

高炉ガスエネルギー回収発電設備

A Power Plant Using Recovered BF Gas Energy

鈴木 孝 久*

Takahisa Suzuki

佐々木 洋 三**

Yozo Sasaki

Synopsis :

A 6500kW power plant (SOFRAIR type) using blast furnace top gas recovered was installed in October 1974 to No. 2 blast furnace of Mizushima Works. Positioned at the bypass of septum valve, this plant makes it possible to control top pressure with septum valve as heretofore. Turbine is of radial centripetal type, 2-stage expansion system, and its operation is controlled with electric-hydraulic type governor system.

For securing safety and reliability, the operation is as simplified and automatized as possible.

With 10 month operation at 87% and an efficiency of 72%, the system has proved an easy and reliable operation, giving no adverse effect on blast furnace operation.

1. 緒 言

エネルギー多量消費産業である鉄鋼業において、エネルギーの有効利用が特に切望されている。石油エネルギー偏重に対する反省から、熱管理活動がよりいっそう強力に推進されるようになったが、一方、環境汚染防止のためクリーンエネルギーに対する要求が増大している。当社水島製鉄所は第2高炉にわが国初めての高炉ガスエネルギー回収発電設備（Sofrair方式）を設置した。昭和49年11月運転開始後、順調に稼動している。大型高炉の普及、本設備の安全性および今後のエネルギー事情を背景に、将来各製鉄所で採用されるものと考えられ、多量の発電が期待される。

2. 高炉ガス回収工程への発電設備導入の背景

製鉄所は一般的に約 $6\,000 \times 10^3 \text{kcal/t-steel}$ 程度の多量のエネルギーを消費する。なかでも高炉工程は全消費エネルギーの50%以上を占めている。高炉の熱収支の一例を **Table 1** に示す。高炉の消費エネルギーのうち、還元熱、高炉ガス潜熱、溶鉄潜顕熱など有効利用されている割合は約90%に達することがわかる。高炉の熱効率の向上は残り10%が対象となるが、消費エネルギー量が膨大なため、数%の回収でもその効果は非常に大きくなる。

製鉄所内のエネルギー源として大きな役割を持

* 水島製鉄所製鉄部製鉄管理課

** 水島製鉄所動力部動力技術室掛長

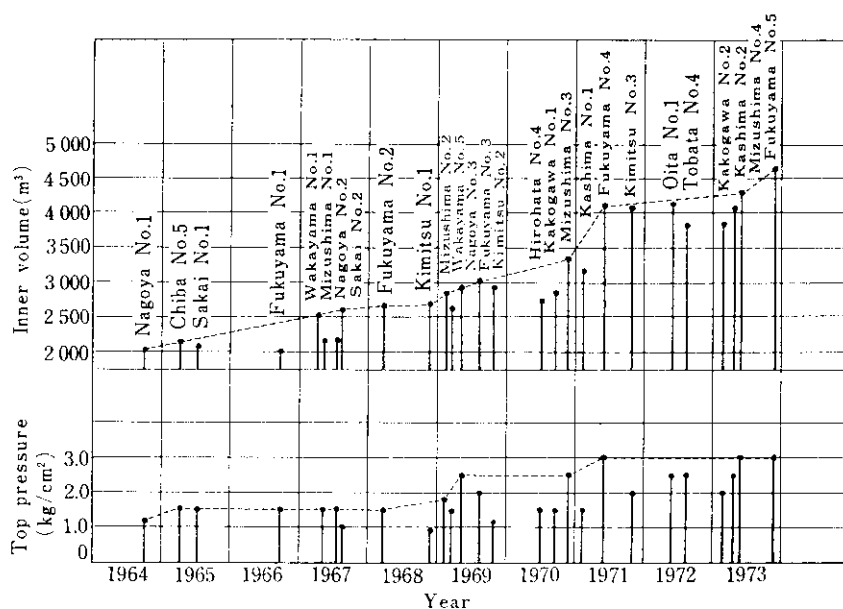
Table 1 An example of BF (blast furnace) heat balance

Heat supplied	%	Heat transferred	%
Combustion heat of carbon	88.0	Heat of reduction	41.8
Sensible heat of blast	10.9	Latent heat of BF gas	30.7
Heat of slag formation	1.1	Latent and sensible heat of pig iron	16.3
		Dissociation heat of oil and moisture	1.3
		Sensible heat of slag	3.4
		Sensible heat of BF gas	1.7
		Heat loss and others	4.8
Total	100	Total	100

つ高炉ガスは約 800kcal/Nm³ の発熱量があるが、炉頂排出時は多量のダストを含んでいる。このためダストキャッチャー、ベンチュリースクラバ、電気集塵機などで構成されたガス清浄装置で除塵されたのち場内に配給、利用されている。高炉ガスの発生量は一般的に鉄鉄トンあたり 1400~1500 Nm³ で、出鉄量 10 000t/day の超大型高炉では約 700 000Nm³/h の膨大な量に達する。

一方高炉の炉頂圧は漸次高くなり、高圧操業は大型高炉の操業上不可欠の技術となっている。Fig. 1¹⁾ に新設高炉の内容積と炉頂圧力の推移を示す。最近数年間に急激に高炉の大型化と高圧化

が進んでいることがわかる。高圧操業では高炉送風機の吐出圧を上げる一方、高炉ガス流にセプタム弁（減圧弁）を設け、高炉ガス発生量の変動に対し、炉頂圧が常に一定になるよう制御する。セプタム弁下流側の圧力は、高炉ガスの需給と送給圧力の調節を目的に設置されているガスホルダー圧力で決定される。この圧力はガスホルダーの構造上 0.05~0.08kg/cm²・G 程度の低圧である。したがってセプタム弁での減圧時の損失エネルギーはなんら回収されていなかった。このためセプタム弁の代りに膨脹タービンを設け、減圧時の損失エネルギーを有効仕事として取り出し、電力とし

Fig. 1 Change of inner volume and top pressure of BF in Japan¹⁾

て回収する方法が数年前から研究されていた。しかしながら高炉ガスは多量のダストを含むため、実用化するに至らなかった。

1969年フランスの Sofrair 社は、長年にわたるダスティ・コンプレッサーに関する技術と製鉄所における 300kW のテストタービンによる実験をもとに、高炉ガスエネルギー回収用タービンを開発した。一方ソ連でも独自にこのエネルギー回収に着目し、タービンの開発が行われ、1968年チエレポベツ製鉄所で実用プラントが稼動している。いずれの場合についても、タービンによる高炉ガスエネルギー回収の実用化を妨げていた主な技術的問題は、ガス中のダストの衝突によるタービン翼の摩耗およびガス中に含まれる水分の影響でダストが粘着性を持ち、目詰まりを生じることであった。

Sofrair 社はこのダスト対策のためラジアル求心型タービンを採用し、タービンへの除塵水噴射と構造の改善で目詰まりおよび摩耗防止を図っている。ソ連型は高炉ガスの含塵量を低下させたのち空気を送ってガスを一部燃焼させてガス温度を上げ、乾燥ガスとすることでコンパクトな軸流タービンを採用している。この意味で両者は本質的にダスト対策が全く対照的であったといえる。

川崎重工業㈱は Sofrair 社のテストタービンの開発に着目し、本タービンの技術導入を図り、日本の大型高炉に適用すべく当社と共同で検討を進めた。ダスト対策としては前述のように湿式と乾式が考えられるが、ダスト・キャッチャー後の乾燥ガスは、ガス湿度の変動が大きくダスト含有量が多いため、乾式を採用するには、ベンチュリ・スクラバをサイクロンに代えるなど、現状の高炉ガス清浄システムを変更する必要がある。湿式ではガス状態が安定しているのでその必要はない。そこでベンチュリ・スクラバ後のウェットガスを対象に検討を加えた。その結果、種々の技術的改良がなされ、また高炉操業に適合したタービン制御法が確立でき、実用化の見通しが得られた。水島製鉄所第2高炉に設置した高炉ガスエネルギー回収発電設備は、Sofrair 型では世界最初の実用プラントである。Photo. 1 に本タービンの全景を示す。

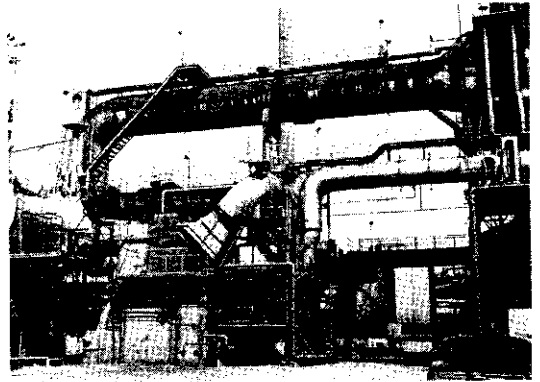


Photo. 1 General view of power plant

3. 設備概要

高炉は製鉄所の心臓部であり、操業の安定が非常に重要視される。そのため、本設備の導入にあたっては、現状の高炉操業になんら悪影響を与えないこと、既存設備はなんら改造を要しないこと、を基本方針とした。このため炉頂圧制御に必要な流量を従来通りセブタム弁に流し、タービンへは一定流量のガスを流し、炉頂圧の制御は従来となんら変えることのない方式とした。本設備はセブタム弁のバイパス位置にあり、ガス流に沿って入口バタ弁、入口遮断弁、危急遮断弁、調速弁、膨脹タービン、出口バタ弁、出口遮断弁で構成される。Fig. 2 に本設備のフローを示す。

3.1 タービン仕様決定の経過

通常の発電設備と異なり、タービン入口条件はタービン側の要求から決定されるものでなく、高炉の操業状態に左右される。したがってタービンの仕様および運転法は高炉操業にマッチしたもので効率的、経済的なものでなければならないが、次の点より出力を厳密に推定できなかった。

- (1) 本設備は 300kW の実験プラントを拡大したものであるが、最適水噴射量とその出力ロス是不明である。
- (2) 仕様決定の要因(たとえばガス量、ガス圧力など)は高炉操業に依存する不確定要因である。
- (3) 制御方法は全く未開発である。

次に入口ガス温度、流す圧力、ガスガ量の決定

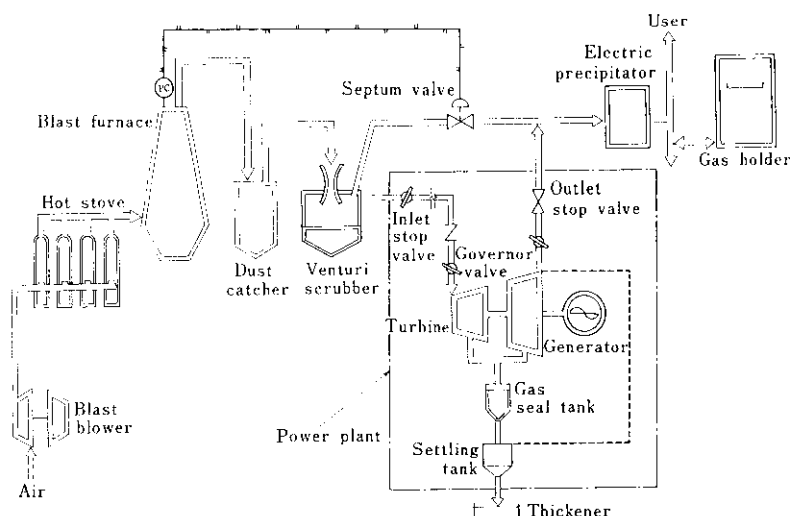


Fig. 2 Flow diagram of power plant using recovered BF gas energy

までの経過を記述する。

3・1・1 入口ガス温度

高炉ガスはタービンにはいる前にベンチュリ・スクラバで多量の水噴射を行い、除塵される。そのためタービン入口ガス中の水蒸気は飽和状態にある。この水蒸気はタービン流路中にしだいに凝縮し、その潜熱をガスに与える。ガス中に残留する水蒸気は少く、エネルギーとしては小さいので、出力としては期待できない。したがってタービン内でのガス膨脹は、実際には加熱変化であるが、近似的には断熱変化と考えて良い。断熱膨脹の理論式を(1)式で、熱収支を(2)式で記述できる。

$$860 \cdot L = \eta \cdot Q \cdot C_p \cdot T_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$860 \cdot L = Q \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) + G_w \cdot q_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし L : 発生出力 (kW)

η : タービン総合効率 (%)

Q : タービン通過ガス流量 (Nm³/h)

C_p : ガスの定圧比熱 (kcal/Nm³°K)

T_1 : タービン入口ガス温度 (°K)

T_2 : タービン出口ガス温度 (°K)

P_1 : タービン入口ガス圧力 (ata)

P_2 : タービン出口ガス圧力 (ata)

k : ガスの断熱指数 = 1.384

G_w : 凝縮した蒸気量 (kg)

q_r : 蒸気潜熱 (kcal/kg)

(1), (2)式より次式が得られる。

$$\begin{aligned} (G_w/Q) \cdot q_r = & C_p \left\{ T_2 - T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \\ & - C_p \cdot T_1 (1 - \eta) \\ & \times \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

P_1 をパラメータとし、 $P_2 = 1.1 \text{ ata}$, $C_p = 0.33 \text{ kcal/Nm}^3\text{°K}$, $\eta = 70\%$, $k = 1.384$ として計算した(3)式の関係を Fig. 3 に示す。これより出口ガス温度を0°C以上にするための余裕あるタービン入口ガス温度は約50°C となることがわかる。タービン入口ガス温度をこれ以上に高くすると蒸気圧が増加し、湿りガス単位容積あたりの発熱量が低下する (Fig. 4 参照)。これはタービン停止時に高炉ガスを燃料ガスとして使用する場合に問題となる。特にスリップなど高炉ガスが一時的にも高温になるとますます発熱量が低下し、状況によってはボイラー等での失火の原因になる。このためガス温度を無制限に高くすることは安全上好ましくない。またベンチュリ・スクラバの性能上、ベ

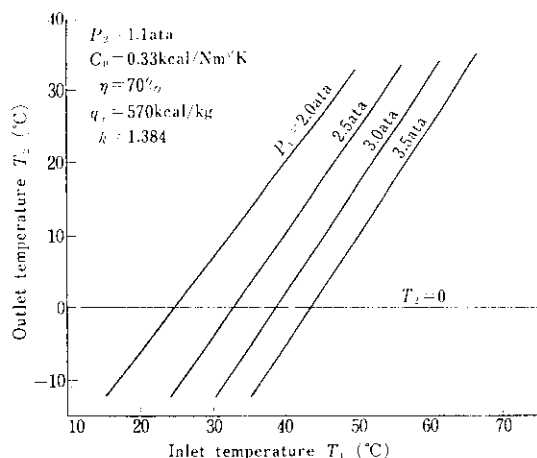


Fig. 3 Relationship between inlet temperature and outlet temperature of turbine at different inlet pressure

(P_1 : inlet pressure, P_2 : outlet pressure, C_p : specific heat at constant pressure, η : total efficiency, q_r : latent heat of steam, k : adiabatic index)

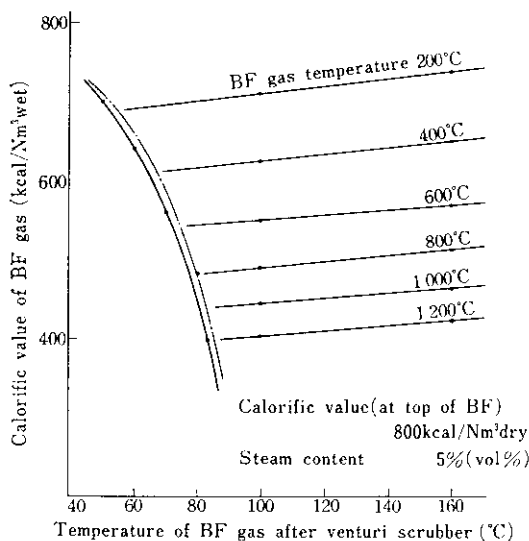


Fig. 4 Relationship between temperature and calorific value

ンチュリ・スクラバでの噴射水量を少くすると除塵効率が低下して、タービン自身にも悪影響を与える。タービン入口ガス温度を上げることはタービンの出力増加に結びつくが、以上のような検討からタービン入口ガス温度を $55 \pm 5^\circ\text{C}$ にベンチュリ・スクラバで制御することにした。

3.1.2 入口ガス圧力と流量

本タービンの出力は、ガスの入口、出口の熱落差が小さいため、ガス流量に支配される。このためできるだけタービンに流れるガス量を確保する方が経済的である。このガス量は调速弁の全開状態で最大となる。调速弁を絞るとガス量が低下するだけでなく部分負荷特性が悪化するので、出力は低下する。また入口ガス量は入口ガス圧力によっても変化するため、タービンの仕様決定にあたってはガス量と圧力を考慮する必要がある。

まず入口ガス圧力は高炉の通常の操業圧力に合わせた。炉頂圧力の制御は従来どおりセプタム弁で行うという制約があるため、つぎにその制御に必要な最少流量を推定する必要がある。そこで実際の弁動作試験結果や弁の特性計算、炉頂圧変動のシミュレーション計算などをもとに推定した結果、最少流量は通常操業時に発生する炉頂ガス量の20～30%となった。したがって、タービン入口ガス量は最大発生ガス量の75%と定めた。

3.2 タービン仕様

タービン仕様を **Table 2** に示す。

3.3 タービン構造の特色

タービンはラジアル求心型2段膨脹タービンで、タービン車室は渦巻形状の第1段車室、第2段車室およびガス流れを転換させる出口ディフューザとしての上下半車室からなる鋼板溶接構造である。**Fig. 5**に本タービンの断面を示す。タービンロータは独立の軸受台で支えられ、スラスト力を軽減するため、排出ガスが逆方向となるように第1、第2インペラを組立てて静的および動的バランシングを行わせている。

車室両端部のロータ貫通部は、有毒性の高炉ガスを完全にシールする必要がある。タービン運転中は回転円板による水封パッキンとラビリンスパッキンで、停止中は2段のカーボンパッキンの中間に圧力水を注入してシールしている。タービン入口に設けられた调速弁はドラム型構造で、弁前後の均圧により小さな力でスムーズに作動できるようにになっている。调速弁を流出するガスが渦巻

Table 2 Specification of turbine

Type	Radial centripetal type 2-stage expansion turbine	
Maximum output	8 000kW	
Revolution	1 800rpm	
Gas flow	Normal	340 000Nm ³ /h
	Max.	360 000Nm ³ /h
Inlet pressure	Normal	1.74kg/cm ² G
	Max.	2.34kg/cm ² G
Inlet temperature	55±5°C	
Outlet pressure	0.1kg/cm ² G	
Outlet temperature	30°C	
Design point		
	Inlet pressure	1.74kg/cm ² G
	Outlet pressure	0.1kg/cm ² G
	Gas flow	340 000Nm ³ /h
	Inlet temperature	55°C
	Output	6 500kW
Inlet pipe diameter	1 200mm	
Outlet pipe diameter	1 800mm	

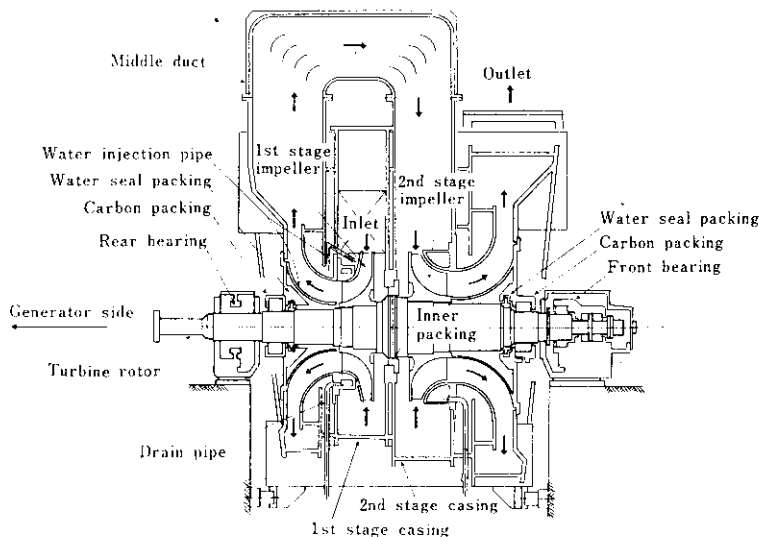


Fig. 5 Cross section of turbine

型の車室にそって羽根車に流入するようコントロール・フラップを設けている。その両端は車室と弁体にそれぞれピンで結合されている (Fig. 6 参照)。

ダストによるタービンの目詰まり・摩耗防止対策は次のような特徴を持っている。

(a) タービン

車室とインペラのすき間を大きくとり、また羽根なしノズルを採用している。ガスは自由渦流れ理論に基づく渦巻型車室にそってロータ中心に向かって流れる。インペラは直線放射形状となっているため、インペラ内部に流入するダストが付着しにくい。インペラに付着してもダストの粒子が大きくなれば、遠心力でインペラ外に放出され

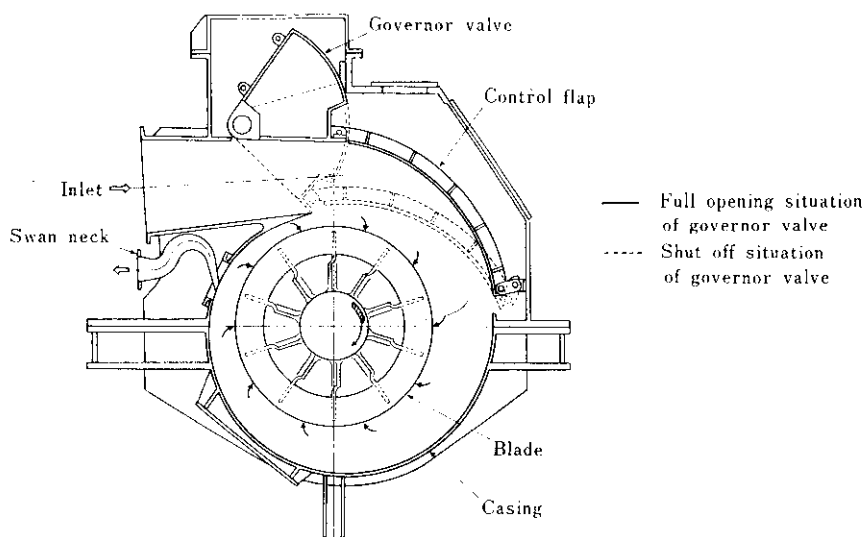


Fig. 6 Cross section of turbine

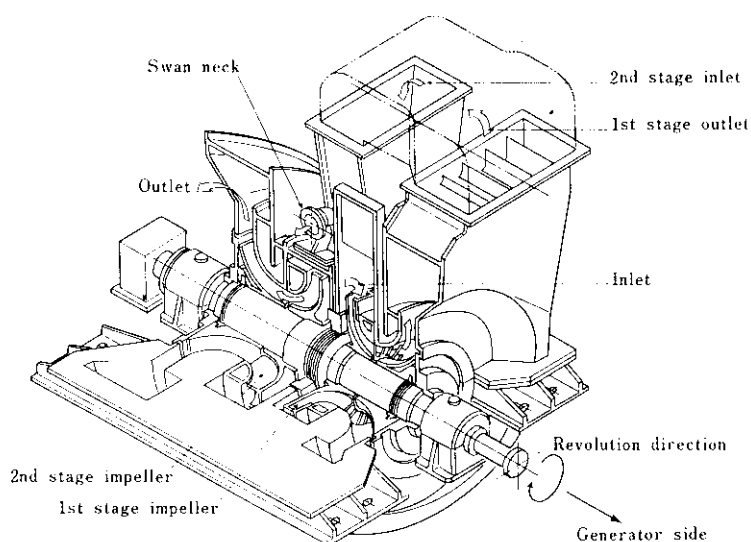


Fig. 7 Gas flow in the turbine

る。Fig. 6 に軸と直角方向の断面を示す。

(b) スワンネック

ダストはガスの旋回により生じる遠心力により車室外周壁に集まり、重力と遠心力を考慮して設計された特殊な形状のスワンネックから車室外に抽出される。タービン内のガス流れを Fig. 7 に示す。

(c) 除塵水噴射

本タービンはノズルによりインペラへ水噴射を

行っている。ダスト洗浄後の除塵水を車室からシールタンクに導き、沈澱槽から系外のシックナーに送り込み、ダストを排出している。

3.4 電気設備

本設備の電気設備は、一般的な発電所の電気設備と特に変ることがないが、高炉周辺の環境、屋外設備であること、高炉の操業状況によっては発電停止頻度が多くなることも考慮した設備となっ

Table 3 Specification of electrical equipment

(a) Generator

Type	Totally enclosed, air cooled, Stationary-armature and cylindrical rotor type 3-phase synchronous generator
Output capacity (Maximum continuous rating)	10 000kVA (8 000kW)
Power factor	80%
Voltage	11 000V
Synchronous speed	1 800rpm
Connection	Star connection (Ungrounded neutral)
Number of pole	4
Insulation	Class B

(b) Excitation equipment

	Main excitor	Sub-excitor
Type	Brushless revolving armature 3-phase generator	Revolving armature and permanent magnet 3-phase generator
Output capacity	75kVA	3kVA
Rated voltage	135V	220V
Driving method	Direct-coupled to the main generator	Ditto

(c) Main circuit breaker

Type	Mini-oil circuit breaker
Rated voltage	12kV
Rated current	1 200A

(d) Unit transformer

Type	Oil-immersed, self-cooled and outdoor
Output capacity	300kVA
Rated voltage	11.5-11.0-10.5kV/460V
Connection	Primary connections: Delta Secondary connections: Star

ている。発電機の励磁装置はブラシレス励磁方式であり、交流励磁機の回転電機子に発生する交流電力を軸上に配置されているシリコン整流器で整流し、主発電機の回転界磁を励磁する。このためカーボンブラシ、整流子、スリップリングが不要となり、環境の良くない場所への設置に適したものと

のとなっている。また発電所運転の安全性と確実性を確保するため自動同期投入装置を設けている。**Table 3** に電気設備の概略仕様を示す。

3.5 タービン運転制御

タービンの運転制御は、電気油圧式ガバナ装置

により行われる。電気ガバナの機能は基本原理として、高炉操業に悪影響をおよぼさないで、高炉ガスのもつエネルギーを安全に電気エネルギーに変換し、発電出力を得るために必要なすべての自動制御を行うことである。基本制御方式として制御機能と制限機能があり、次の5項目より構成される。

(1) 負荷制限器による作動（起動停止時の増減速に用いる）

(2) 回転数設定器による回転数制御作動（単独運転時に用いる）

(3) 負荷設定器による負荷制御作動（併列運転時負荷増減に用いる）

(4) 最大負荷制限器による最大負荷を超過させない機能（タービン発電機保護に用いる）

(5) 高炉発生ガス流量に対するタービン流入ガス量の制限機能（炉頂圧力制御に必要な最少ガス流量をセブタム弁に流すために用いる）

これらの機能は低位選択器で選択された最少制御信号でタービン調速弁を制御する。本電気ガバナを用いた通常の運転操作を起動から停止まで Fig. 8 に示した。一般的な発電機と異なり、高炉の炉況によっては発電停止が多くなることがあるため、高炉の運転員が安全で確実な操作ができるよう運転操作はできるかぎり自動化・単純化されている。このため基本操作は危急遮断弁操作、

負荷制限器操作、自動同期装置操作、負荷設定器操作のみで、タービン発電機の起動、停止操作と発電機の負荷取りの必要最少限の操作となっている。上記のように簡単な操作にすることにより、高炉運転員の増員なしで運転が行われている。

4. 試運転結果と運転経過

昨年8月より試運転を開始し、無負荷タービンならし運転、設備本体と制御装置の各部点検・調整、負荷確認テスト、負荷遮断テストなどを行った。試運転は予定どおり順調に行われ、満足すべき結果が得られた。

4.1 負荷試験

最大負荷確認テストの結果は以下のようであった。

タービン入口圧力	1.748kg/cm ² G
タービン出口圧力	0.095kg/cm ² G
タービン入口流量	340×10 ³ Nm ³ /h
タービン入口温度	54.6°C
タービン出口温度	32.0°C
発電機出力	6540kW
タービン発電機総合効率	72%

総合効率の実績値は計画値（73.8%）を下まわった。これはベンチュリ・スクラバからのミスト

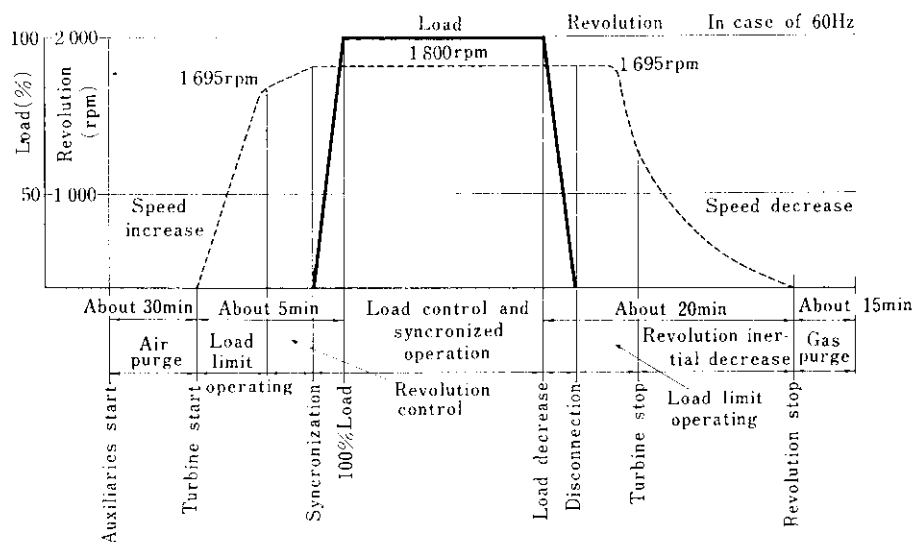


Fig. 8 Operating control system

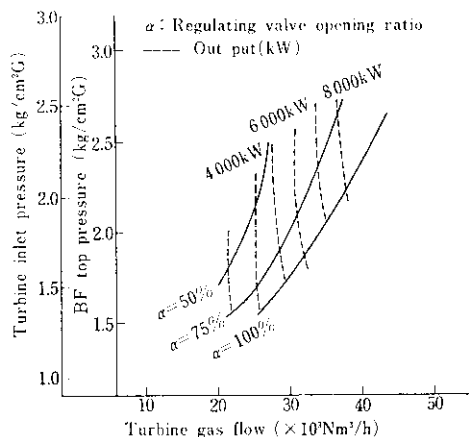


Fig. 9 Operational characteristics diagram

による出力ロスのためと考えられる。なお除塵水噴射の出力への影響は、水量、噴射個所により変動するが、発生出力の約4～10%の出力ロスとなった。試運転時の出力線図を Fig. 9 に示す。高炉操業条件が当初予定した設計条件を下まわっていたため、発電機容量 8000kW に対し試運転時の出力は 6500kW であった。今後は現在(送風量 5400Nm³/min, 炉頂圧 2.0kg/cm²G)より操業条件を高め、所定出力を確保していく予定であ

る。

4.2 負荷遮断テスト

出力 6500kW で全負荷遮断時のガバナの応答性をペン書きオシログラフで調べた結果を Fig. 10 に示す。負荷遮断により调速弁開度は瞬時全閉となり、8sec 後には無負荷流量を流すに必要な弁開度5°までもどっている。負荷遮断直後タービン発電機の実回転数は 1894rpm まで上昇するが、8sec 後には 1800rpm に整定している。回転数上昇率は5.23%で過回転規定値11%に対し十分余裕を持ち、電気油圧ガバナの応答性は非常に良好であった。

高炉操業上重要な炉頂圧力への影響を、セプタム弁の追従性とともに Fig. 11 に示す。炉頂圧の上昇率は3.7%で12sec後に整定しており、高炉操業への悪影響は認められず、セプタム弁の応答性は十分満足できるものであった。電気集塵機入口圧力の変動もガス配給上支障は認められなかった。負荷遮断時の最大回転数上昇率、炉頂圧力および電気集塵機入口圧力の最大偏差と負荷との関係を Fig. 12 に示す。これらの図より、本設備の信頼性は十分高いことが確認された。

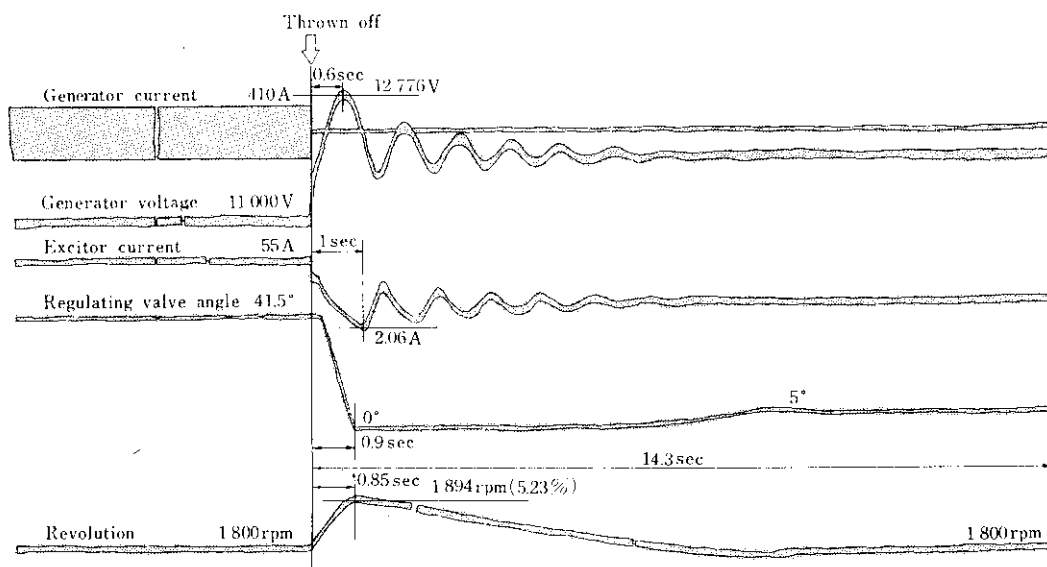


Fig. 10 Full load thrown-off governor test record (load : 6500kW)

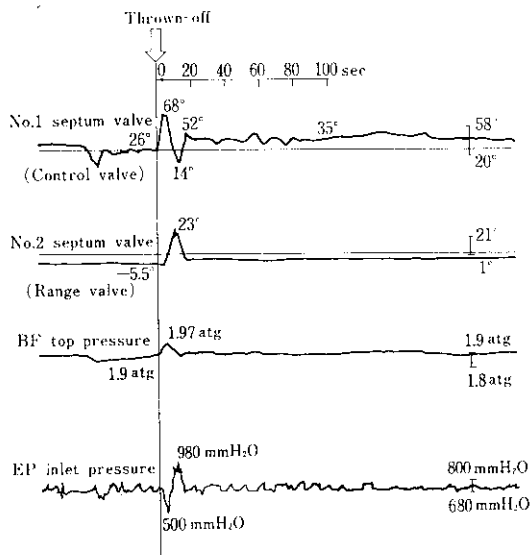


Fig. 11 Operational characteristics of septum valves and variation of pressure at BF top and electric precipitator inlet at thrown-off test from 5 100kW

4.3 振 動

タービン、発電機、励磁器の各ベアリングベドスタル5ヶ所で、軸方向、水平方向、垂直方向の振動を調査した。振動は片振幅で 5μ 以下であり、負荷の影響、インペラへの水噴射の影響は認められなかった。

4.4 運転経過

本設備は稼動後すでに10ヶ月を経過したが、トラブルなく順調に稼動している。起動、出力増減、停止はきわめてスムーズで、数分間で起動、同期投入でき運転中は常時 6 500kW の発電を行っている。本設備の稼動率は87%であるが、約 6 000h の総稼動時間に対し本設備に起因する停止率は3.8%となっている。停止原因は計器不良、配管油漏れなどによるもので、最も心配されたダストによるトラブルなど重大なトラブルは現在まで発生していない。また高炉操業に起因する設備トラブルも発生していない。稼動率の向上には高炉の安定操業が第一であるが、発電設備に起因する停止は迅速な故障修理により十分低減できると思われる。

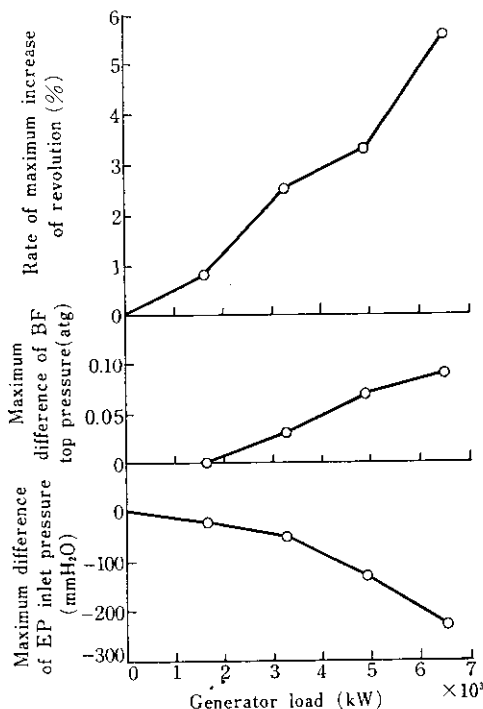


Fig. 12 Results of load thrown-off test

4.5 今後の動向

発電設備としての経済的見地からは、さらに稼動率の向上と出力向上（効率向上）等の改良を進めなければならない。水島製鉄所では引き続き第3高炉、第4高炉で計画建設中である。本機の実績をもとに種々の改良、設計変更を行い約5%以上の効率向上を期待している。

本発電設備は炉頂圧制御を従来どおりセブタム弁で行うことを前提としたが、今後の高圧操業に対処して、セブタム弁側のガスからも電気エネルギーを回収するために、全量ガスをタービン側に流し、しかも炉頂圧制御を行ういわゆる前圧制御の導入を計画している。この制御は、従来の電気ガバナの機能に、タービンガバナで炉頂圧を制御する機能を加えることで実施可能で、現在細部について解析を進めている。

5. ま と め

高炉ガスエネルギー回収発電設備が水島製鉄所

第2高炉に設置された。本設備は、従来燃料としてのみ利用されていた高炉ガスから、膨脹タービンにより、機械的エネルギーを電氣的エネルギーとして回収するものである。

高炉ガスの持つ諸特性から実用化が遅れていたが、設備の信頼性および高炉頂圧力制御を含む全体の制御方式に十分な検討が加えられ、新しい

動力回収方式が確立された。本設備は昨年10月稼動後、現在まで順調に稼動し、常時6500kWの発電を行っている。鉄鋼業で消費されるエネルギーに比べ、本設備の発電量はわずかな量にすぎないが、省エネルギー活動の高まりを背景に、本設備が広く普及するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 鉄と鋼, 61 (1975) 6, 443