管巢燃焼形ボイラの開発*

植田 芳治^{*1}, 唐 景良^{*1}, 山本 雅通^{*2}
小林 廣^{*2}, 石谷 清幹^{*3}Development of Tube-nested Boiler Furnace
for Jaggy-Fireball CombustionYoshiharu UEDA, Keiryō TOU, Masamichi YAMAMOTO,
Hiroshi KOBAYASHI and Seikan ISHIGAI

An advanced design concept of the gas-firing combustion chamber for boilers and its application to actual boiler development are presented in this paper. The concept brings about a drastic reduction of the boiler size while limiting the NO_x concentration of the exhaust gas. The key is the accelerated and temperature-controlled combustion in the jaggy-fireball generated in the tube-nested combustor. The proof test of the concept was carried out using small-scale test equipment. Application to actual boilers is under way.

Key Words: Jaggy-Fireball, NO_x , Tube-Nested Combustor, Flow Pattern, Karman Vortex

1. 緒 言

近年, 中小容量ボイラでは安全性や信頼性に加えて高効率化, 小形パッケージ化, 省力化といった面での進歩がめざましい。しかしボイラ本体の設計思想は従来とほとんど変わらず, ボイラの小型軽量化はおもに高負荷燃焼技術に依存してきた。ところが高負荷燃焼を推し進めると燃焼, 伝熱, 環境問題など, いろいろな問題が生じてくる。とりわけ NO_x による環境汚染は, 都市部を中心として深刻な問題になってきており, 低 NO_x 燃焼技術がますます重要となってきた。従来は, ガスタービンでもボイラでも, 燃焼室内火炎が側壁や出口の翼や水管に突き当たると過熱や燃焼不良を起こすことがあるから, 火炎に触れないように設計, 運転するのが通則とされており, 事実, 火炎に接触して不具合を発生した事例は多い。この原則を維持しつつ低 NO_x バーナを設計するとどうしても長炎特性となり, 必然的に燃焼室が大きくなり, しかも必ず

しも十分な低 NO_x 特性が得られない恨みがあった。

そこで著者らは, 従来とは燃焼中の火炎塊(以下火球という)の構造が全く異なる管巢燃焼という新しい燃焼方式を導入し, ボイラの飛躍的な小形化と, 従来それとトレードオフの関係とされてきた低 NO_x 化などを同時に達成した。本報では, 管巢燃焼による新構想の火球構造とその特性把握のために行った実験結果, およびこれを応用した各種ボイラへの適用例について述べる。

2. 管巢燃焼形ボイラの概要

従来のボイラ燃焼室はボイラ全体容積の 40~70% 程度を占めているから, ボイラの小型化に燃焼室の小型化が効果的なことは明らかである。通常のボイラ燃焼室は, 燃料の燃焼空間を水冷壁が取り囲んで構成され, 燃料燃焼機能とふく射を主とする伝熱機能を備えている。この場合バーナの高負荷燃焼特性を向上させれば一定容積内で燃焼できる燃料の量は増大できるが, 同時に火球の温度が上昇し, その熱ふく射により水冷壁の熱負荷が増す。これを安全限界以内に保持する必要があるから燃焼室熱負荷が制限されることになる。これはボイラの実績値からも裏付けられる⁽¹⁾⁽²⁾。

そこでまずガス燃料を対象として, 冷却固体面に接

* 平成3年11月17日関西支部第250回講演会において講演, 原稿受付 平成4年7月16日。

^{*1} 正員, (株)ヒラカワガイダム (〒520-23 滋賀県野洲郡野洲町三上2308)。

^{*2} (株)ヒラカワガイダム。

^{*3} 名誉員, 大阪大学名誉教授 (〒659 芦屋市岩園町8-7)。

する火炎のクエンチング現象が固体面のごく近傍に限定されること⁽³⁾を利用し、新しく管巢燃焼方式を開発した。これは火球内に水管群を配置し、この水管群で火球内部を積極的にかく乱した火球の構造(これをjaggy-fireballという)を構成し、燃焼と伝熱を同時に促進させるものである。図1に管巢燃焼の概念を示す。設計が適切であれば、これにより燃焼を促進しつつ火炎温度が適度に抑制され、サーマルNO_xの発生抑制とボイラの小型化が同時に期待できる。

3. プロトタイプ実験機による評価試験

上記した管巢燃焼の可能性を実証すること、およびその諸特性を把握することを目的として、熱入力80 kWの燃焼実験機を製作し評価試験を行った。

3.1 実験機の概要と実験方法 実験缶体は図2に示すように大気開放形で燃焼室は断面が180×180 mm、長さ585 mmの水冷箱形構造とし、燃焼室を出た排ガスは180×100 mmの垂直煙道を通して排出される。この燃焼室の中に60 mmピッチで3列5段の合計15本、外径38.1 mmの水管を基盤目に設けたA缶体と、水管を全く設けないB缶体との2種類を作製し、比較試験を行った。バーナとしては拡散バーナ(バーナ噴口径D 89 mm)、予混合バーナ(バーナ噴口径132

図1 管巢燃焼の概念

図2 プロトタイプ実験機(A缶体)

×167 mm)および部分予混合バーナ(バーナ噴口径D 85 mm)をそれぞれ試作し、バーナヘッドから水管までの距離 L をかえて実験した。なお燃焼ガス温度は素線径0.3 mmのPR熱電対により、また各水管の局所伝熱面熱負荷は肉厚5 mmの水側およびガス側に埋め込んだ直径0.5 mmのシース形K熱電対により測定した。図3はA缶体の場合のバーナと水管の位置関係を示す。

3.2 実験結果 燃料にメタンガスを用いて行った本実験において、定格燃焼時の缶体出口ガス温度はA缶体で900°C、B缶体で1200°C程度であった。図4は拡散バーナおよび予混合バーナにおけるNO_x排出特性を示す。これより火球内に水管群が装着されても、バーナ固有のNO_x排出傾向は変化しないが、排出NO_x値は低下することがわかる。図5は予混合バーナの場合における燃焼場のガス温度、NO_x濃度、CO濃度の分布についてA缶体とB缶体との比較を示したものである。A缶体の場合はB缶体に比べ、水管群により燃焼ガス温度が適度に抑えられ、これによりサーマルNO_xの生成が抑制されていると考えられる。さらにCO分布をみると、B缶体よりA缶体のほうがCOガスの消滅する位置は上流側に移行しており、混合が良く、温度場が適正であれば水管群の火炎かく乱効果により燃焼も促進されることがわかる。

図6は部分予混合バーナの場合の各缶体出口におけるCO濃度、NO_x濃度を示す。前述の拡散バーナ、予

図3 バーナと水管の位置関係(A缶体)

図4 NO_x 排出特性

図 5 ガス温度およびガス濃度分布

図 6 管巢燃焼の燃焼特性

図 7 バーナヘッドから水管までの距離の影響

混合バーナと同様A缶体のほうがB缶体より排出NO_x値は低下しているが、許容残存CO濃度(現在、公的規制値はないが実用上100 ppm程度なら問題ないとしてよい)が100 ppm以下の適正な空気比範囲は、実用上問題のない範囲で若干狭くなっている。図7は部分予混合バーナの場合のバーナヘッドから水管

までの距離Lの影響をみたもので、この距離を短くすることによって排出NO_x値は低減できるが、逆にCO濃度が上昇して燃焼が悪化する傾向がみられる。これらはバーナ固有の混合性能や管群内の流動、伝熱特性にもよるが、距離Lが燃焼性やNO_x排出特性に

強く影響していることを示している。

図8～10は、缶体のバーナ軸に位置する水管中央部の局所伝熱面熱負荷の円周方向分布を各バーナ別に示す。拡散バーナの場合の局所伝熱面熱負荷は、1段めよどみ点では低く後段水管ほど上昇しており、予混合バーナの場合には1段め水管のよどみ点にピークが現れるのと相違している。また、部分予混合バーナの場合の局所伝熱面熱負荷分布は、予混合バーナの場合のそれと傾向はよく似ているが、1段めよどみ点ではさらに高い値となっており、バーナ噴流特性の影響と考えられる。しかし、いずれのバーナにおいてもピーク値を示す位置は異なるものの、図8～10の分布パターンはおおむね非燃焼場における対流熱伝達分布のパターン⁽⁴⁾に一致しており、ピーク値も 350 kW/m^2 以下となっている。

以上により管群配列やバーナの影響はもちろんあるが、適切に設計すれば良好な燃焼性と低 NO_x 性が同

時に達成され、局所伝熱面熱負荷もほぼ許容限界内であることが実証された。これは管群で火球をかく乱して jaggy-fireball を構成し、燃焼と伝熱を促進し低 NO_x を達成するという設計概念の正当性を示す。

4. 管群流れの可視化実験

管巢燃焼においてはバーナと水管までの距離が短くて管群内流れはバーナ噴流の影響を強く受けること、および管群内で燃焼と伝熱が同時進行することから、管群内の流動様式を知ることは重要である。また、非燃焼時であっても燃焼時との比較において逆流領域や逆流速度に大きな差が生じないことが知られている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこでトレーサとしてカイロ灰を使用し、バーナヘッドを模擬したノズルからの噴流とそれに伴う二次的流れおよび各管後流におけるカルマン渦の挙動に注目して非燃焼流れ場の可視化実験を行った。

図11、12はその結果の一例である。本実験ではトレーサ粒子としてカイロ灰を使用しているため、流れの追従性の点では若干問題があり、流れの両側面で不明りょうな部分もあるが、これにより全体像が把握できる⁽⁷⁾。この結果より、先広がり形噴流の場合は管に当たるとすぐに一様流化する傾向があるのに対して、ストレート形の場合は噴流の影響がかなり後流部まで延びていることがわかる。噴流に伴う再循環流れも両者で流動方向の違いはあるが、いずれも上流側の管を巻き込んでいることが認められ、燃焼場においては低温

図8 拡散バーナの局所伝熱面熱負荷

図9 部分予混合バーナの局所伝熱面熱負荷

図10 予混合バーナの局所伝熱面熱負荷

図11 噴流を伴うフローパターン(ストレート)

図12 噴流を伴うフローパターン(先広がり)

燃焼ガスの自己排ガス循環作用による NO_x 低減効果が期待される。さらに管群内各管の後流部に注目すると、トレーサが大きく乱れかなり混合が促進されていることがわかるが、基盤目配列の場合には管列による流れ方向の流路分割が認められる。基盤目配列の場合、流れ方向管ピッチ比をある程度以上とすると、各管の後流部にカルマン渦が生成される点では流体混合が促進されるが、流れ方向に流路が分割される点では混合が妨害されると考えられる。これは燃焼場において、混合の悪いバーナほど良好な燃焼性が得られる空気比範囲が狭くなることを示唆している。この結果より管巢燃焼においては、バーナの特長とは別にバーナと水管までの距離や管群の配列が燃焼性能や低 NO_x 性能に強く影響することが予想される。

5. 各種ボイラへの適用例

以上の結果を踏まえて管巢燃焼室の段階的スケールアップと各形式ボイラへの応用開発を進めている。その経緯と現状を紹介する。

5・1 真空式温水ヒータ 上述したプロトタイプ実験機とほぼ同一の缶体構成で出力 290 kW の真空式温水ヒータを試作し、各種開発試験を行った。まず試作缶体とのマッチングの良いバーナ開発に着手し、拡散混合方式でありながら極めて混合特性が良好で管巢燃焼用に適したバーナを開発した。これにより燃焼範

図 13 出力 290 kW 真空式温水ヒータ

図 14 NO_x の排出特性

囲が広く、低燃焼域で若干 NO_x 濃度は高くなるが、全燃焼域で排ガス NO_x 濃度 60 ppm (O_2 0% 換算値) 以下の低 NO_x 性能を満足する新形機が完成した。本機の外形図を図 13 に NO_x 排出特性を図 14 に示すが、従来形との比較では据付面積で 1/3、重量で 2/3 に小形軽量化されている。本機は長期にわたるフィールドテスト後、230~580 kW までの 5 機種が製品化され、都市形業務用温水機として普及しつつある。

5・2 モジュラ式水管ボイラ 水管ボイラに管巢燃焼を適用すれば、従来の燃焼室をなくしてチューブバンクのみで水管ボイラを構成できる。このチューブバンクをいくつかのセクションに分割可能なモジュール構造とすれば、搬入と現地据付工事が容易となる。このような水管ボイラを開発するため、図 15 に示す出力 2 250 kW の試作機で各種開発試験を行った。この結果に基づいた同容量の実機が近々運転に入る。な

図 15 出力 2 250 kW モジュラ式水管ボイラ

図 16 出力 1 250 kW 炉筒水管式ボイラテスト缶体

お本機は近く出力 30 000 kW 程度までシリーズ化される。

5・3 炉筒水管ボイラ 従来の炉筒煙管式ボイラは水管式ボイラにはない特徴が多く、国内ではいちばん設置数が多い。この特徴を生かし、炉筒内に水管を設けて管巢燃焼構造とした炉筒水管ボイラの開発が、現在、図 16 に示す出力 1 250 kW の大気開放機で進行している。

6. 結 言

以上述べたように、実機による確認試験を行いながら、段階的に管巢燃焼形各種ボイラの開発とそのスケールアップを進めている。従来は大容量ボイラほど燃焼室負荷率を低くせざるを得なかったが、管巢燃焼方

式ではその巨大な燃焼室容積が実質的には零に近く構成されるから、この方式のメリットは大容量ボイラほど大きくなる。今後はこの方式の適用範囲を広げ、特に都市部で要求の強いボイラの小形化と低 NO_x に対応する予定である。

文 献

- (1) 石谷・ほか 5 名, 蒸気動力, (1989), 161-162, コロナ社.
- (2) 小林, 関西支部第 148 回講習会教材, 1-10 (1987).
- (3) 幸重, 大阪大学修士論文, (1971).
- (4) 相場, 伝熱研究, 27-106(1987), 70-88.
- (5) Lockwood, F. C., ほか 2 名, *Combust. Flame*, 3-3(1974), 283.
- (6) 青木, 機論, 57-539, B(1991), 2301.
- (7) 唐・ほか 5 名, 関西支部第 65 期定期総会講演講概要集, (1990), 115-116.