
Steam Temperature	Saturated
Thermal Efficiency	101 % *
Heating Surface	9.65 m ²
Water Level Control	On-Off
Combustion Control	High-Low-Off
Fuel	LNG 13A

*: LHV base, at F. W. Temp. = 20℃

Table 2 Particulars of Economizer

	High Temp. Eco.	Low Temp. Eco.
Configuration	Vertical Tube and Horizontal Gas Flow	Spiral Tube and Vertical Gas Flow
Tube Type	Serrated Fin Tube	Solid Fin Tube
Tube Material	Carbon Steel	SUS304
Tube Diameter	27.2 mm	27.2 mm
Heating Surface	16.8 m ²	38.1 m ²

3. ボイラ性能特性

潜熱回収ボイラの性能は、潜熱回収エコノマイザーでの凝縮部の大きさによって影響を受ける。すなわち、給水温度が低いほど凝縮部が大きくなり、顕熱回収量、潜熱回収量とも増加し、ボイラ効率は向上する。

図 1 に最大燃焼時で空気比 1.2 の時の給水温度をパラメータにしたボイラ性能特性を示す。排ガスからの凝縮量（ドレン量）は、給水温度が低いほど多く、排気温度は、給水温度が低いほど低くなる。その結果として、給水温度が低いほどボイラ効率は高くなる特性を持つ。給水温度が 50℃ にもなると凝縮水の排出は見られなくなり、伝熱管表面では凝縮現象が生じてなく、全体が顕熱回収エコノマイザーとして作用することになる。

Fig. 1 Performance Characteristics

4. 熱伝達特性および物質伝達特性

図2は、エコマイザーにおけるフィン付き伝熱管の熱伝達および物質伝達特性に関する実験結果を示す。図中の□印、△印の実験点は、それぞれ顕熱回収エコマイザーおよび潜熱回収エコマイザーの顕熱部における対流伝熱のみの熱伝達特性を示す。○印は、凝縮現象が生じている対流伝熱と物質伝達の共存域での熱伝達特性を示す。

図中の一点鎖線は、次式によるフィン付き伝熱管群の熱伝達に関する実験式に基づく計算値を示す。

顕熱回収エコマイザーに対し；

$$Nu = 0.166 * (Fb + Ff * \eta f) * Re^{0.618} * Pr^{0.31} \quad \dots (1)$$

潜熱回収エコマイザーに対し；

$$Nu = 0.188 * (Fb + Ff * \eta f) * Re^{0.603} * Pr^{0.31} \quad \dots (2)$$

ここで、Nu：ヌッセルト数 ($hg \cdot d / \lambda$)

Re：レイノルズ数 ($Vg \cdot d / \nu$)

Pr：プラントル数 ($Cp \cdot \nu \cdot \gamma / \lambda$)

Fb：フィン付き管のベア部面積割合

Ff：フィン付き管のフィン部面積割合

ηf ：フィン効率

一方、物質伝達特性については、図中の◇印が潜熱回収エコマイザーの実験点を示し、図中の2点鎖線は、熱伝達と物質伝達のアナロジーが成り立つとした場合の次式による実験式に基づく計算値を示す。

$$Sh = 0.188 * (Fb + Ff * \eta f) * Re^{0.603} * Sc^{0.31} \quad \dots (3)$$

ここで、Sh：シャーウッド数 ($hm \cdot d / D$)

Sc：シュミット数 (ν / D)

凝縮現象が生じていない顕熱回収部においては、熱伝達特性に関する実験値(□印、△印)と式(1)、式(2)で示す実験式による計算値とが良く一致している。しかし、ドレン生成がみられる潜熱回収部においては、実験値(○印)と式(2)による計算値との間に若干の食い違いがみられるが、落下凝縮液膜により対流伝熱が阻害されているのではないかと推測される。

一方、物質伝達特性に関する実験値(◇印)は、式(3)の対流伝熱とのアナロジーによる予測計算値よりも約20%下回っており、水平伝熱管に水平ガス流れの実験による結果⁽¹⁾と異なる特性になっている。しかし、これは凝縮水量を潜熱回収量のベースとしたためであり、20%程度の凝縮水の再蒸発が生じていると考えるのが妥当である。

Fig. 2 Characteristics of Heat & Mass Transfer

5. おわりに

現在生産されている産業用ボイラ(小型ボイラ含む)のボイラ効率は87~96%と高いレベルにあるが、設置台数は、労働省統計によるボイラだけでも約6万7千台⁽²⁾と多く、産業用ボイラのエネルギー消費量は製造分野で消費されるエネルギーの約21%⁽³⁾を占め、潜熱回収ボイラ等のさらなる高性能化によるCO₂削減効果は大きい。

参考文献

- (1) 神坂、ほか4名、「排ガスからの水分回収に関する研究」、日本機械学会論文集58巻545号(1992)
- (2) (財)日本ボイラ協会、「ボイラー年鑑、平成11年度版」(2000)
- (3) 通商産業大臣官房調査統計部、平成10年石油等消費構造統計速報(1999)