
高炉ガス焚き高効率発電設備

High Efficiency Blast Furnace Gas Firing Power Plant

相馬 冬樹(Fuyuki Soma) 高野 英樹(Hideki Takano) 藤川 徳治郎(Tokujiro Fujikawa) 山口 健蔵(Kenzo Yamaguchi)

要旨：

省エネルギーの進行によって増加する発電所向け副生ガスを高効率で電力転換する目的で千葉製鉄所西発電所 3 号発電設備が建設された。本プラントは大型の高炉ガスヒータの設置、加圧燃焼方式の採用、大型ファンへの流体継手の設置やライフルチューブの採用に代表される当社の基本エンジニアリング等によって世界最高レベルの効率を実現した。また、材料は当社の製品が基本になっており、この中には通産省特認の電縫管やライフルチューブ等が含まれる。現在、本プラントは省エネルギーの主要戦力として順調に稼動している。今後の高炉ガス焚き発電用プラントの指針になるものと考えられる。

Synopsis：

Conservation of energy is one of the most important problems which we are confronted with. We have so far accomplished remarkable records in devising measures for a power generating plant to save energy. A huge power generating plant geared to product 125000 kW of electricity from blast-furnace off-gas (BFG) was put on stream at Chiba Works. The details of this new plant are described by referring to No.3 power generating plant which was installed at West Power Plant at Chiba Works. Achievement of the highest efficiency level in the world at a BFG firing power generating plant was made possible by implementation of the BFG heater, forced draft system and others. By the adoption of these systems, plant net efficiency can attain a high value equivalent to those at advanced supercritical pressure heavy oil firing power plants. With this in-plant power generating unit, Chiba Works is now 75% selfsufficient in electricity.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

相馬 冬樹^{*2} 高野 英樹^{*3} 藤川 徳治郎^{*4} 山口 健蔵^{*5}

High Efficiency Blast Furnace Gas Firing Power Plant

Fuyuki Soma, Hideki Takano, Tokujiro Fujikawa, Kenzo Yamaguchi

要旨

省エネルギーの進行によって増加する発電所向け副生ガスを高効率で電力転換する目的で千葉製鉄所西発電所3号発電設備が建設された。本プラントは大型の高炉ガスヒータの設置、加圧燃焼方式の採用、大型ファンへの流体継手の設置やライフルチューブの採用に代表される当社の基本エンジニアリング等によって世界最高レベルの効率を実現した。また、材料は当社の製品が基本になっており、この中には通産省特認の電縫管やライフルチューブ等が含まれる。現在、本プラントは省エネルギーの主要戦力として順調に移動している。今後の高炉ガス焼き発電用プラントの指針になるものと考えられる。

Synopsis:

Conservation of energy is one of the most important problems which we are confronted with. We have so far accomplished remarkable records in devising measures for a power generating plant to save energy. A huge power generating plant geared to product 125 000 kW of electricity from blast-furnace off-gas (BFG) was put on stream at Chiba Works. The details of this new plant are described by referring to No. 3 power generating plant which was installed at West Power Plant at Chiba Works. Achievement of the highest efficiency level in the world at a BFG firing power generating plant was made possible by implementation of the BFG heater, forced draft system and others. By the adoption of these systems, plant net efficiency can attain a high value equivalent to those at advanced supercritical pressure heavy oil firing power plants. With this in-plant power generating unit, Chiba Works is now 75% self-sufficient in electricity.

1 緒 言

千葉製鉄所の西発電所3号発電プラントは、省エネルギーの進行によって増加する発電所向けの副生ガスを高効率で電力に転換し、製鉄所内の電力自給率を向上させる目的で計画された高炉ガス焼き高効率発電設備である。計画段階でプラントの高効率化に関して種々の検討が行われ、従来の常識を打破した新技術をいくつか採用している。すなわち、ボイラ排ガス顕熱を利用してボイラ主燃料である高炉ガスの温度を上昇させる大型の鋼管式ガス熱交換器やボイラ排ガスの誘引ファンを省略した加圧燃焼方式等である。昭和57年7月から建設工事が始まり、昭和59年3月に通産局の検査に合格して現在まで順調に移動している本プラントは、これら当社の基本エンジニアリングにより高炉ガス焼き発電プラントとしては世界最高レベルの効率を実現した。

一方、ボイラチューブには通産省特殊認可の電縫管やライフルチューブという当社開発品を含めて当社製品を全体の約95%に使用しているのをはじめ、タービン及び発電機のロータ、発電機及び変圧器の鉄心等にも当社の製品が多数使用されている。

この西発電所3号発電プラントの概要を、高効率化の項目を主体に、以下に説明する。

2 設備の概略仕様

西発電所3号発電プラントの全容を Photo 1 に示す。さらにボ

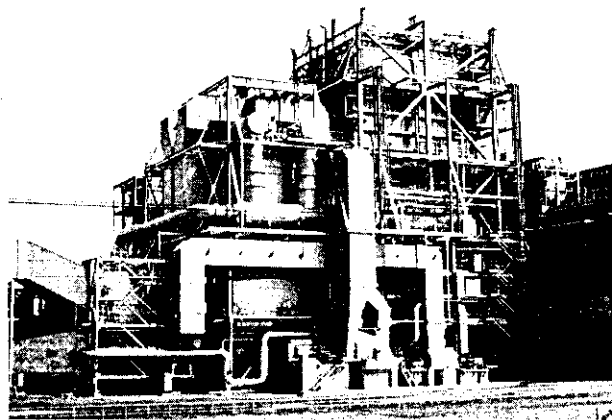


Photo 1 View of No. 3 power generating plant

イラ断面図とプラント系統図をそれぞれ Fig. 1 及び Fig. 2 に示す。

西発電所には1号及び2号の同型の既設プラントがあるが、これらと比較した3号発電プラントの概略設備仕様を Table 1 に示す。出力が75 000 kWの既設1, 2号プラントと比較して125 000 kWの3号発電プラントはボイラ設備が加圧燃焼方式を採用していること、工場送気ラインに720 kWの減圧タービンを設置していること等の差異がある。

*1 昭和59年12月25日原稿受付

*2 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査 (掛長)

*3 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査 (課長)

*4 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査 (課長)

*5 千葉製鉄所エネルギー部エネルギー技術室主査 (掛長)

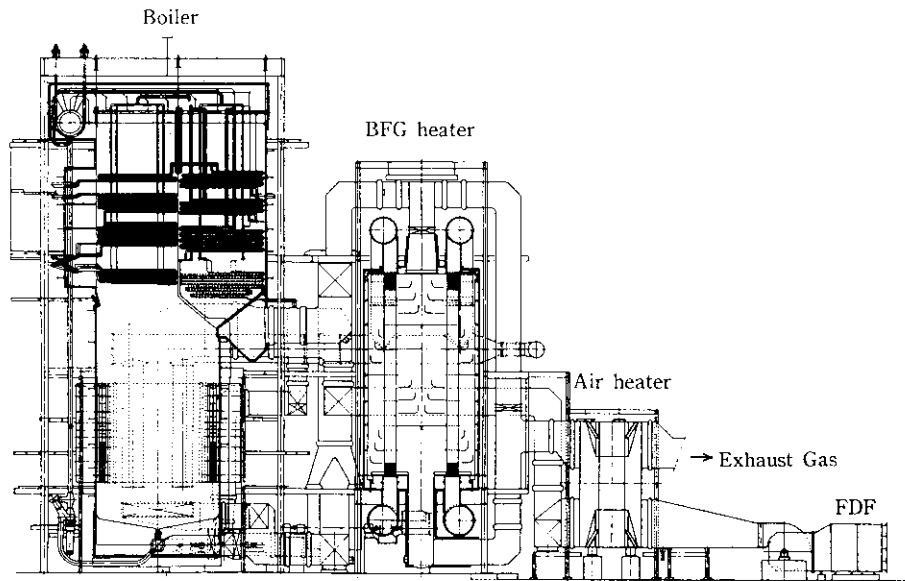


Fig. 1 Side view of boiler plant

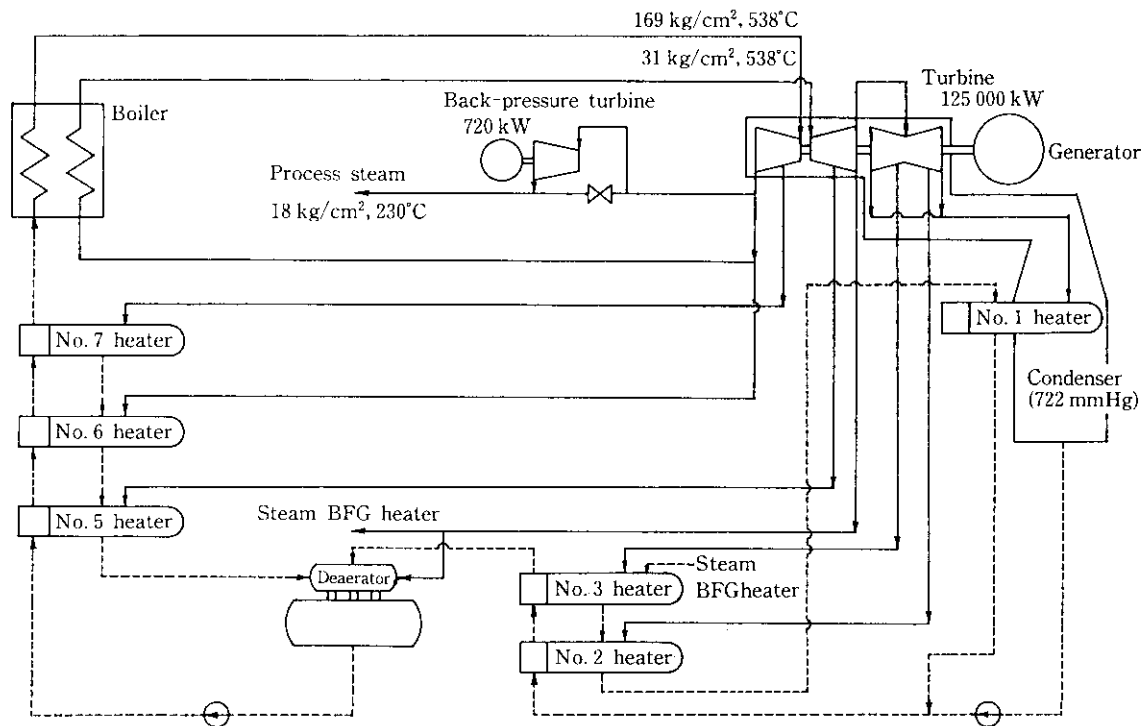


Fig. 2 Steam flow of No. 3 power plant

3 高効率化の項目

3.1 ボイラ関係

3.1.1 Bガスヒータ

高炉ガス（Bガス）は低カロリー燃料であるため、その燃焼用空気量は燃焼排ガス量に対して 35% 程度しかない。従って高炉ガスの混焼比率が増加するに伴い、燃焼用空気量に対する燃焼排ガス量の比が大きくなる。これは空気予熱器のみによる排熱回収には限

界があることを示している。

これに対する対策として高炉ガスによる排熱回収を実施した。Bガスヒータはタービン抽気による蒸気式のものとボイラ排ガスによるものと2段式とした。蒸気式のBガスヒータはタービン抽気を使用することにより復水器で捨てられる熱量を回収し、プラント熱効率を約1%改善できる。さらに蒸気式のBガスヒータで約70°Cに高炉ガスを昇温することにより、これに続く排ガス式のBガスヒータのチューブの低温腐食を防止できることになる^{1,2)}。

従来型の高炉ガス焼きボイラでは空気予熱器のみの排熱回収であったため、高炉ガスの混焼率の増加とともにボイラ効率は著しく低

Table 1 Main Specifications

	No. 3 Power Plant	Nos. 1 & 2 Power Plant
Capacity (kW)	125 000	75 000
Amount of evaporation (kg/h)	430 000	260 000
Pressure of steam (kg/cm ²)	169	126
Temperature of steam (°C)	538	538
Combustion system	Forced draft system	Balance draft system
Fuel	BFG ¹⁾ , COG ²⁾ , LDG ³⁾ , LPG ⁴⁾	BFG, COG, LDG, LPG
Process steam (kg/h)	55 000 max.	30 000 max.
Back-pressure turbine (kW)	720	—
Efficiency (power generation end) (%)	42	36

¹⁾ BFG: Blast furnace gas

²⁾ COG: Coke oven gas

³⁾ LDG: Linz-Donawitz converter gas

⁴⁾ LPG: Liquefied petroleum gas (Butane)

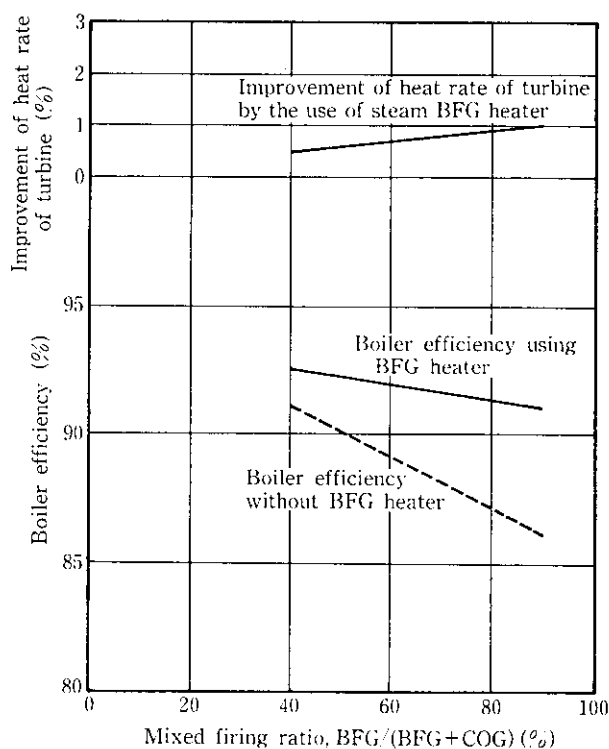


Fig. 3 Improvement of efficiency by BFG heater

下する傾向が認められていた。しかし、Bガスヒータを設置した本プラントではこの傾向は非常に小さく、すべての混焼率に於いて高い効率を維持できる。Fig. 3 に混焼率とボイラ効率との関係を示す^{3,4)}。

さらに排ガス式Bガスヒータの概念図を Fig. 4 に、代表的な操業条件時のガスの流れと温度の関係を Fig. 5 にそれぞれ示す。

Bガスヒータの設置により従来型では 200°C を超えていたボイラ排ガス温度が約 112°C まで低下し、ボイラ効率で約 5% 改善され、本プラントでは約 9 000 kW の発電量の増加となる。

3.1.2 加圧燃焼方式

従来の高炉ガス焼きボイラでは高炉ガスに含まれる有害成分のため、火炉からのガスのリークを心配して火炉の圧力をマイナスにす

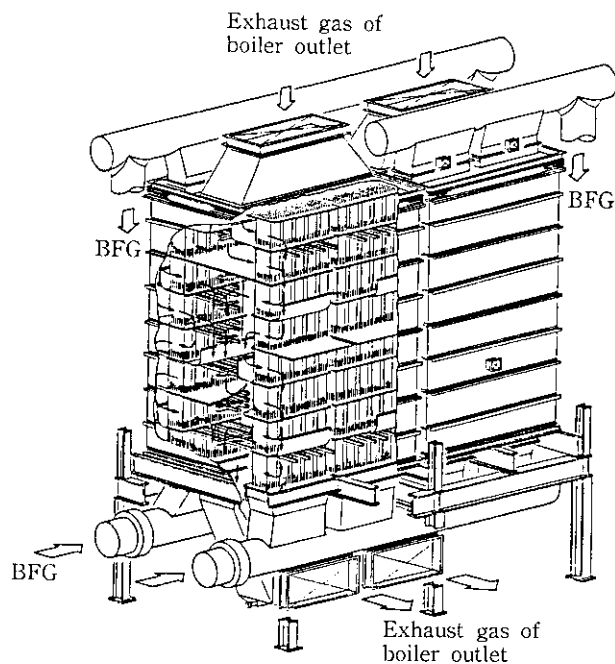


Fig. 4 Detail of BFG heater

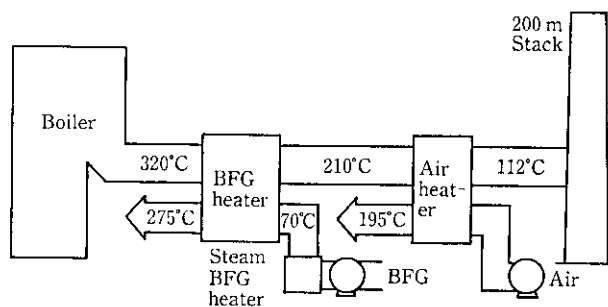


Fig. 5 Temperatures of boiler exhaust gas, BFG, and combustion air

Table 2 Comparison of output of electric motor between forced draft and balance draft

	(kW)	
	Forced draft	Balance draft
Forced draft fan	730	330
Induced draft fan	—	2 020
BFG booster fan	1 040	—
Total	1 770	2 350

る平衡通風方式を採用していた。この方式は燃料ガスの持つ圧力と燃焼用空気のファンの圧力とで燃料及び空気をボイラ火炉に供給する一方、ボイラ排ガスも誘引ファンで誘引して火炉をマイナス圧力に保持するものである。これは温度が高いためにボリュームが大きくなっている排ガスを誘引するためファンが大型となり、使用電力も大きくなって不利である。

これに対して3号発電プラントで採用した加圧燃焼方式は高炉ガスと燃焼用空気のそれぞれのファンで火炉に押込む方法である。この方式は高炉ガス用のファンが必要となるが、これは大気温度付近のものであり、排ガスの誘引ファンと比較すれば非常に小型で使用電力も小さくでき、大きなメリットが得られる。

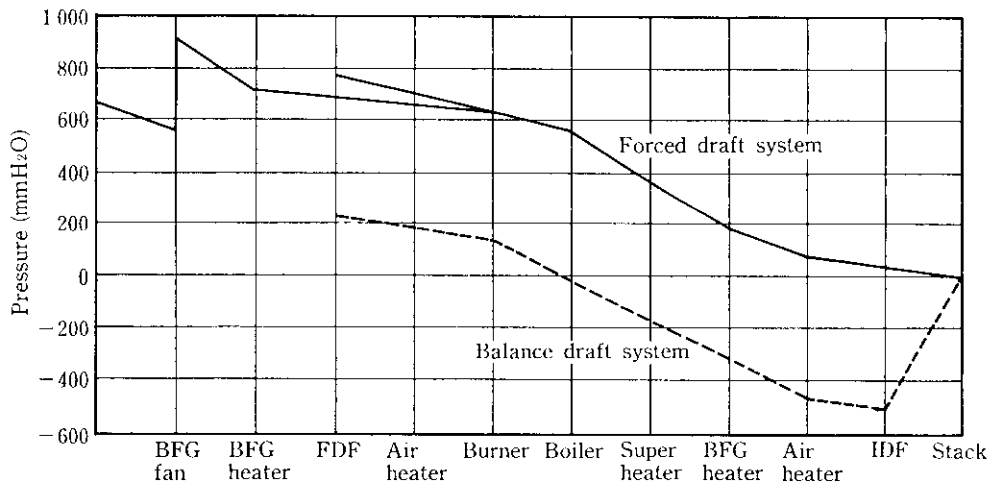


Fig. 6 Comparison of pressure between forced draft and balance draft

加圧燃焼方式の採用には近年のボイラ火加のシール技術の向上があった。すなわち、従来ボイラチューブ周囲の耐火物をケーシング材で簡単にシールしていたもの (Skin casing 構造) を、ボイラチューブ相互間を溶接構造 (Fusion welded wall 構造) として完全密閉化し、安全性を確保している。

このように高炉ガス用のファンが必要となるが、従来より最大の動力を必要としていた排ガスの誘引ファンを省略することにより約 580 kW、約 25% の削減となる。Table 2 に平衡通風方式と加圧燃焼方式の動力比較を整理して示す^{3,4)}。また、両方式の高炉ガス本管から煙突までの燃料ガス、燃焼用空気及び燃焼排ガスの圧力の推移を Fig. 6 に示す。

3.1.3 回転数制御

3号発電プラントの燃料は高炉ガス (BFG)、コークス炉ガス (COG)、転炉ガス (LDG)、LPG (ブタン) の混焼となり、その混焼率が変化すること及び負荷の変動等によりファンの風量にも大幅な変動が生じる。このため広範囲にわたってファンのより高い効率を維持するために回転数制御を採用した。回転数制御には、VVVF

等も検討したが、① 電気事故への対応策、② 盤設置スペース、③ 発電用ボイラでの実績等を考慮して、流体継手を採用した。流体継手を設置するのは押込通風機、高炉ガス昇圧通風機、ガス再循環通風機、再循環ガス混合通風機の大型ファン4台とした。

Fig. 7 に従来方式のダンパによる制御と比較した流体継手による回転数制御の効果を示すが、部分負荷の場合ほど効果が大きいことがわかる^{3,4)}。

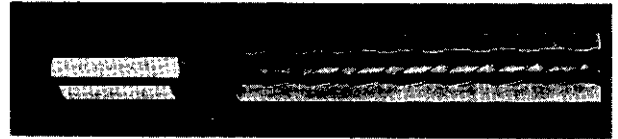


Photo 2 Rifle tube

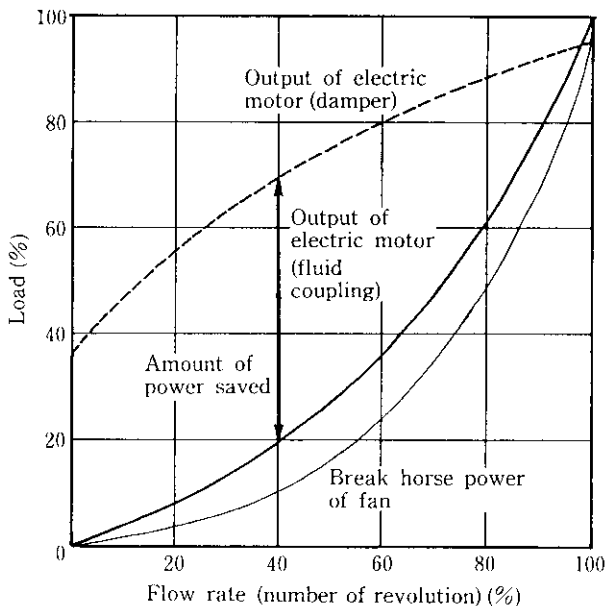


Fig. 7 Effect of control of number of revolution by fluid coupling

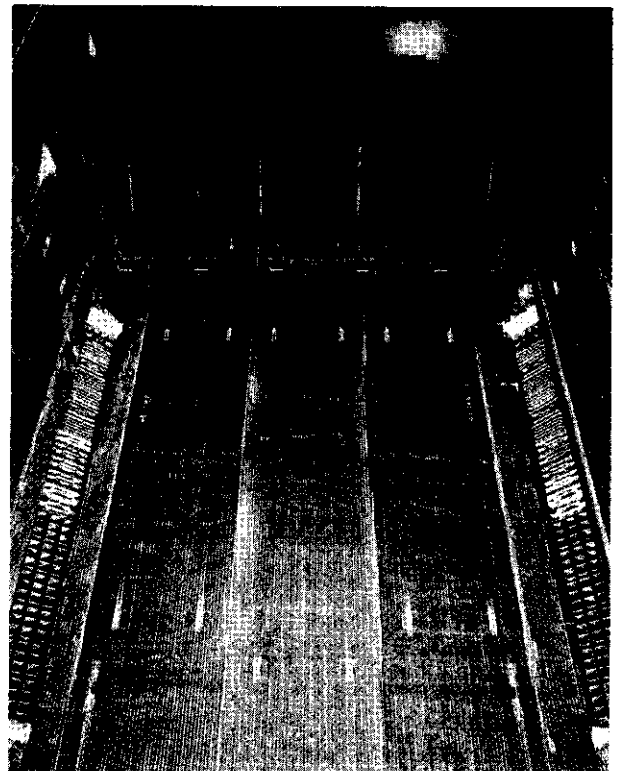


Photo 3 View of boiler tubes in No. 3 boiler

3.1.4 ライフルチューブ

3号発電プラントのボイラは強制循環方式のため缶水循環ポンプを3台設置している。このポンプの動力削減を狙ってボイラ火炉蒸発管にライフルチューブを大幅に採用した。これは当社知多製造所で初めて製作されたものである。ライフルチューブはスムーズチューブと比較して熱伝達係数を大きくとれるため、それに応じて循環水量を減少させることができる。これによって約50%のポンプ動力削減を可能にした⁸⁻⁶⁾。

Photo 2 にライフルチューブの断面写真を、Photo 3 にライフルチューブを使用しているボイラ火炉内の蒸発管の状況写真を示す。

3.2 タービン関係

3.2.1 高圧蒸気条件

ボイラ、タービンによる蒸気プラントの効率上昇に関しては、蒸気の高圧・高温化が有効な手段であり、これらは特にタービン内部効率に大きく影響する。西発3号発電プラントの125 000 kWクラスの蒸気圧力としては従来より1 800 psi (127 kg/cm²) が一般的であったが、本プラントでは2 400 psi (169 kg/cm²) を採用した。これは従来では350 000 kWクラスのプラントに採用されていた圧力条件である。

一方、蒸気温度に関しては高炉ガス中に含まれる腐食成分のためにボイラチューブの高温腐食が心配される。このため、安全性を重視して本プラントでも従来の1号及び2号プラントと同様の1 000 °F (538°C) を採用している。

蒸気の圧力条件に関しては、従来通りの127 kg/cm²と比較して169 kg/cm²に上昇したことによりタービン熱効率は約2%の改善となった。

3.2.2 サイクルの最適化

タービンプラントの熱効率改善に関して蒸気のサイクルの最適化は重要な課題である。本プラントでは低圧第1~3給水加熱器の加熱源として低圧タービンからの抽気、脱気器及び高圧第5給水加熱器の加熱源は中圧タービンからの抽気、高圧第6、7給水加熱器の加熱源は高圧タービンからの抽気をそれぞれ取っている。さらに前述の蒸気式Bガスヒータの加熱源は中圧タービンの抽気を利用し、熱交換後のドレンを低圧第3給水加熱器に回収している。また、高圧タービンの抽気の一部は減圧、冷却され、工場のプロセス蒸気として利用される。この減圧、冷却時のエネルギーを有効利用するため、減圧タービンを設置した。これにより最大出力時で720 kWの出力が得られる。

3.2.3 翼形状の改善

タービン最終段動翼は従来の125 000 kWクラスのプラントでは一般的に23 in. 高さのものが使用されていたが、本プラントでは26 in. 高さのものを採用している。これは従来のものと比較して排気損失が低減できるメリットがある。また、ノズルの翼形状も高いマッハ数領域で性能が良くなるような設計を施されたものを使用し、いずれもタービン効率の改善に寄与している。

3.3 プラント効率

以上に述べてきたボイラ及びタービン関係の高効率化のための項目を実施してプラント性能試験の結果、当初計画を若干上回るプラント効率約42%が得られた。これはFig. 8に示すように事業用の350 000~1 000 000 kWクラスの大型プラントと比較してもこれらを上回る効率となっている。これは重油と比較して硫黄分の少ない高炉ガスを主燃料としていることからボイラ排ガス温度を約112 °Cまで低下できたことが大きく寄与している。この結果、千葉製

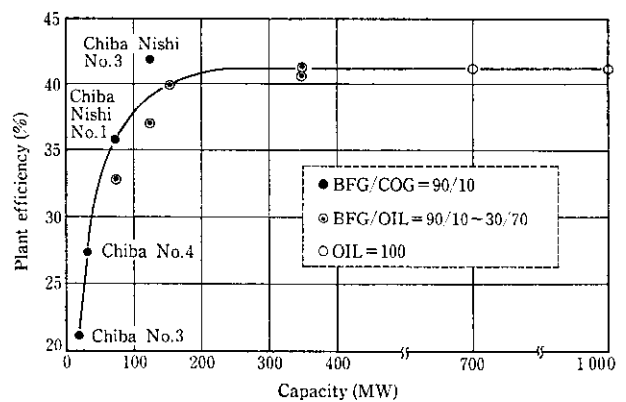


Fig. 8 Comparison of plant efficiency

鉄所の電力自給率は従来の約50%から約75%に上昇した。

4 当社製品の使用状況

西発電所3号発電プラントの建設工事に於いては当社の製品を可能な限り使用の方針で行った。Table 3に本プラントに使用された当社の製品の主要なものを整理して示す。

Table 3 Application of the products of Kawasaki Steel Corp. (t)

Boiler	Boiler tube	1 130
	Pipe	620
	Steel frame	910
	Casing	765
Turbine & generator	Rotor	130
	Core	135
	Casing	120
	Condenser	70
	Heater	105
	Pipe	65
Total		4 050

当社の製品の中には以下に示すような最近の開発製品が含まれる。

- (1) STBA22 電縫管のボイラチューブ 約10 t
知多製造所にて製造され、通産省の特殊認可を受けた。
- (2) STB42 ライフルチューブ 約60 t
知多製造所にて製造された。
- (3) タービン・発電機ロータ 約130 t
水島製鉄所にて製造された。
- (4) 変圧器鉄心 RG-6H 約57 t
阪神製造所にて製造された。

5 結 言

昭和57年7月から建設工事が開始された千葉製鉄所西発電所3号発電プラントは当初の工程通り昭和59年3月末に官庁検査に合格し、現在まで、問題なく順調に運転されている。

本プラントは高効率化のための新技術を種々取り入れて、全体のプラント効率としては約42%となり、事業用の大型プラントと比

較してもこれらを凌駕する効率のものとなっている。

本プラントの実現により千葉製鉄所の電力自給率は従来の約50%から約75%に上昇した。また、本プラントは省エネルギーの

主要戦力として大きく貢献していると同時に、高炉ガス焼き発電用プラントの今後の指針を示すものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 三菱重工業(株), 川崎製鉄(株): 特公昭 58-20914
- 2) 三菱重工業(株): 実願昭 58-160588
- 3) 石原崇夫, 吉川茂樹, 豊田隆治: 三菱重工技報, 21 (1984) 1, 31-35
- 4) 大目誠一, 石原崇夫, 豊田隆治: 三菱重工技報, 21 (1984) 6, 44-51
- 5) 河村友穂, 中村浩二, 深堀和實: 三菱重工技報, 17 (1980) 2, 83-93
- 6) 田村寿恒, 南 正進, 魚住一裕, 平野 豊, 渡辺修三, 林 保之: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 3, 187-197