

A 145 MW By-Product Gas Firing Gas Turbine Combined Cycle Plant



天野 忍

Shinobu Amano

千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(掛長)



高野 英樹

Hideki Takano

千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長)



小林 侃二

Kanji Kobayashi

千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長補)



廣崎 雅直

Masanao Hiroaki

千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(掛長)



阿部 成雄

Shigeo Abe

千葉製鉄所 設備技術
部電気計装技術室



沖汐 正悦

Masaetsu Okishio

三菱重工業(株) 熱エ
ネルギーシステム部
主査

要旨

副生ガスの有効利用と老朽化した発電所のリブレースを目的として、千葉製鉄所に出力 145 MW の大容量・高効率のガスタービンコンバインド発電プラントを建設した。導入にあたっては、燃焼実験による低 NOx・低カロリー副生ガス焚き燃焼器の選定、一軸型の採用、エネルギーセンターからの遠隔自動化などの新しい技術を取り入れ製鉄所のエネルギーコストの低減を目指した。その結果、発電所送電端熱効率は 46% (低位発熱量基準) 以上を達成し、通常の副生ガス焚き発電所よりも相対値で 10% 以上も高い値を実現した。

Synopsis:

A large scale and highly efficient 145-MW blast furnace gas firing gas turbine combined cycle plant was installed in Chiba Works for the purpose of utilizing the by-product gas effectively and renewing the old power plant. When installing the combined-cycle plant, Kawasaki Steel adopted new technologies such as a low NOx combustor of the low-calorific-value by-product gas, single shaft combined-cycle arrangement and automatic remote control from the energy center, and also aimed at reducing energy cost in the steel-works.

As a result of introducing the gas-turbine combined-cycle plant, a plant thermal efficiency of above 46% (at LHV) was achieved, which was above 10%, at a relative value, higher than a general by-product gas firing power plant.

1 緒 言

電力転換の高効率化の競争は、めざましいものがある。近年、とくにガスタービンの高温燃焼、冷却方法、耐熱材料などの技術革新による効率上昇は、日進月歩の速さで進歩している感がある。製鉄所においてもエネルギー利用の効率化は石油ショック以降たゆまなく進められ、省エネルギープロセスの開発、排熱回収技術の向上などの諸施策を次々に行い、製鉄所のトータルエネルギーコスト低減に各社とも大きな成果を挙げてきた。

今回、川崎製鉄千葉製鉄所では、145 MW の大容量の副生ガス焚きガスタービンコンバインド発電プラントを世界に先がけ導入し、老朽化した発電・送風設備のリフレッシュを実施した。本プラントは、低カロリーガス焚き燃焼器、一軸型の採用、無人運転などの新技術を取り入れ、副生ガス焚き発電設備としては、初めて 46% を超える効率を達成した。これを機にその設備の全容について紹介する。

2 導入の経緯

2.1 導入の経緯と従来技術

千葉製鉄所の購入エネルギー構成は、石炭 95%、電力 5% である。石炭は、高炉、コークス炉、転炉において副生ガスに転換され熱風炉、加熱炉等に優先的に使用された後、残り約 40% が発電所に供給される。換言すれば、製鉄所においては購入した石炭をガス化し電力に転換しており、発電所の効率向上が製鉄所エネルギーコスト低減に大きく寄与することになる。一方、東京電力(株)、東北電力(株)は、液化天然ガスを燃料とするガスタービンコンバインド発電プラントをあいついで竣工し、その効率の良さには目をみはるものがあつた^{1,2)}。製鉄所の副生ガスは窒素分を含んでおり、カロリーが低いため、NOx の発生が極めて少ないクリーンなエネルギーである反面、燃焼の着火性・安定性が劣る欠点がある。このため、副生ガス焚きガスタービンは、吹州で高炉送風機と発電機を組み合わせたものが運転されているが、燃焼温度が低く、効率は普通の蒸気サイクルと変わらないものであつた³⁾。そこで、川崎製鉄と

* 昭和63年4月20日原稿受付

三菱重工業株式会社は、副生ガスを大容量、高効率ガスタービンで利用可能とするため、燃焼安定性に優れしかも NO_x の発生を抑えることのできる燃焼器の開発実験を千葉製鉄所で実施した。

2.2 燃焼器の開発実験

副生ガス利用時に問題となる燃焼安定性と燃焼効率について、実験設備を用いてその特性を調査した。Fig. 1 は、副生ガスのカロリ

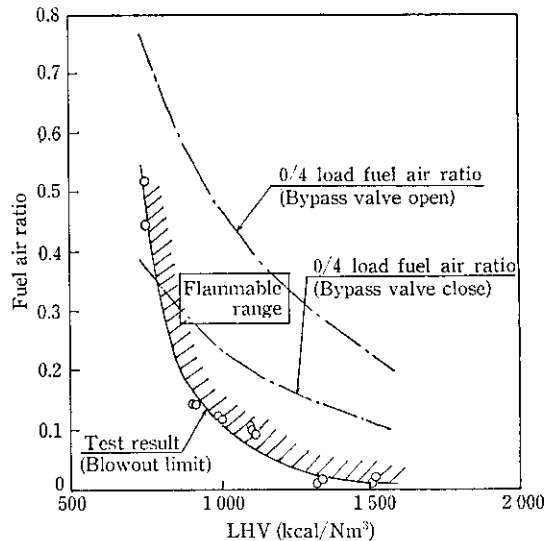


Fig. 1 Fuel air ratio of blowout limit

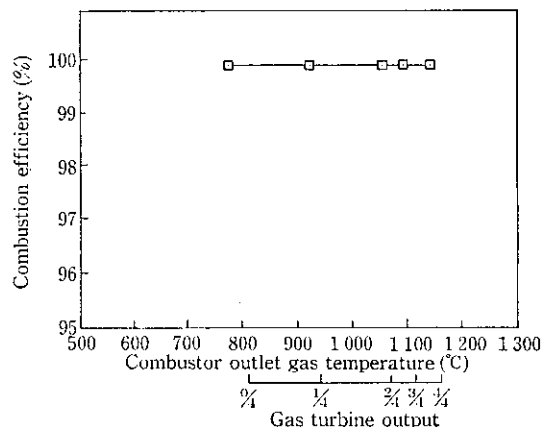


Fig. 2 Combustion efficiency

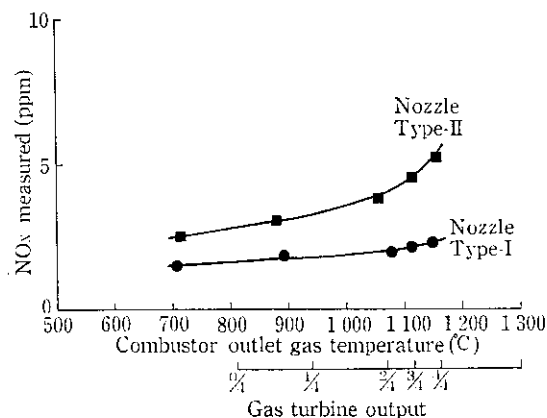


Fig. 3 NO_x emission characteristics

ーと吹き消え空燃比を示したもので斜線部が安定燃焼領域である。一点鎖線が無負荷運転時の空燃比を示しており、 900 kcal/Nm^3 以上であれば、安定燃焼が可能であることが判明した。Fig. 2 は燃焼ガス温度と燃焼効率の関係を示したものであり、全運転域で高い燃焼効率が得られることがわかった。さらに、燃焼器の NO_x 発生特性を実験したところ、燃焼温度が高い場合でも 8 ppm と低い値を示し、環境上も問題ないことが判明した。Fig. 3 に燃焼ガス温度と NO_x 濃度の関係を示す。

以上の知見をもとに、燃焼器の径、空気配分、燃焼ノズルの最適化を行い、副生ガス焚きガスタービンへ応用した。これにより、天然ガスを燃料とする最新鋭のガスタービンコンバインド発電プラントと効率的にも出力的にも肩を並べることのできる発電プラントを製鉄所に初めて導入することに成功した。

3 発電設備

3.1 設備概要

コンバインド発電所の建屋内の様子を Photo 1 に示す。さらに全体機器配置図とプラント系統図をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示す。

ガスタービン、発電機、蒸気タービンおよびガス圧縮機は一軸上に結合し建屋内に設置され、コンパクトな配置となっている。また排ガスボイラ、電気集じん器およびガス冷却器は屋外に設置され、排ガスは既設の集合煙突へ導かれている。

本プラントの主燃料である転炉ガスと混合した高炉ガスは、混合器にてコークス炉ガスと混合され、 1000 kcal/Nm^3 に増熱された後、ダスト除去のため湿式の電気集じん器に導かれる。ダスト除去後のガスは、ガス圧縮機へ供給され所定の圧力まで昇圧された後、ガスタービン燃焼器へ導かれる。通常、高炉ガスの流量はガス圧縮機の静翼開度を操作することにより調整を行うが、調整範囲を超えるような部分負荷運転を行う場合には、余剰の高炉ガスはバイパス流量調整弁を経て、直冷式ガス冷却器にて減圧・減温された後、高炉ガス供給管へ戻される。

燃焼器に供給された高炉ガスは、空気圧縮機により供給された空気とともに燃焼し 1154°C の高温・高圧ガスとなり、ガスタービン部へ導入され動力を発生する。

ガスタービンから排出された排ガスは、複圧式排ガスボイラにて十分熱回収された後、約 115°C にて煙突より大気へ放出される。排

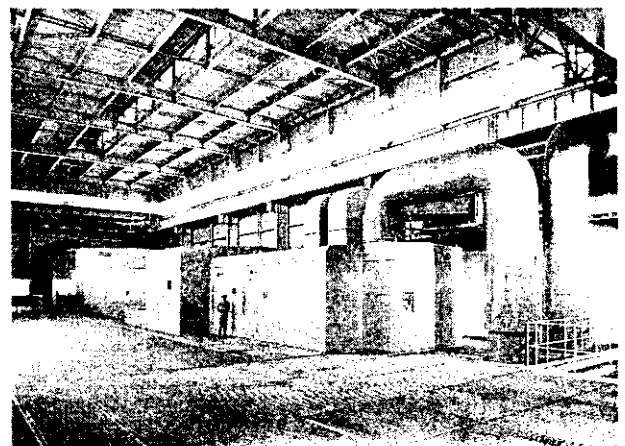
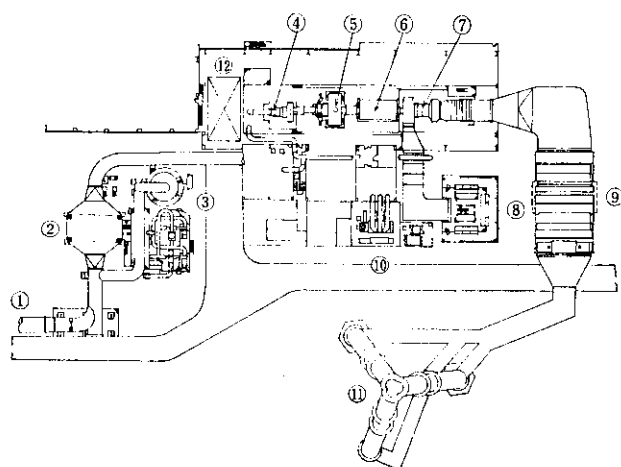


Photo 1 General view of gas turbine combined cycle plant



- ① BFG supply line ⑦ Gas turbine
- ② Electric precipitator ⑧ Inlet air filter
- ③ Gas cooler ⑨ Heat recovery steam generator
- ④ Gas compressor ⑩ Main transformer
- ⑤ Steam turbine ⑪ Stack
- ⑥ Generator ⑫ Open hatch

Fig. 4 Equipment layout

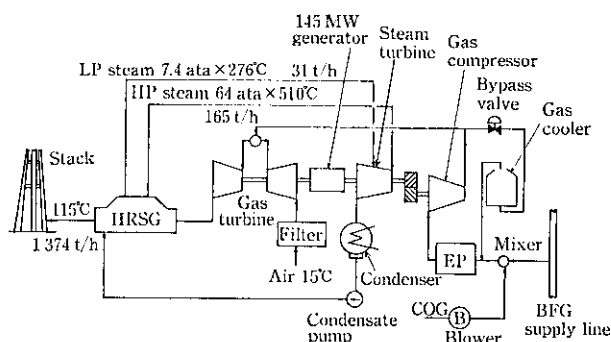


Fig. 5 Gas and steam flow diagram

ガスボイラで発生した高圧および低圧蒸気は、混圧復水タービンへ送られ動力に転換される。

本設備では、ガスタービンで124.4MW、蒸気タービンで57.6MWの動力が発生するが、ガス圧縮機駆動用動力として37MWを消費するのでプラント全体としての発電出力は145MWとなる^{*)}。

3.2 設備仕様

概略設備仕様をTable 1に示す。

3.2.1 ガスタービン

ガスタービンは一軸開放サイクル形 (MW-701D形) を採用した。低カロリーである高炉ガスを燃料とする場合、通常の天然ガス等の燃料に比べ燃料流量が10倍以上にもなるため、燃料流量増加分だけ空気流量を減少させる必要がある。このため空気圧縮機では翼列高さを調整し高炉ガス焚き用としての最適設計を行った。また、ガスタービン入口温度は低カロリー高炉ガス焚きとしては世界最高レベルの1154°Cを達成し、プラントの高効率化を図った。

ガスタービンロータは、振動特性が良好で保守・点検の容易な二軸受である。ガスタービン出力は、低温側の空気圧縮機軸端から取り出されており、熱伸びによるアライメントの変化の影響を受けない構造となっている。

Table 1 Specifications of main equipment

Item	Specification
Gas Turbine	1 unit
• Type	Single shaft, open cycle type
• Output	124 400 kW
• Turbine inlet temperature	1 154°C
• Speed	3 000 rpm
Heat Recovery Steam Generator	1 unit
• Type	Exhaust gas heat recovery, dual pressure type
• Evaporation (High press.)	175 t/h
• Evaporation (Low press.)	36 t/h
• Outlet pressure (High press.)	65.5 kg/cm ² g
• Outlet pressure (Low press.)	7.4 kg/cm ² g
• Outlet temperature (High press.)	513°C
• Outlet temperature (Low press.)	281°C
Steam Turbine	1 unit
• Type	Single cylinder, single flow, dual pressure, condensing type
• Output	57 600 kW
• Inlet pressure (High press.)	63 kg/cm ² gage
• Inlet pressure (Low press.)	6.4 kg/cm ² gage
• Inlet temperature (High press.)	510°C
• Inlet temperature (Low press.)	276°C
• Speed	3 000 rpm
Generator	1 unit
• Type	AC synchronous generator
• Capacity	170 600 kVA
• Voltage	12.5 kV
• Speed	3 000 rpm
Gas Compressor	1 unit
• Type	Axial flow type with variable front vanes
• Input	37 000 kW
• Speed	6 310 rpm

3.2.2 排ガスボイラ

排ガスボイラは排熱回収複圧式自然循環型を採用した。ガスタービン排ガスの熱エネルギーを有効に回収しプラント効率を極力向上させるために、高圧および低圧の2種類の蒸気を発生する複圧式を採用し、さらに節炭器の下流に脱気器蒸発器を設置し、その発生蒸気を給水の脱気用として使用している。自然循環型の採用により強制循環ポンプの補機動力が削減されている。また自立型構造のため支持鉄骨が省略され、シンプルな構造である。

3.2.3 蒸気タービン

蒸気タービンは両軸駆動混圧単流排気式復水形を採用した。低圧最終翼には、排気損失の少ない28インチ翼を採用しプラント効率の向上を図っている。排ガスボイラにて発生した高圧蒸気は一部工場送気も可能なように計画されているので、本タービンの高圧蒸気は定圧式としている。一軸式コンバインドプラント用蒸気タービンであり、起動時の暖機方法についてはガスタービンの起動特性に合

わせるため、高温域および低温域にも対応できる高低圧一体形ロータを採用し、とくに低圧部には系外蒸気による部分加熱等を配慮している。発電機がガス圧縮機を駆動する両軸駆動方式となっており、両軸端にはダイヤフラム式のフレキシブルカップリングが採用されている。この両カップリングで、発電機軸、蒸気タービン軸およびガス圧縮機軸の熱伸びを吸収するようにしている。

3.2.4 発電機

発電機は水素冷却式三相交流同期発電機を選定した。発電機の励磁側軸端は蒸気タービンと結合されており、軸がシンプルな構造であるサイリスタ励磁方式を採用している。

3.2.5 ガス圧縮機

ガス圧縮機は単車室軸流式であり、ガスタービン・発電機・蒸気タービン軸により増速歯車装置を介して駆動される。前方5段に可変静翼を採用し燃料ガス流量制御を行い、部分負荷時での効率低下を少なくしている。軸シールにはドライタイプのセグメントシールを採用するとともに、窒素ガスを封入しガス洩れの完全防止を図っている。

3.2.6 配電系統の特徴

発電機の出力変圧器は系統運用も考慮し3次巻線付変圧器を採用した。通常は製鉄所内の基幹変電設備である第1変電室に接続されて運転されるが、発電機起動時には起動用変圧器として、さらに3次巻線を利用して第1変電室と中部変電室を連絡する系統運用変圧器としても使用できる多目的変圧器とした。Fig. 6に配電系統を示す。

3.2.7 基礎・建屋構造

タービン部およびボイラ部基礎は、上載荷重に対して十分な支持

力を確保し、しかも地震時の安定性を得るためG. L.-38m付近にあるN値50以上の洪積砂層に貫入させた鋼管杭基礎とした。また、建屋については、タービンより発生する騒音の遮音対策のため、1階部はコンクリート製プレキャスト板、2階以上はグラスウール入鋼板サンドイッチパネルを採用した。

3.3 設備の特長

本設備は、高効率・低NOxそして省力化を最大の目標として、以下の特長を備えている。

3.3.1 高効率コンバインドサイクルの採用

最新鋭の大容量・高効率ガスタービン MW-701D形と、複圧式蒸気サイクルとのコンバインド方式を採用することにより、プラント送電端熱効率46%（低位発熱量基準）以上を目標とした。この値は、最新の高温ガス炉ボイラ発電プラントと比較し、相対値で10%以上も上回る画期的な効率である。

3.3.2 一軸型のコンパクト配置

ガスタービン、発電機、蒸気タービンおよびガス圧縮機が増速歯車装置を介して一軸上に配列され、起動のための専用設備をなくしたコンパクトな配置となっている。主機軸系配列図をFig. 7に示す。軸系全長が40mを超えるため、各機器の軸方向熱伸びが相互に影響を与えないように、蒸気タービンの両軸端にフレキシブルカップリングを採用し、軸系の安定化を図っている。また、プラントの起動はCDQ排熱ボイラからの蒸気を利用して、主機である蒸気タービンにより行い、起動用モーターを省略した。

3.3.3 低NOx・低カロリーガス焼き燃焼器の開発

燃焼器は、低カロリーガスで安定燃焼し、しかも低NOxである空気バイパス付付マルチチャン型低NOx燃焼器を開発し、これを採用した。この燃焼器は、空気バイパス弁により空気配分を制御できるため、補助燃料なしで1000 kcal/Nm³の低カロリー高温ガスをガスタービンの起動から全負荷までの運転範囲において安定燃焼でき、100% 負荷遮断時の吹き消え特性もすぐれている。

3.3.4 副生ガスの有効利用と安定したカロリー制御

本設備の燃料ガスは、高温ガス（BFG）、コークス炉ガス（COG）および転炉ガス（LDG）の3種混合ガスである。Fig. 8に燃料ガスカロリー制御フローを示す。転炉の操業はバッチ的なため、転炉ガスについては、ホルダーの並列運転制御およびホルダーレベル制御を実施し、コークス炉と本プラントまたは高温ガス本管への供給を可能にし、ガス放散を防止している。さらに、本プラント向けには、ガスタービンの寿命上大幅なカロリー上昇は好ましくないため、コークス炉ガス流量の制御性を確保し、プラント保護のため発電出力に応じた転炉ガス最大投入量制御機能を付加した。燃料ガスの目標カロリーは1000 kcal/Nm³であり、その制御性は、起動・停止時および大幅な発電出力の変更時とも良好であり、1000±15 kcal/Nm³を達成している。また、トリップや負荷遮断時の燃料ガスが他の供給先へ圧力変動等の悪影響を与えないように、ガス圧緩衝装置を設

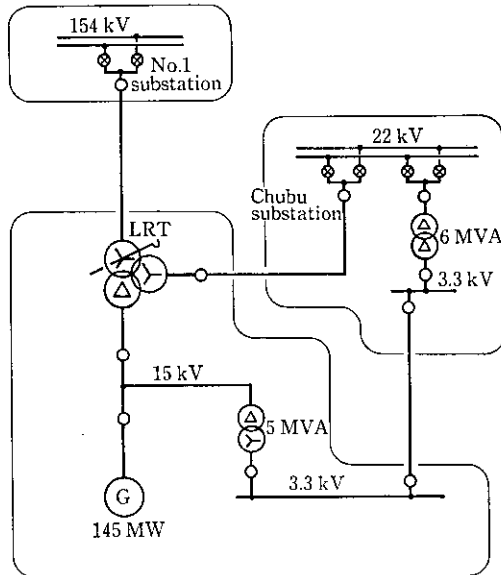


Fig. 6 Circuit system

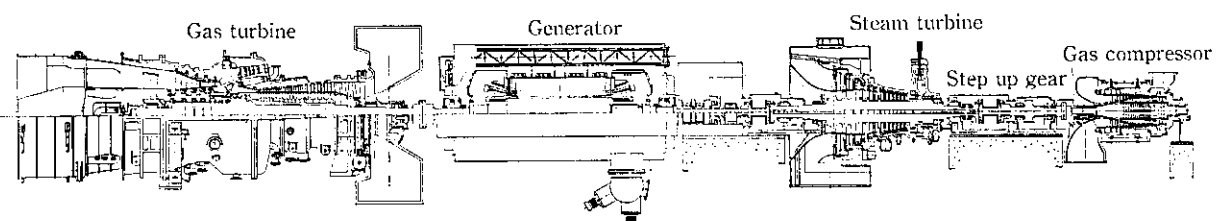


Fig. 7 Shaft arrangement

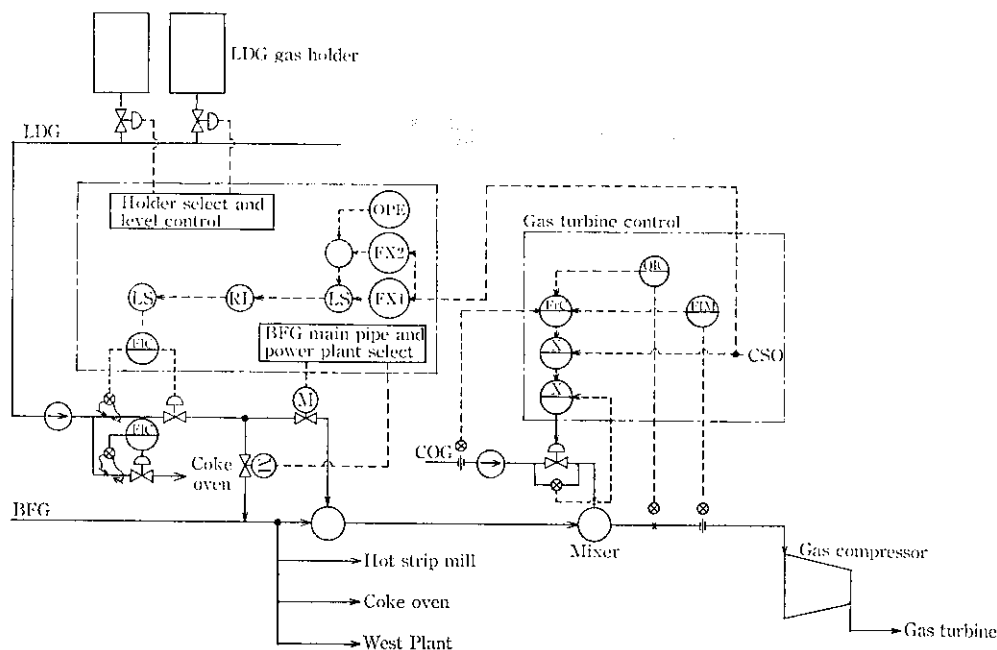


Fig. 8 Fuel gas control system

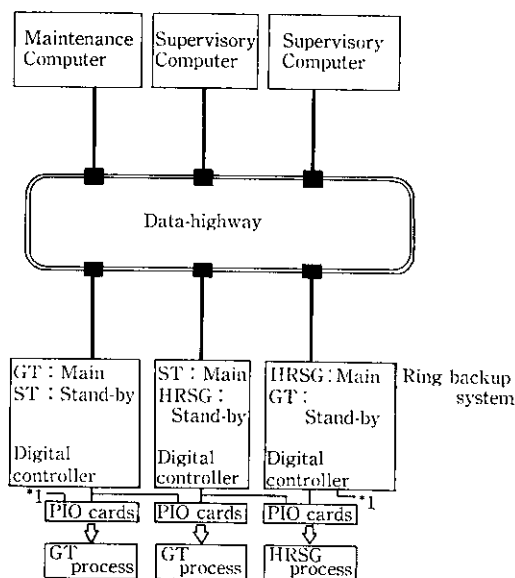


Fig. 9 Configuration of computer control system

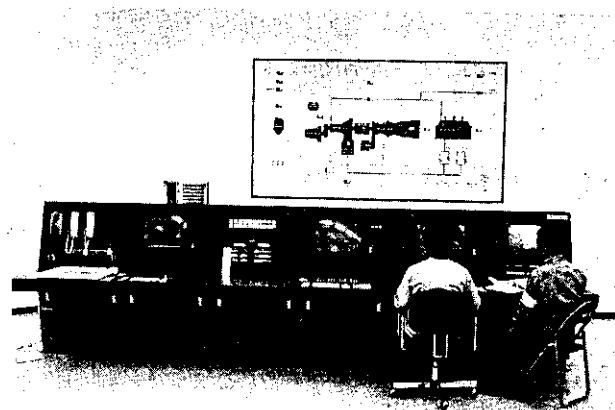


Photo 2 Control panel

けている。

3.3.5 遠隔自動化と合理的な CRT オペレーション

千葉製鉄所では、昭和 59 年にエネルギーセンターシステムをリフレッシュし、生産計画と一体化したエネルギー需給最適化を可能にした。本プラントは、その需給調整の役目も担っているため、エネルギーセンターとの情報伝達が不可欠である。このために、当初より本プラントの運転についてはエネルギーセンターからの遠隔自動化を基本方針とし、監視制御システムについてはエネルギーセンターシステムとの伝送を考慮した。Fig. 9 に今回の全体システム構成図を示す。監視制御システムでは、デジタル制御装置をリングバックアップ方式とし、監視用計算機を二重化し、高信頼性を確保した。さらに、保守用計算機を設置し保全性向上を図っている。大

きな特徴は、CRT オペレーション主体の合理的なマンマシンインターフェイスを構築し、容易な操作性を実現した点である。オペレータの操作は、基本的には起動、停止などの指令と目標負荷の設定のみである。補機の入切操作については、CRT 画面に押ボタンを割り付け、アナロググループの操作ステーションを押ボタンと共用することにより、大幅に盤スペースを削減した。また、経済性の観点より、各指令等の信号伝送にもデータウエイを活用し、配線量および配線工事の合理化を図った。Photo 2 にエネルギーセンター外観を示す。

4 試運転結果

4.1 試運転概要

試運転は、昭和 62 年 8 月の通水に始まり、9 月末にインターロック試験を終了、10 月 3 日に初着火した。10 月中旬より負荷試験

にはいり、12月2日から使用前検査を実施、12月8日には東京通産局の使用前検査に合格し、その後営業運転にはいった。

4.2 着火試験

今回のプラントは、パイロットを用いず低カロリーの副生ガスのみで着火を行う初めての試みであったため、実機においてもカロリーおよび空燃比を調整しながら着火特性を調査した。Fig. 10は着火時のガスカロリー、空燃比と着火の可否を表したものである。1200 kcal/Nm³では、空燃比の大きい領域から安定して着火しているが、1100 kcal/Nm³では着火の確率は50%であった。これらの結果より、着火時はカロリーを1200 kcal/Nm³とし、着火、昇速後、設定カロリー（通常は1000 kcal/Nm³）とする着火条件を採用した。

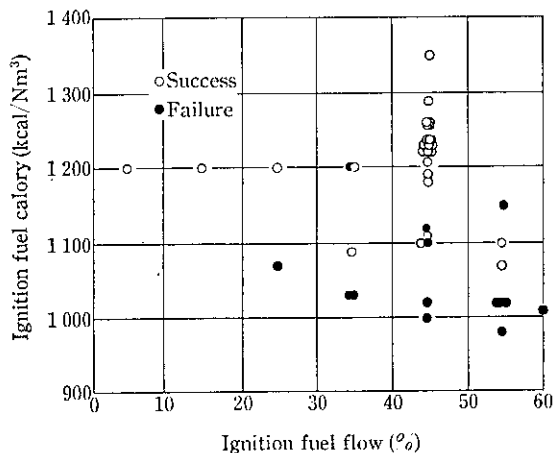


Fig. 10 Ignition characteristics

4.3 起動・停止試験

コンバインド発電プラントの起動時間は、蒸気タービンロータの冷却度合で決定されるため、本プラントでは、蒸気タービン調速段メタル温度からロータの冷却状態を推定し、3種類の起動モードのいずれかが自動的に選択されるようになっている。Fig. 11は、ホット、ウォーム、コールドの起動時間を比較したものである。ホット状態（停止後8時間以内）ならば、約100分で全負荷まで到達でき、通常の発電プラントに比べると約1/3の起動時間である。また、停止時間も50分で済み、しかも燃料遮断弁を全開とするだけで安全に待機できるので、製鉄所のガスバランスに合わせた起動、停止が可能である。

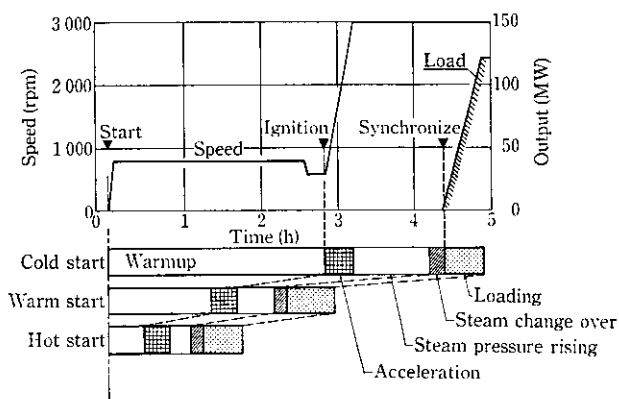


Fig. 11 Start-up characteristics

4.4 負荷遮断試験

Fig. 12に4/4負荷遮断時の結果を示す。負荷遮断時の最大到達回転数は3162 rpm、整定までの時間は36秒である。整定までの時間は通常のボイラータービンに比べ約1/3の値であり、これは燃料ガスおよび空気圧縮機負荷（約130 MW）により回転数の落ち込みが速いためである。負荷遮断時の回転数制御は、ガスタービンの燃料制御弁および蒸気タービンの高圧蒸気加減弁で行っており、回転数上昇の抑え込みと整定時間短縮の点で各制御とも良好であった。また、負荷遮断時の急激な燃料変化に対しても失火することなく、吹き消え特性についても優秀であることが実証できた。

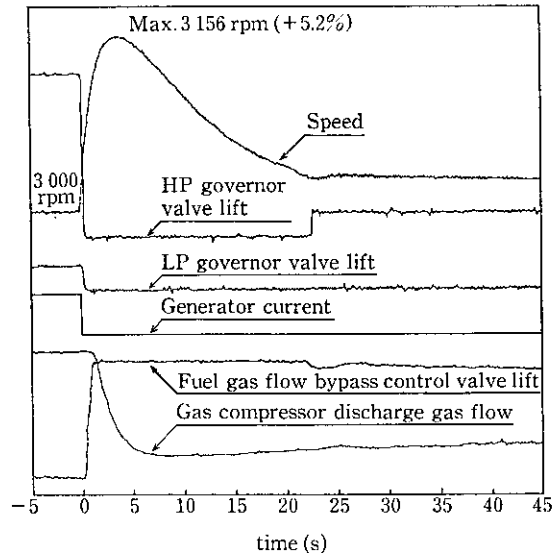


Fig. 12 100% load rejection test results

4.5 プラント性能試験

プラント効率、145 MW 負荷時で送電端熱効率46%（低位発熱量基準）以上を確認した。Fig. 13に発電出力と送電端効率の関係を示す。通常ボイラータービン発電プラント（川崎製鉄千葉製鉄所西発電所）と比較すると、130 MW 以上の高負荷領域ではコンバインド発電プラントの方が約7%も効率が上昇している。しかし、本プラントの場合、ガス圧縮機の固定負荷が大きいため、低負荷ではボイラータービン発電プラントより効率の低下が大きい。このため、既設発電所と組み合わせて運転する場合は、コンバインド発電プラントの高負荷、優先運転が必要である。Fig. 14にガスカロリーとプラント効率の関係を示す。運転領域900~1100 kcal/Nm³において平均して46%以上の効率を確認でき、ガスカロリー変化に

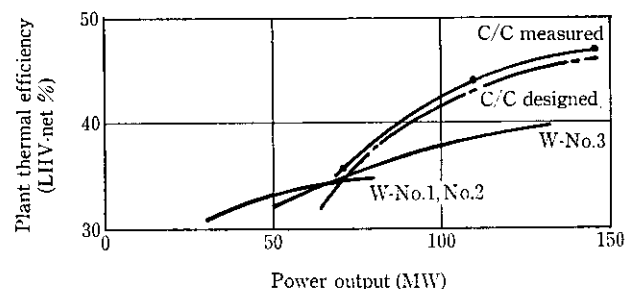


Fig. 13 Relation between power output and the plant thermal efficiency

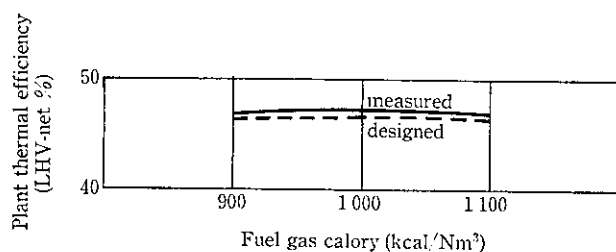


Fig. 14 Relation between fuel gas calory and the plant thermal efficiency at 100% load

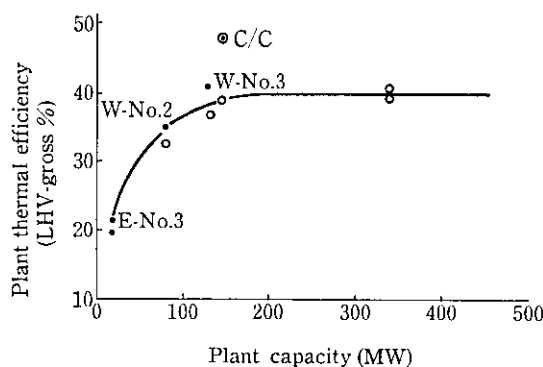


Fig. 15 Efficiency of the by-product gas firing power plant

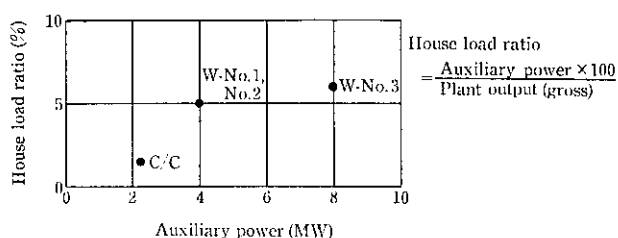


Fig. 16 House load ratio comparison

対しても安定して高効率を実現できることが実証された。Fig. 15 は副生ガス焚き発電プラントとの効率を比較したものである。通常ボイラータービン発電プラントでは、300 MW 以上の大型プラントでも 40% 前後の効率であり、本プラントが従来の大容量、高効率発電プラントと比べても著しく効率がよいことがわかる。Fig. 16 に通常ボイラータービンとの所内動力比率の比較を示す。ボイラー通風設備がないこと、給水ポンプの吐出圧が低いことにより、所内動力比率は、本プラントの場合、約 1.5% と低く、この点でも高効率に寄与していることがわかる。

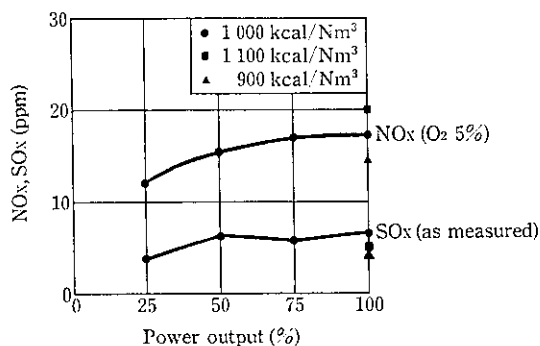


Fig. 17 Environmental data

4.6 環境試験

Fig. 17 に環境試験結果を示す。燃焼器を拡散式の低 NOx 型に改良したこと、燃料が副生ガスでカロリーが低いこと等の理由により、NOx 濃度は 20 ppm 以下 (O₂ 5% 換算)、SOx は 10 ppm 以下を確認した。また、騒音レベルについても、機側において目標値である 90 dB(A) 以下の数値を満足した。ばいじんは、燃料ガス系統に電気集塵機、吸気側にフィルターを設置したことにより、1 mg/Nm³ 以下の低レベルであった。

5 結 言

副生ガスの有効利用と製鉄所エネルギーコスト低減を目的として、川崎製鉄千葉製鉄所に出力 145 MW の大容量・高効率のガスタービンコンバインド発電プラントを建設した。本プラントの特徴を示すと以下のとおりである。

- (1) ガスタービン、発電機、蒸気タービン、ガス圧縮機を一軸に配列し、起動装置を省略したコンパクトな配置を実現した。
- (2) 燃焼実験により、低カロリーガスで安定燃焼ししかも低 NOx である燃焼器を開発し、これを実機に採用した。
- (3) カロリーの異なる副生ガスを混合してカロリー制御を行うことにより、補助燃料なしにプラントを安定運転することを可能とした。
- (4) 完全 CRT オペレーションを採用しエネルギーセンターからの遠隔自動化を実現した。

これらの結果、プラント送電端熱効率は 46% (低位発熱量基準) 以上を達成し、副生ガス焚き発電プラントとしては画期的な効率を実現した。現在、省エネルギーの主要戦力として大きく貢献するとともに、今後の副生ガス焚き発電プラントの指針を示すものとして期待される。

参 考 文 献

- 1) 荒川光夫：火力原子力発電，38 (1987) 12, 51-64
- 2) 矢吹雅男，山下三千夫，滝 頼母，岩田清光，辻 正，富永 明，石橋 則隆，木田宏二，大内一敏：三菱重工技報，22 (1985) 3, 2-7
- 3) 森 義孝，皆沢勝司，三賢憲治，沖汐正悦，室野光男，福江一郎：三菱重工技報，21 (1984) 6, 34-43
- 4) 高野英樹，小森豊明：ガスタービン学会誌，15 (1988) 60, 掲載予定