

小規模ボイラーによる部分負荷効率の改善

川重冷熱工業(株)

江口 和喜

An Improvement of the Part Load Efficiency by a Small-capacity Boiler

by Kazuyoshi Eguchi

1. はじめに

当社は日本で最初に商品化した吸収式冷温水機を中心とする空調事業と水管・炉筒煙管・廃熱・貫流ボイラーからなるボイラー事業の二本柱で、事業展開をしている。生産拠点は滋賀県草津市に位置し、名神高速の栗東IC、新名神高速の草津ICに近く、パッケージ型製品の工場立地条件として適した環境にある。

また、当社は多種の異なるボイラー形式を生産していることから、伝熱・水循環・気水分離・燃焼装置のボイラー構成上の基本要素において、自ずと各ボイラーの長所・短所を把握しており、顧客ごとのニーズに合致したボイラー形式の提供、さらには、異なるボイラー形式の利点を組み合わせた新規コンセプトの製品を開発することで、種類が多いことによる経営資源力の分散とならないことを目指している。

温暖化が地球の環境に大きな影響を与えることから、低炭素化技術が課題であるが、ボイラー設備での解決策は、当面、熱効率の向上といえる。しかしながら、エコマイザーの熱回収装置が標準的に装備され、機器単体の熱効率は96%以上に達している。ドレン回収がない常温給水の条件に限定されるが、潜熱回収の熱効率100%のボイラーも実現されている。このように、機器単体の熱効率の向上は上限に達してきていると考えられる。

最近の燃料価格の高騰は深刻な問題であり、各企業の省エネの取組みには頭が下がる思いがある。蒸気負荷機器の効率的運用、必要時以外の機

器停止、蒸気ドレンの熱回収徹底等、無駄排除に努力されている。これらの効果もあり、ピーク時には最大負荷の運転となるが、日常のボイラー平均負荷率は20~40%程度の低負荷で運転されている場合が多く見られる。このような低負荷時では、発停による炉内のパーズ損失等を防ぐことが肝要である。

小容量ボイラーの「小型ボイラー」の多缶設置では、頻繁な発停によるパーズ損失等で運転効率が低下する場合があります。大容量ボイラーではターンダウン限界から極小負荷で効率が低下する場合があります。実動熱効率の改善策として、中容量の「小規模ボイラー」をPI(比例積分)制御とし、できる限り発停を少なくし、かつ、その複数台をPI台数制御することで部分負荷効率を改善することを提案したい。

2. 現状の課題と改善の着眼点

1) 小容量ボイラーの多缶設置での課題

ボイラー設備において、小型ボイラー(多管貫流)の多缶設置が多く採用され、これらは、取扱い資格や法定の検査の関係で事業者にとって利便性が良いことも関係している。

反面、大容量負荷に対応する小型ボイラーの多缶設置の場合、保守費の増加・簡易な制御方式による実動熱効率の低下などの課題がある。機器単体の熱効率は高いが、蒸気量の変動に対し、ボイラーが起動・停止を頻繁に繰り返すことのパーズ損失、発停にともなう蒸気の質低下による熱損失は避けられない。その視点から部分負荷効率の改

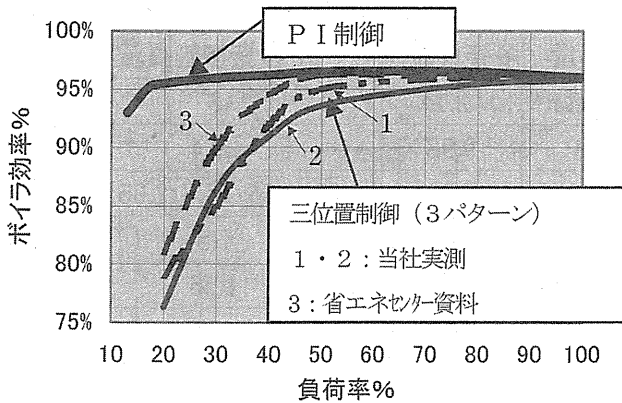


図1 単機でのPI制御と三位置制御の部分負荷効率の比較

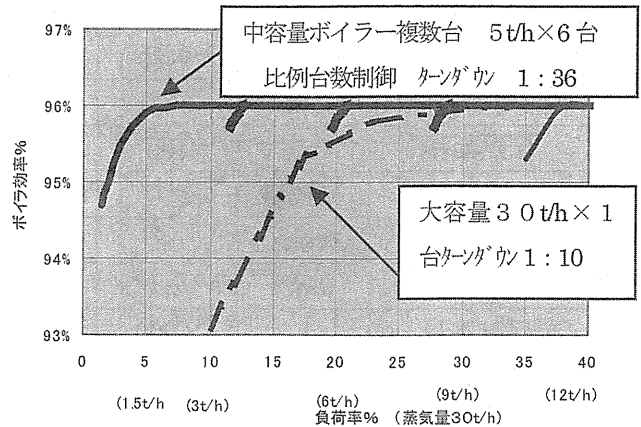


図2 大容量と中容量多缶の部分負荷効率

善に着目した。

図1は単機でのPI制御（連続燃焼）と小容量ボイラーに多い三位置制御（断続燃焼）の効率を負荷に対して示したものである。三位置制御では、圧力スイッチの切断差の設定によりオンオフ回数が増減するので3パターンの効率を示す。

三位置制御は①バーナをオフするとポストパーズや再着火のためのプレパーズの損失が増加、②バーナの高燃焼⇄低燃焼の切替時に、発煙や未燃分発生抑制として過渡的に空気過剰にする必要があり排ガス損失が増加、③発停による蒸気の質低下に伴う熱損失、④停止待機中のドラフトによる熱損失（台数制御の場合）により、部分負荷効率が低下する。

2) 大容量ボイラーでの課題

大容量ボイラー（水管ボイラー）はPI制御であり、また、空気過剰率を適正にする排ガス O_2 濃度の押込送風機の回転数制御がされていることが多く、熱効率は優れている。しかし、蒸気負荷が大きく変化するユーザにおいては、燃焼上のターンダウン限界から極小負荷で実動熱効率が低下する場合がある。

例えば、大容量ボイラー（蒸気量30t/h）のターンダウンは10%で、3~30t/hの制御幅となるが、燃焼性能上1/10の低負荷では効率が低下する。一方、中容量（5t/h）の場合は、ターンダウンは16%（1/6）であるが、0.8~5t/hの範囲で高い効率を維持する。この5t/hを6台設置すれば、ターンダウンは（1/36）に拡大し、蒸気量

0.8~30t/hの範囲で高い効率が実現できている。

某地域冷暖房殿の調査報告例では、最大蒸気量約30t/hの設備で、春・秋季は負荷が極めて少なく、蒸気負荷6t/h以下の運転が年間で73%、（内、3t/h以下は年間44%）を占め、30t/hが必要なのは年間27%となっている。

産業向け設備ではこのような低負荷は少ないと思われるが、図2は、大型水管ボイラー（単機設置）と中容量ボイラー（多缶設置）での極小負荷時の熱効率を示す（当社実績の比較）。

なお、ボイラー形式ごとの仕様比較を表1に示す。

3) 電気動力での課題

ボイラー設備の電気動力は押込送風機が大半を占める。電力消費の低減対策はインバータによるが、負荷が低いほど効果が大きいのは周知のとおりである。

その効果を、同じ総蒸気量で比較すると、大容量ボイラー1台が最も低減効果が大きく、設置缶数が多くなるほど消費電力の低減効果は減少する傾向がある。これは、多缶設置では、蒸気負荷が小さくなれば、台数制御で運転台数は減少するが、反面、押込送風機は大きい動力（高い回転数）で運転することになり、消費電力が増加する運転パターンがあるためである。運転パターンは台数制御の設定方法や台数増加時と台数減少時により差がでる。運転パターンによる最大と最小の電力（kW）を図3に示す。インバータによる消費電力は、設置台数が少ないほど低減すると言える。

表1 ボイラー形式ごとの仕様比較 (数値は代表例および当社比)

		水管	炉筒煙管	小容量	多管貫流	中容量多管貫流
実蒸発量(容量)	t/h	5	5	1.68	2.1	5
伝熱面積	m ²	100	64	9.8	9.98	29.4
最高使用圧	MPaG	適宜	0.98,/1.56	0.98	0.98	0.98/1.56/1.96/2.35/3.2
機器重量	ton	12	11.5	2.05	2.25	7.8
容量当重量	ton/t	2.4	2.3	1.22	1.07	1.56
保有水量	L	3 000	6 000	150	120	560
容量当保有水	L/t	600	1 200	90	57	112
制御方式	燃焼制御	連続	連続	断続 (3 位置)		連続
	給水制御	連続	連続	断続 (2 位置)		連続
ボイラー区分		ボイラー	ボイラー	小型ボイラー		小規模ボイラー
取扱資格		ボ技士	ボ技士	特別教育者		講習終了者

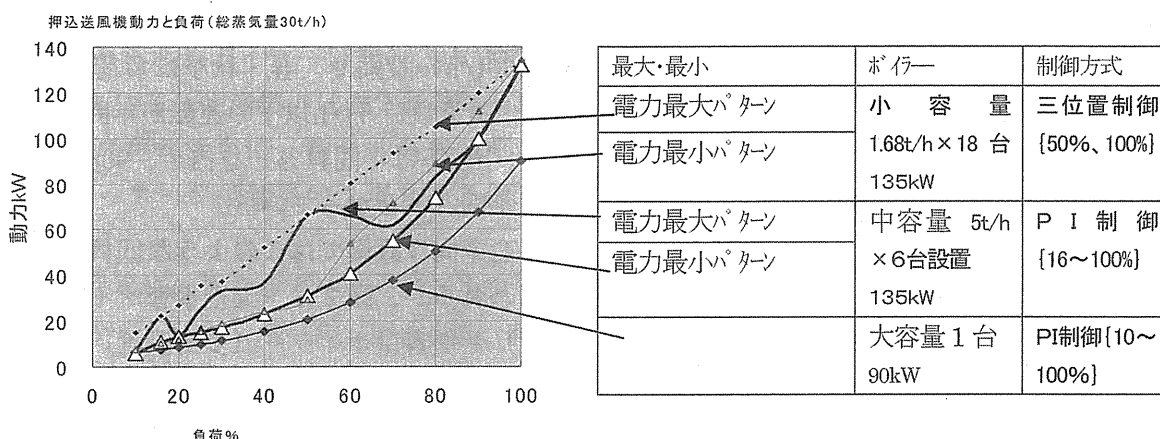


図3 押込送風機動力と負荷 (大容量, 中容量, 小容量ボイラーの比較: 当社比)

3. 課題の改善策

部分負荷効率を改善するための条件は、以下のとおりである。

- ① 単体機器効率が高い製品を選定する。
- ② 広い負荷範囲を高効率で追従でき、かつ、適当な複数台となるボイラー容量を選定する。
- ③ 「燃焼を連続運転 (比例)」とし、ターンダウンを広くとり、バーナを発停させない。
- ④ 「給水を連続制御 (比例)」とし、給水による燃焼量増減の外乱を防止する。

発生蒸発量=燃焼入熱量=給水流量の平衡を保つ。断続制御の「給水→蒸気圧低下→燃焼量変化→水位変動→蒸気の質低下」での給水にもなう熱損失を防止する。

- ⑤ 多缶設置の台数制御は、全缶が発停の少ない連続運転の比例追従制御とする

4. 改善のための取組み

- 1) 適当な複数台数となるボイラー容量の開発
10~60t/hの領域を適当な複数台数となるように、換算蒸発量を中容量の4, 5, 6t/hとした。なお、取扱資格が緩和される小規模ボイラー適用の法定伝熱面積30m²以下の多管貫流ボイラーとした。多数の小型ボイラーが頻繁に発停することの熱損失の防止、すなわち、部分負荷効率の改善を目的とし、これらを解決するために、大型水管ボイラー相当の高性能、高機能 (燃焼・給水ともにPI制御) および取扱い簡便な小型貫流ボイラーの両者の長所を持たせた中容量の「小規模適用の多管貫流ボイラー」が適切と判断した。
- 2) 燃焼を連続制御 (比例) とするためのボイラー構造
伝熱面が常に水面下である水管ボイラーや炉筒

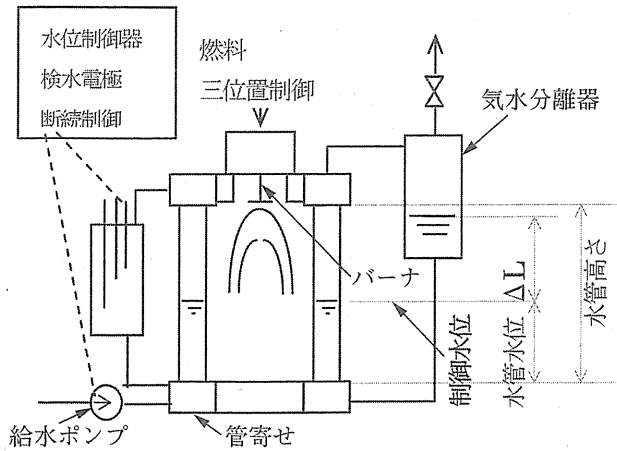


図4 本体水管の水位制御 (断続制御)

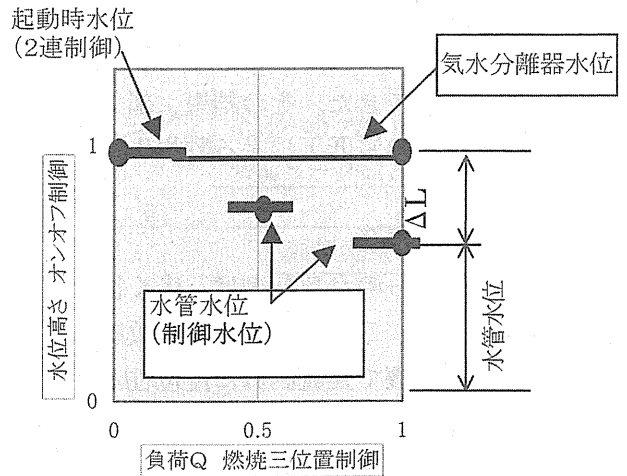


図6 本体水管制御のイメージ図

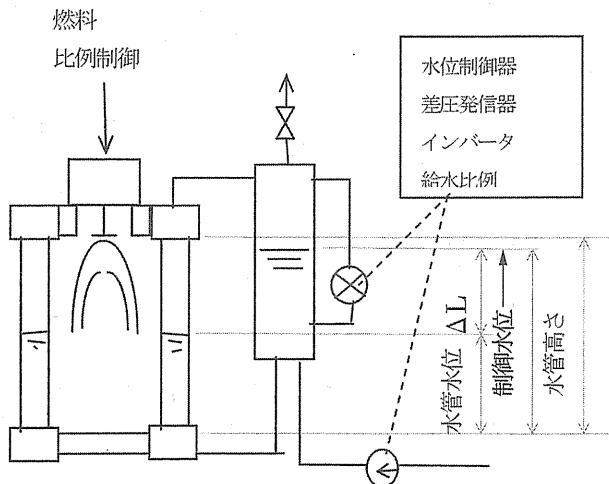


図5 気水分離器の水位制御 (給水PI制御)

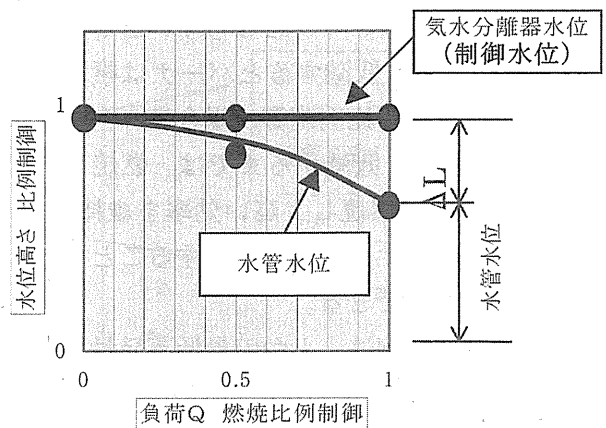


図7 気水分離器制御のイメージ図

煙管ボイラーにおいては、比例燃焼はバーナの性能により実現できる。しかし、多管貫流ボイラーの比例燃焼は容易ではない。多管貫流ボイラーの燃焼装置は三位置制御 (段階制御) であるが、これは、装置が簡易にできる理由だけではなく、比例燃焼が容易でないことがあげられる。燃焼負荷により水位を変化させる多管貫流ボイラー特有の水位制御に起因するもので、本体水管の水位検出による給水制御では、連続して比例燃焼負荷に対応する水位を制御させることが複雑となり、水管過熱の恐れもある (図4, 図6)。

この解決策として、ボイラー本体の構造において、気水分離器で水位検出し給水制御することで、比例燃焼負荷と水位の挙動が連続してバランスすることが可能となり、最小燃焼でも水管が過熱する恐れがない制御となり、連続燃焼 (PI制御) に

することが実現できた (図5, 図7)。

3) 給水の断続制御の課題と連続制御

給水の断続制御の課題は、蒸気の質と考えられる。小型貫流ボイラーの給水は断続制御が多く、給水オフ時は0%、オン時は150~200%給水を繰り返すが、一方、燃焼量は三位置制御で、0⇔50⇔100%の繰返しで、これらは各々関連なく動作する。この入出力の不一致が外乱となり、蒸気圧力変動、燃焼量増減、水位変動を繰り返すことになる。なお、水位が変動することで、蒸気の質低下による熱損失がともなう。すなわち、蒸気中の飽和水は顕熱であるが、蒸気の質低下は、蒸気配管でドレンとして排出され、有効に使われない熱損失となり熱効率が2~3%低下する可能性がある。

この解決を目的として、燃焼・給水ともにPI制

御とし、発生蒸発量＝燃焼入熱＝給水流量の平衡を行うことで水位を安定させ、蒸気の質も安定し、高い乾き度が維持できた。その結果、部分負荷で発生しやすい蒸気の質低下による熱損失の改善に効果があった。

4) PI台数制御の開発

多管貫流ボイラーの台数制御は、広く世に受け入れられているが、これらは断続の台数制御（三位置）である。単機で連続制御に優位性があることは前述のとおりであるが、複数設置の台数制御においても、連続制御（PI制御）とすることが部分負荷効率の大きな改善となる。

三位置台数制御においても燃焼しているボイラーは高燃焼⇔低燃焼の移行を優先し、できる限り発停させない制御ロジックとなっているが、全容量の1/2負荷以下に低減するとバーナは頻繁な発停を始める。一方、比例制御の場合は、全容量の1/6負荷（16%）に低減するまでは、燃焼しているボイラーを連続燃焼し、高い効率を維持する。台数制御時のオンオフ回数が減少することで、部分負荷効率が向上できる。

なお、PI台数制御は、1台の最低蒸発量から合計最大蒸発量まで、制御することができ、その間、当然ながら燃焼台数の変更をしながらも、一定の

圧力で蒸気を供給することができる。断続の台数制御のように、高低燃焼と燃焼台数を切替える圧力スイッチの切断差による供給蒸気圧のオフセットは生じない。

5. 実証設備での検証

1) 連続制御（PI制御）と断続制御（三位置）の比較を実機で検証をした（表2）。小容量貫流ボイラー 2t/h×4台と中容量貫流ボイラー 4t/h×2台の各々8t/hのボイラーを設置し（図8）、負荷変動と部分負荷を図9のように与えながら比較実測を行った。各々の蒸気圧の追従性、熱効率の差を実測し、ほぼ、計画とおりの結果が得られた（表3）。

2) 断続制御（三位置制御）

負荷変動に対し、4台の小容量ボイラーは頻繁に燃焼の高低切替と発停を繰り返す、蒸気圧が大きく変動している（図10）。

三位置台数制御は、熱効率を優先して発停を少なくすると、蒸気圧のオフセットが大きくなる。逆に、蒸気圧維持を優先して、圧力スイッチの切断差を狭くすると、蒸気圧オフセットは小さくなるが、頻繁に発停を繰り返す、総合熱効率の低下が大きくなる。

表2 実機の比較検証 設備のボイラー仕様

	小容量貫流ボイラー	中容量貫流ボイラー
換算蒸発量(kg/h)・台数	2000×4台	4000×2台
燃焼制御方式	三位置制御	PI制御
給水制御方式	オンオフ制御	PI制御
台数制御方式	三位置台数制御	PI台数制御

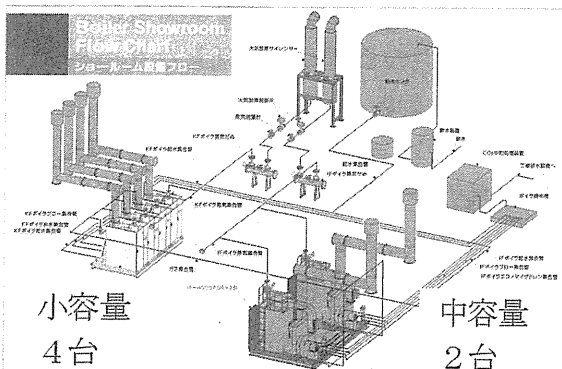


図8 比較検証設備

約5分ごとに、2→3→2→3.5・・・→2→5t/hの繰り返し増加負荷の例。

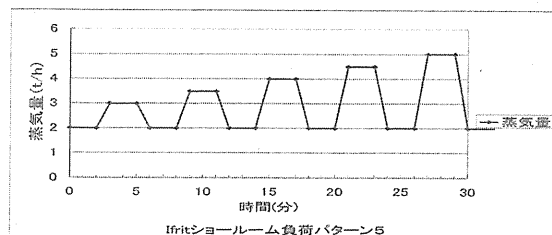


図9 負荷変動パターン例（随時変更可）

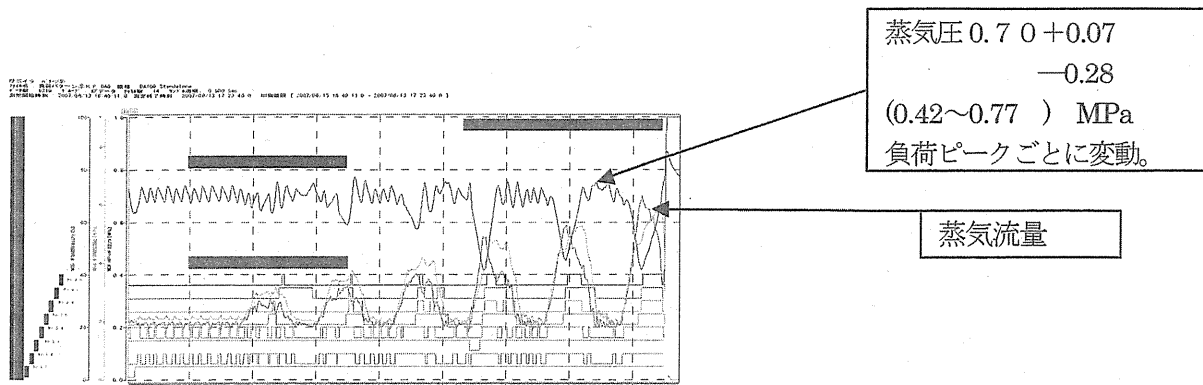


図10 負荷パターン例での断続制御（三位置）データ

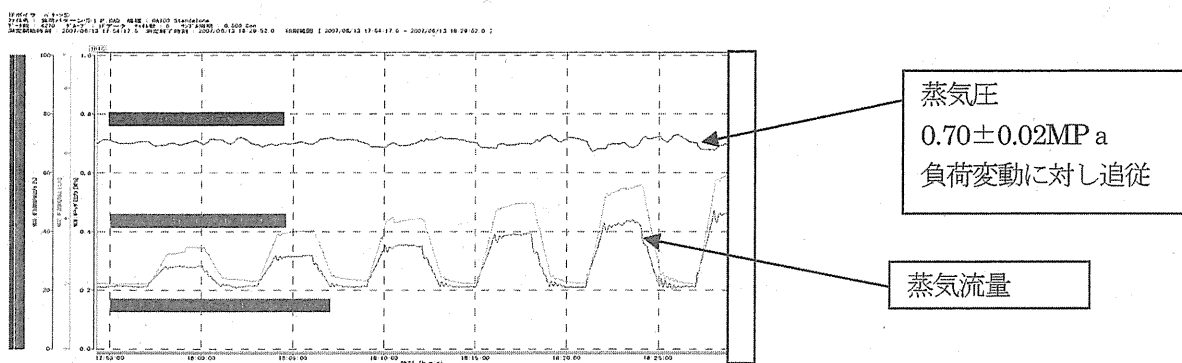


図11 負荷パターン例での連続制御（PI制御）データ

3) 連続制御（PI制御）

大きな負荷変動に対し、蒸気圧は安定して追従しており、また、全数が発停することなく連続運

転している、部分負荷効率の低下は少ない。（図11）

4) 性能比較データ（例）

表3 性能比較の結果

CO₂排出係数=2.08kg-CO₂/m³N

ボイラー形式		小容量4台	中容量2台
蒸気流量計	ton/30min	2.52	2.52
13A燃料流量計	m ³ N/30min	183.5	174
断続運転, 連続運転 の状況	オンオフ 回数	1号：連続。	1号, 2号
		2号：1回。	とも連続。
		3号：6回。	発停なし。
		4号：7回	
蒸気圧の挙動	MPaG	0.42~0.77	0.68~0.72
ボイラー総合効率	%	90.7%	95.7%
CO ₂ 排出 (計算値)	kg/30min	382	362



図12 ショールーム全景

6. おわりに

前述の連続制御（PI制御）と断続制御（三位置）の比較を実機検証する設備を弊社ショールームに常設している。設備を計画される場合に、負荷変動を想定または再現することで、蒸気圧の追従性、熱効率および省エネメリットを事前に把握していただくことを目的としている。シミュレーション計算を確認するための設備として、ショールームはいつでも客先ごとに異なる負荷パターンを比較検証することができ、ご利用いただいている。

部分負荷効率の改善を目的とし、大型水管ボイラー相当の高性能、高機能（燃焼・給水ともにPI制御）と取扱い利便性の高い小型貫流ボイラーの両者の長所を持たせた「小規模多管貫流ボイラー」は、実動熱効率の向上、台数減少による保守費の低減、長寿命化によるライフサイクルコスト削減、省資源化を可能とした優れた特長を有している。これらの特長を活かし、より社会に貢献していきたいと考えている。

◆当協会発刊図書のご案内

◇「ボイラー構造規格の解説」

◇「圧力容器構造規格の解説」

平成15年4月30日に全面改正されたボイラー構造規格、圧力容器構造規格を条文ごとに関係通達、強度計算例を収録し、解説を加えた規格についての決定版。

「ボイラーの構造規格の解説」

A4判227頁、定価3,500円（消費税込み）。

「圧力容器構造規格の解説」

A4判366頁、定価5,000円（消費税込み）。

◇「ボイラー構造規格—改正規格及び関係通達—」

◇「圧力容器構造規格—改正規格及び関係通達—」

平成15年4月30日に全面改正されたボイラー構造規格、圧力容器構造規格の全条文と関係通達を掲載。規格を知るうえでの必携の書。

「ボイラー構造規格—改正規格及び関係通達—」

B5判82頁、定価1,000円（消費税込み）。

「圧力容器構造規格—改正規格及び関係通達—」

B5判171頁、定価1,500円（消費税込み）。

※なお、いずれも別途送料がかかりますので、ご注文の際は、当協会本部技術普及部または各都道府県支部までお問合せください。