

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.21 (1989) No.1

水島製鉄所の新エネルギーシステム

New Energy Control System at Mizushima Works

石田 七雄(Nanao Ishida) 秋本 圭一(Keiichi Akimoto) 永礼 透(Tooru Nagare)

要旨：

水島製鉄所ではエネルギーの安定供給と有効利用をねらいとして、エネルギーシステムを刷新した。本システムは製鉄所の生産稼働計画をエネルギーバランスの観点から見直し、修正する仕組みをもち、月間計画から時間単位のエネルギー需給計画にまで分解するという一連の流れを構築している。一方、計装システムでは、マン・マシン・インターフェースを充実し、アドバンスト制御技術を駆使して完全自動化を実現した。本システムの導入により、所内はもとより共同火力発電所の効率的運用にも大きく貢献し、エネルギーコストの削減、要員の合理化等、多大の効果を上げている。

Synopsis：

At Kawasaki Steel's Mizushima Works, its energy system has been completely innovated for the purpose of stabler supply and more effective use of energy. This system has functions of revising the production plans of the works from a standpoint of energy balance and of monthly planning through hourly supply and demand of energy. The instrumentation system for the energy system has sophisticated man-machine interfaces, which enable a perfect automatic operation through the best use of advanced control technology. Through introduction of this energy system is attained efficient operation of the in plant joint power station with other energy facilities in the works, and this has brought satisfactory effects on reduction in the energy cost and number of workers required.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

New Energy Control System at Mizushima Works



石田 七雄

Nanao Ishida

水島製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長補)

秋本 圭一

Keiichi Akimoto

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(課長補)

永礼 透

Tooru Nagare

水島製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(掛長)

1 緒 言

我国鉄鋼業のエネルギー使用量は、日本全体の15%以上を占め、かつ製造コストに大きいウエイトをもつことから省エネルギーに対する要求が高く、コンピュータによるエネルギー管理も長い歴史をもつ。そうした中で、水島製鉄所はすでに1980年に副生ガス利用技術として、燃焼等価(A₀I)方式による混合ガス供給技術を開発し、とくに転炉ガスの有効利用をねらいとした第1次エネルギーシステムを確立している¹⁾。

この既存システムを生産工程管理システムと一体となったエネルギー需給計画から実運用に至る総合的なエネルギーシステムにリフレッシュした。本システムの開発は、エネルギー安定供給、エネルギー最適運用、運転の合理化を重点課題とした。とくに副生ガスの40%以上を消費する共同火力発電所の効率的運用を目的としたガス供給の最適化技術、蒸気運用へのAI(人工知能)技術の適用など、多くの新技術を開発している。

以下に、システム開発の背景およびシステムの概要を述べる。

2 システム開発の背景

水島製鉄所では、石油ショックを契機として1980年にはオイルレス製鉄所となり、製鉄所全体が原料炭をエネルギー源としたエネルギー転換工場と見なされるようになった。

その後、大型省エネルギー案件が次々と具体化し、製鉄所のエネルギーは余剰基調となり急速にエネルギーの外販が多様化してきた²⁾。また、製鉄所特有の大幅なエネルギーの需給変動とエネルギー運用の多様化はオペレータの負担を増加し経済的運用を困難にしていた。さらに、生産ラインの同期化、連続化も進み、エネルギー面でそれに擾乱を与えることなくサポートできる体制作りが緊急の課題となった。

要旨

水島製鉄所ではエネルギーの安定供給と有効利用をねらいとして、エネルギーシステムを刷新した。本システムは製鉄所の生産稼働計画をエネルギーバランスの観点から見直し、修正する仕組みをもち、月間計画から時間単位のエネルギー需給計画にまで分解するという一連の流れを構築している。一方、計装システムでは、マン・マシン・インターフェースを充実し、アドバンス制御技術を駆使して完全自動化を実現した。本システムの導入により、所内はもとより共同火力発電所の効率的運用にも大きく貢献し、エネルギーコストの削減、要員の合理化等、多大の効果を上げている。

Synopsis:

At Kawasaki Steel's Mizushima Works, its energy system has been completely innovated for the purpose of stabler supply and more effective use of energy. This system has functions of revising the production plans of this works from a standpoint of energy balance and of monthly planning through hourly supply and demand of energy. The instrumentation system for the energy system has sophisticated man-machine interfaces, which enable a perfect automatic operation through the best use of advanced control technology. Through introduction of this energy system is attained efficient operation of the inplant joint power station with other energy facilities in the works, and this has brought satisfactory effects on reduction in the energy cost and number of workers required.

これとは別に生産管理システムも充実し、情報ネットワークの完成により精度の高い生産稼働情報が得られるようになり、エネルギーシステム構築のための環境もほぼ整った。

一方、水島製鉄所のエネルギープロセスの中で重要な位置を占める共同火力発電所は、中国電力(株)の石油火力からエネルギーコストの安価な石炭火力への移行等によりコスト競争力が弱まりつつあり、発電コスト低減対策として重油混焼からガス専焼化へと設備改造が実施されたため、より安定したガス供給が要求されてきた。

このようなエネルギー運用の環境変化に対応するため旧システムを全面的にリフレッシュした。

今回の新システムは

- (1) エネルギーの安定供給
- (2) エネルギー管理体制の確立
- (3) 運転監視機能の強化
- (4) システムのエネルギー情勢変化への柔軟な対応を重点に開発している。

* 昭和63年10月24日原稿受付

3 システムの機能と構成

3.1 システムの設計思想

エネルギー部門の使命は「品質保証されたエネルギーを低コストで安定供給する」ことを基本として、以下の項目に重点を置きシステム設計を行った。

- (1) エネルギーの計画立案から実運用にいたる一連の業務の流れで各々のアウトプットを次ステップに有効に機能させる。
- (2) 既存の情報ネットワークを活用して製造部門の操作情報をリアルタイムに取り込み、変化に対して迅速な対応を可能とすると共に、エネルギーの実績情報を関係部門に提供し用役コストの削減を支援する。
- (3) マン・マシン・インターフェースは対話形式を基本とし情報のビジュアル化を図りオペレータの判断を支援する。
- (4) 運転監視システムはデュアル化によりシステムの信頼性を高める。またアドバンスト制御技術などにより高度な制御および自動化を達成する。
- (5) 従来、オペレータが行っていた運転業務の自動化およびAI等の導入により最少人員による操業を可能とする。

3.2 システムの機能

本システムは6つのサブシステムから成っており、各サブシステムの概要は次のとおりである。

3.2.1 総合計画サブシステム

既存のトータルエネルギーコスト評価システムに電力需給シミュレータ等の機能を附加した総合エネルギー戦略を策定するシステムであり、短期（半年）から長期（5箇年）までのエネルギー需給計画の立案やエネルギー関係の設備計画検討等に活用する。

3.2.2 工程調整サブシステム

月、週、日レベルのエネルギー需給計画を立案する機能を持ち、既存の生産工程システムとリンクすることによりタイムリーな工程調整あるいは生産調整を行う。

3.2.3 運用支援サブシステム

製鋼、熱間圧延工場等の直近操業計画情報をリアルタイムで受けエネルギー需給計画の修正とリアルタイム予測を可能とし、共同火力発電所へのガス供給量の最適化、電力デマンドコントロールの支援等を行う。また中圧蒸気の需給調整にAI（エキスパートシステム）を導入し、中圧蒸気製造量のオペレータガイダンスを行う。

3.2.4 評価サブシステム

エネルギーの需給計画と運用実績の評価を行うシステムで、問題点への対応を迅速に行えるようにビジュアル化を図る。

3.2.5 運転監視サブシステム

製鉄所内のエネルギー監視と操作を集中的に行うエネルギーセンターでは、燃料、電力、用水、環境（大気、水質）に関わるすべての設備についてアナログ計装からデジタル計装に更新し、徹底した自動化を図った。これにより、オペレータは最適運用等の判断業務へ集中できるようになった。

3.2.6 技術解析サブシステム

エネルギーの実績データについて、任意に指定した期間のデータ項目を誰でもトレンド表示または回帰分析等の解析業務が簡易に行えるようにした。

3.3 システムの構成

本システムの機能構成を Fig. 1 にハードウェア構成を Fig. 2 に示す。各コンピュータ等の機能分担は、C/C (central computer) が総合計画、工程調整、評価、技術解析を担当し、O/C (operational computer) と P/C (process computer) は運用支援を担当している。計装システムは燃料、環境、蒸気を担当する DDC と電力および用水を担当する TCC (telemeter telecontroller computer) により構成されている。Table 1 に運転監視対象の設備を示す。また Photo 1 にエネルギーセンターの全景を示す。

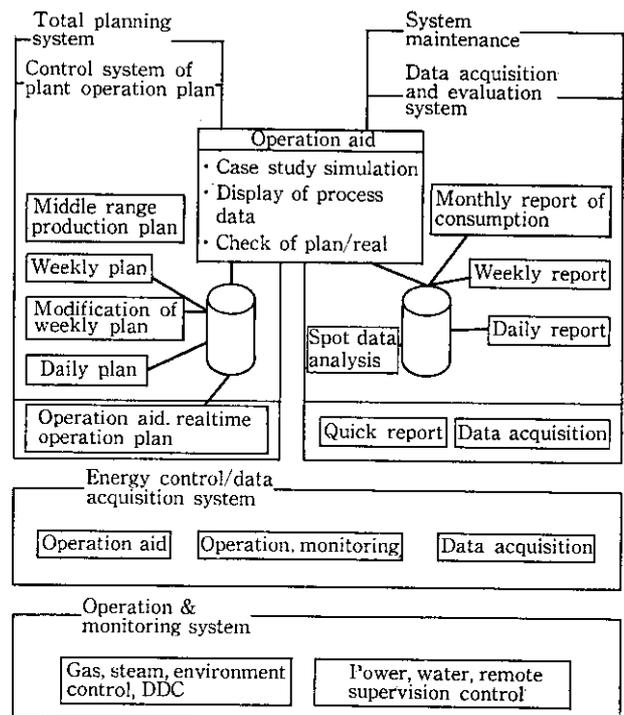


Fig. 1 Functions of the energy system

Table 1 Equipment supervised and controlled by the system

System	Equipment	Number
Fuel	Gas holder	7
	Gas blower station	8
	Town gas plant	1
	H ₂ gas plant	1
Power	Substation	30
	Emergency generator	4
Water	Recirculation pump station	31
	Water treatment station	2
	Industrial water pump station	1
Environment	Observation equipment for air pollution and water pollution	13

4 システムの特徴

4.1 運転支援サブシステム

本サブシステムの特徴は、工場の生産計画の立案からプロセスの

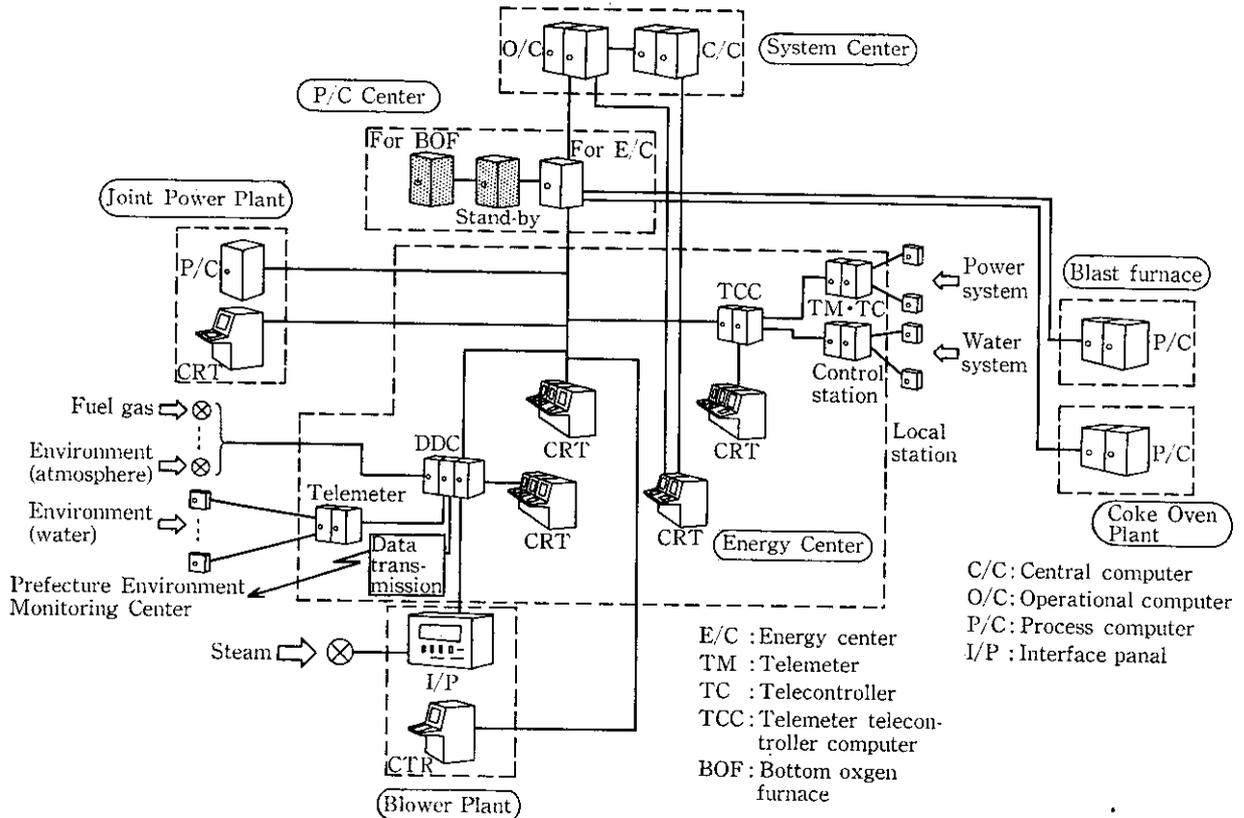


Fig. 2 Hardware configuration of the system



Photo 1 Energy Center at Mizushima Works

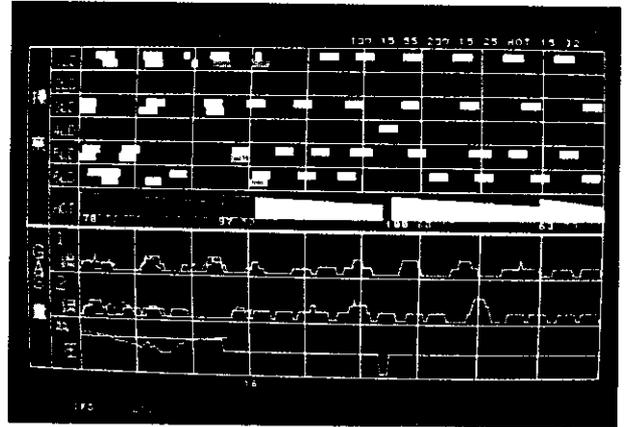


Photo 2 Display of real-time prediction

制御に至るまで、情報の流れを統合的に管理していることにある。情報の流れとしては、下位システムから上位に上ってゆく実績収集の流れと、上位システムから下位においてゆく運転支援の流れがある。Fig. 3にその後者の流れを示す。ここでの特徴を以下に挙げる。

- (1) ガスの大口使用工場である熱圧工場の加熱炉操作スケジュール、装入鋼材の仕様等のデータを、装入ロット単位で熱圧 O/C システムより受信し、ガスバランス予測の精度を上げた。
- (2) 間欠的に発生する転炉ガス (LD ガス) の発生タイミングを予測するために、転炉吹練スケジュールをリアルタイムで転炉プロコンから受け取るようにした。
- (3) コークス P/C において石炭装入スケジュールに基づくコークス炉ガス (C ガス) 発生予測量を求め、1時間ごとに、将来

8 時間分をエネルギーの P/C に伝送している。これによって、カロリーがもっとも高く、利用度の高い C ガスの予測精度を向上させた。

- (4) LD ガス回収ブロワの自動運転を行うために、転炉 P/C からリアルタイムの吹練情報 (溶銑装入、スクラップ装入、吹練酸素量など) を受け取るようにした。これらのデータを P/C から DDC に渡し、ブロワ起動タイミング、起動台数を自動的に決定している。

転炉および熱圧工場に関する情報をまとめて表示した P/C の画面例を Photo 2 に示す。

O/C および P/C によって集められたこれら工場のエネルギーバランスに関する情報を、具体的にどのように利用しているかについ

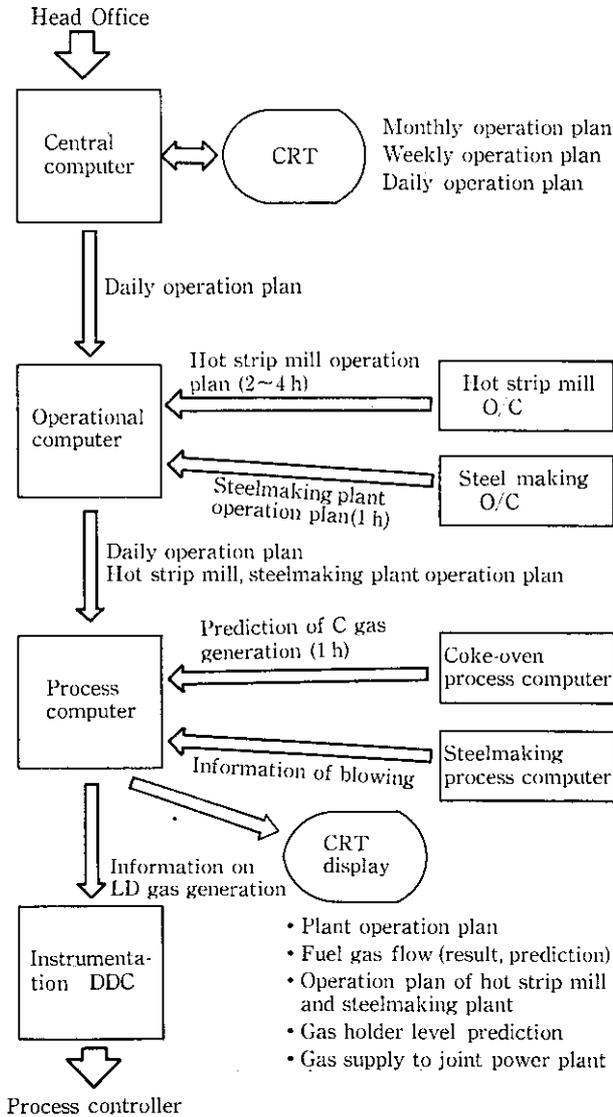


Fig. 3 Information flow of operation support sub system

て、以下に代表的な例を示す。

4.2 共同火力発電所ガス通告の最適化

Fig. 4 に対象のガス供給システムを示す。高炉ガス (B ガス)、C ガス、混合ガス (M ガス) は所内で使用され、残りはホルダに貯蔵されるかまたは共同火力発電所に供給される。共同火力発電所には5 缶のボイラがある。1 号、2 号ボイラは重油と (B+M) ガスを燃料とし、3 号、4 号および5 号はこの他に C ガスも使用できる。後者の重油と C ガスは互いに置換可能であり、すなわち C ガスを一定量安定して供給すれば、重油の消費量を削減できる。ただし、いったん、重油供給を停止した場合 (これをガス専焼とよぶ) 重油からガスへの切換作業が発生するため、一定時間以上その状態を継続せねばならない。

また、製鉄所は共同火力発電所に対し、事前に将来のガス供給量を通告するよう取り決められている。重油を削減することは共同火力発電所、製鉄所共通の利益となるため共同火力発電所へのガス供給量の計画を適切に立てることが課題となる。そこで問題は次のように書ける。「与えられたガス発生予定量、使用予定量のもとで対象とする時間範囲での目的関数を最大にするような通告値の系列を求めよ」。今の場合 1 回の通告時間幅は 2 時間であり、対象時間範囲は 8 時間とした。

この問題に対し数理計画法を適用した。制約条件は次の項目である。

- (1) 各ホルダレベルの上下限
- (2) 共同火力発電所送給ガス量の上下限
- (3) 共同火力発電所送給 M ガスカロリーの上下限
- (4) C ガス送給量とガス専焼缶数の関係式
- (5) ガス専焼継続・不継続の条件式

また目的関数は次の項目から構成される。

- (1) ガス供給量の評価額
- (2) ガス専焼による重油削減利益
- (3) ガス放散、ガス不足ペナルティ
- (4) ガスホルダのレベル変動ペナルティ

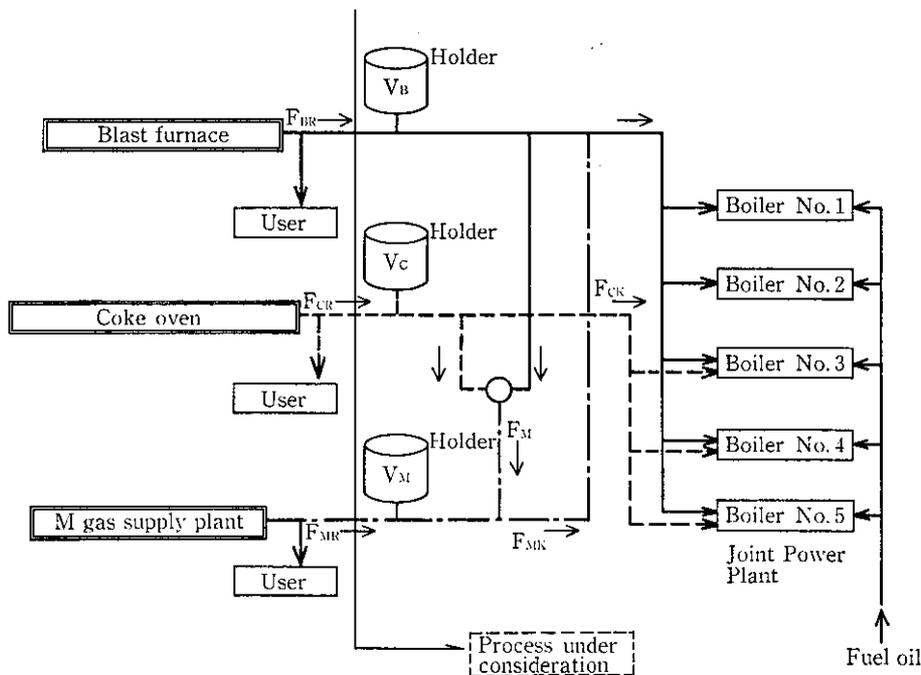


Fig. 4 Gas supply system for Joint Power Plant

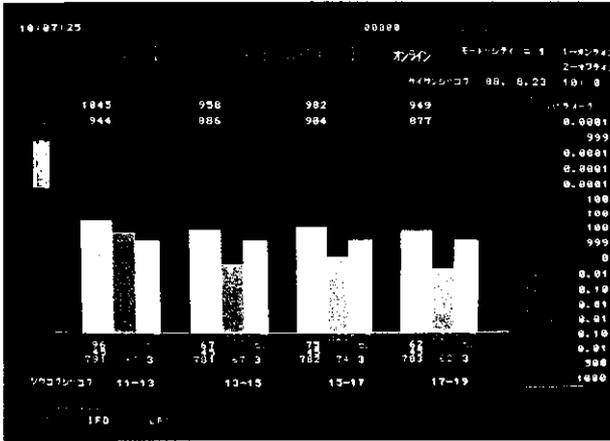


Photo 3 Display of gas supply prediction for Joint Power Plant

- (5) ガス専焼不継続ペナルティ
- (6) ガス専焼缶数変動ペナルティ

この問題の特徴として次の事柄がある。

- (1) ガス専焼するか否かを表す0-1変数を含むこと。
- (2) 1期2時間の最適化問題が4期8時間分集合した形であること。
- (3) それら4期の問題がいくつかの連続変数によって結合されていること。

このような特徴を持つ問題は混合整数計画問題といわれる。これを分解法³⁾によってP/Cでリアルタイムに解いてオペレータによる通告値決定の参考として使用している⁴⁾。計算結果を表示する画面をPhoto 3に示す。

4.3 蒸気プロセスへのAI技術の適用

蒸気もエネルギー管理の上で重要な位置を占める動力源である。蒸気の系統は、圧力によって高圧、中圧、低圧に分類される。今回その中で所内で広く使用されている中圧蒸気系統 (14 kgf/cm² ライ

ン) に対して、エキスパートシステムを用いて圧力を一定に制御することを試みた。システムの構成をFig. 5に示す。

中圧蒸気は、送風プラントやCDQ (コークス乾式消火設備) で発生する高圧蒸気を混圧タービン、背圧タービンおよび減温減圧装置によって減圧して製造している。中圧系統にはこの他に、焼結や転炉の排熱回収ボイラからの発生蒸気、アキュムレータの貯蔵蒸気が流れ込み、また消費工場が接続されている。従来、オペレータは、中圧蒸気圧力を一定にするために、頻繁に混圧タービンなどの蒸気量を調整していた。蒸気の使用はパッチ的に行われることが多いので単純なフィードバック制御ではうまくいかず、工場の操業予定や、操作量をフィードフォワード的に決定してゆかねばならない。

このように多くの情報を経験的に処理し、判断しているプロセスを自動化するために、エキスパートシステムが適していると考えた。まず、オペレータに対して操作方法や判断の基準をヒアリングした。次にこれによって得た知識を整理し、ルールベースとしてまとめ、別途作成した蒸気配管システムモデルを用いてその妥当性をシュミレートしたあと、P/Cに組み込んだ。プログラムは5分ごとに走り、プロセス値の現在値とそのトレンド、RH脱ガス装置 (蒸気を短期間に大量に使う) の操業予定を考慮して、とるべきアクションの大きさ (混圧タービン等の蒸気量) を決定する。結果はCRTによってオペレータにガイダンスとして示される。

入力データの数は約40、ルール (IF~THEN形式のプロダクションルール) の数は約60である。リアルタイムのプロセス制御に適用するため、オフラインモードでのテスト機能、オンラインデータを用いたシミュレーション機能を充実させたことが特徴である。

4.4 Mガスプロワの自動化

水島製鉄所では、Mガス一元化と称して、A₀I (理論燃焼空気量を密度の平方根で割った指数) を合わせた異種ガスをひとつの配管にいて利用している。この方式は、ガスの利用が柔軟にできるといふ利点を持つ反面、多くのガス混合昇圧用プロワを持つ必要があり、その運転がオペレータにとって大きな負荷になっていた。今回のリフレッシュでこれを自動化することも大きな課題であった。

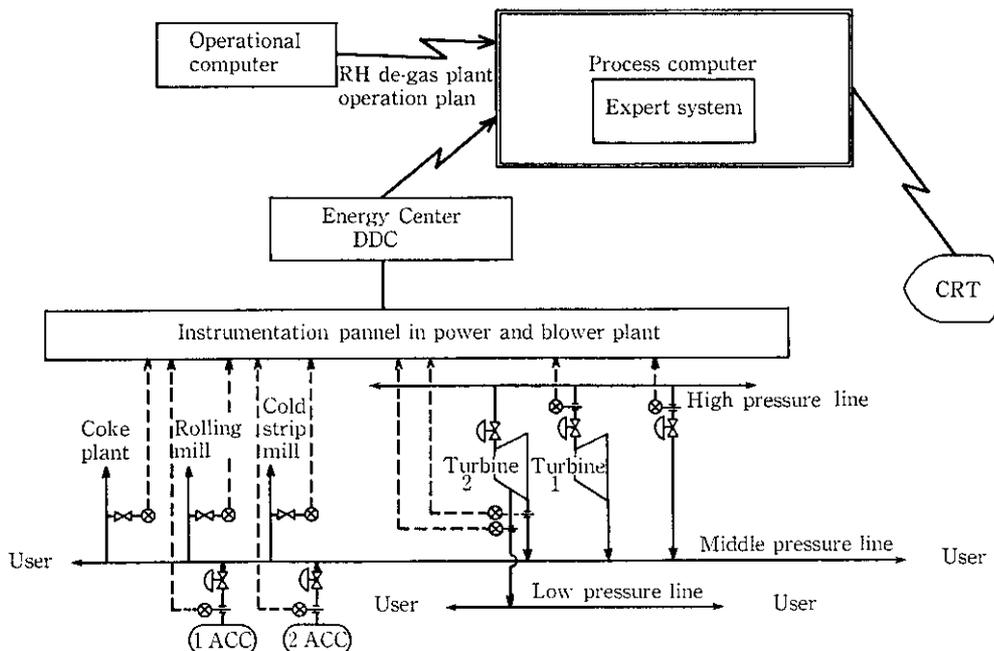


Fig. 5 Outline of steam pressure control guide system

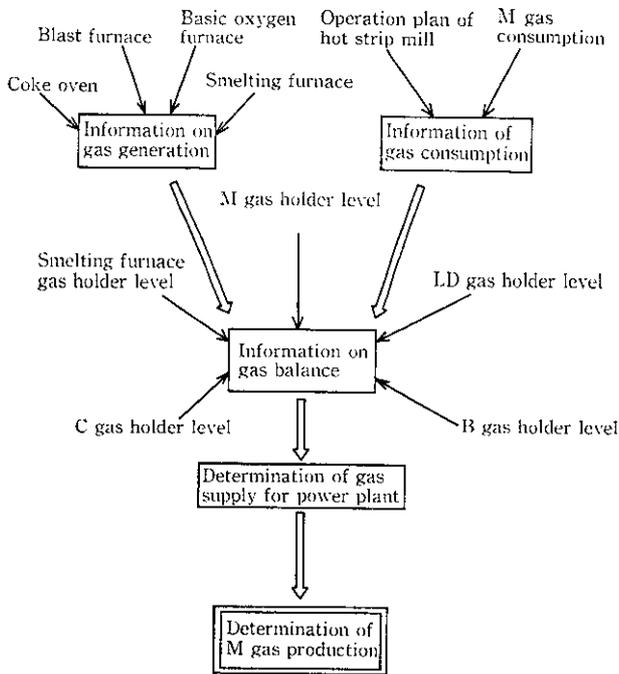


Fig. 6 Information flow of M gas production

M23G (Bガス+Cガスの混合ガス)は全体のMガスバランスを取るうえで重要な役割を果たし、合計8台のプロワで製造される。M23Gの製造量は、転炉吹練ごとに発生するM26G(LDガス+Cガス)の量や、圧延加熱炉の使用状況を総合的に考慮して求めなければならない。Fig. 6にM23G製造量の決定フローを示す。これら多量の情報を、主としてDDCで処理し自動的にプロワの運転・停止を行うようにした。

また、M26Gのプロワの運転は、転炉の吹練タイミング、LDガスの発生量によって決まるが、これも転炉P/CからエネルギーP/Cにリアルタイムで伝送される情報をDDCに渡すことによって自動化した。これらの改善によって、プロワの運転にはオペレータの介入が完全に不要になった。

4.5 電力システムの運用

電力システムの運用における重要な課題は電力デマンド(電力会社と結んだ契約購入電力量)の監視である。そのポイントは、各工場の使用電力の予測をできるだけ正確に行うことと、デマンドを超過しそうな時に迅速に対処できるようにすることである。

これに対し今回のような改善を行った。

- (1) プロコンに対して各工場の固有の運転・停止パターンを与えておき、このパターンに基づいて使用量の予測を行う。
- (2) オンライン・コンピュータのCRTに熱圧工場の圧延スケジュールを表示し、オペレータに今後の圧延予定を知らせる。必要ならば、スケジュールの調整を熱圧工場に依頼する。

また、電力システムの運転はすべてCRTおよびライトペンによって行うが、系統切り換え操作を確実にするため、作業手順登録によるチェックシステムを作った。そのCRTの画面例をPhoto 4に示す。これは、操作すべき手順をあらかじめCRTから対話的にコントローラに入力しておく、自動的にこの手順との一致がチェックされこれ以外の誤操作を防止する。従来、この種の操作は、操作者1名および確認者1名の計2名で行っていたが、これによって一人操作が可能となった。

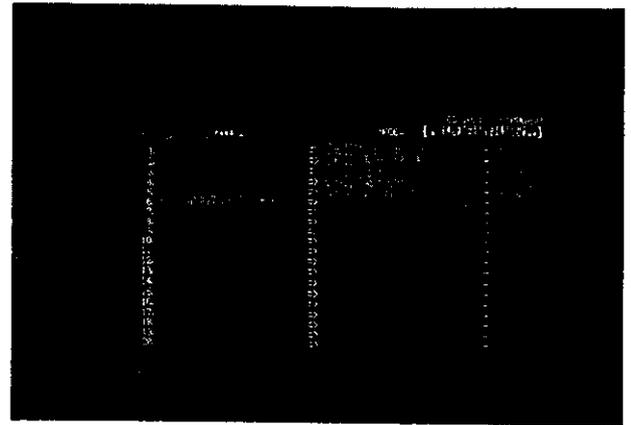


Photo 4 An example of display for operation check

5 実績の評価

5.1 共同火力発電所ガス専焼率

4.2で述べたように、共同火力発電所は副生ガスの発生と使用の最終的バランスを吸収する大きな役割をもち、かつ所内では最大のエネルギー転換工場である。また、中国電力の電力運用にも大きな影響力をもつことから、ガス供給量の安定、ガス量通告の精度向上は、共同火力発電所の運用にとってその効果は大きい。一方、共同火力発電所の重油使用量の削減は発電コストの低減となることから、ガス専焼率の向上は本システムの大きなねらいである。

Fig. 7は、ガス専焼率の推移である。Fig. 8は、共同火力発電所

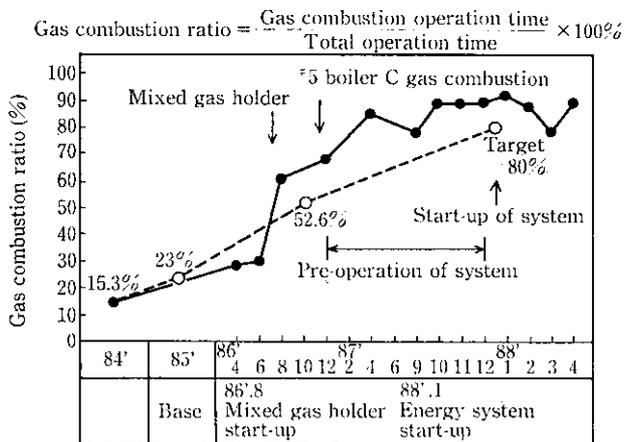


Fig. 7 Trend of Joint Power Plant gas combustion ratio

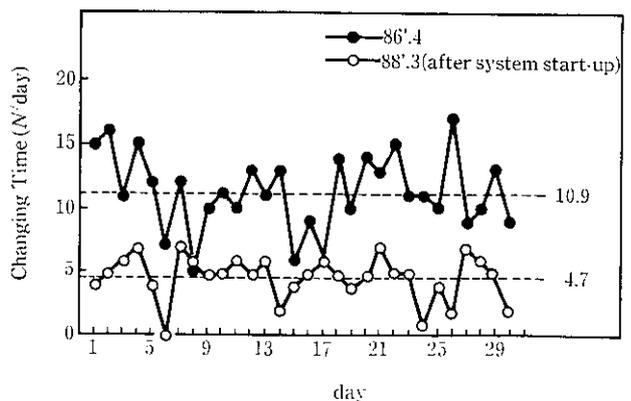


Fig. 8 Change of C gas quantity to Joint Power Plant

向けCガスの通告変更頻度を従来と比較したものである。ガス供給予測精度の向上により適切な通告が可能となった結果である。

5.2 電力夜間移行率

安価な夜間電力の積極的な利用はエネルギーコスト低減に寄与することはもちろんのこと、電力会社にとっても電力負荷の平滑化が図られることから好ましいことである。

一貫製鉄所は高炉操業の昼夜間ソフトが困難なため、夜間電力の盛り上げは下工程での品種構成による電力原単位の差異、生産能率等を考慮して適切にスケジュール化することが主要な手段となる。

本システムでは、工程計画に電力原単位等の情報を提供してスケジュールに折り込み、可能な限り夜間電力の有効活用を図っている。Fig. 9は最近の夜間率のトレンドである。

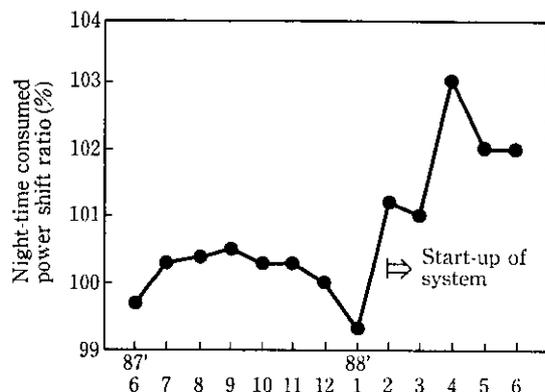


Fig. 9 Change of night-time consumed power shift ratio

5.3 業務の効率化

本システムでは、徹底した自動化とCRTオペレーション化を図り、オペレータの運転業務負荷を最小限に止めると同時に情報のビジュアル化と人間工学的レイアウトにより、経済運用重視型のオペレーションができるよう配慮した。現状では、電力、燃料、用水、環境設備を4名で運転し、かつ計画業務から実績評価まで自ら実行できるように改善された。この結果、業務の標準化が進み、属人的

作業が排除された。

以上、いくつか具体例を述べたが、電力デマンド予測技術向上、MガスA₀I制御精度向上、さらにユーザおよび関連部門でのエネルギー情報の有効利用は、製鉄所全体の技術力向上にも大きく寄与している。

6 結 言

水島製鉄所では、品質保証されたエネルギーの安定供給とコスト低減をねらいとして、エネルギーシステムをリフレッシュした。本システムは2年余の開発期間を要し、1988年1月に稼働した。本システムの特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) 製鉄所の生産稼働計画を、エネルギー需給の観点からサポートするために、生産管理部門とCRTを介して対話型式でエネルギー需給計画を立案できるシステムを開発した。
 - (2) また、製鋼、熱延等の生産・稼働情報をリアルタイムで受け、エネルギー需給計画のタイムリーな修正と、電力、ガスのリアルタイム予測が可能となり、共同火力発電所へのガス通告値の最適化、電力デマンドコントロールの支援等の技術レベルを飛躍的に向上させた。
 - (3) エネルギーセンターは、燃料、電力、用水および環境に関するすべての設備についてデジタル計装に更新し、徹底した自動化を図った。これによりオペレータは最適運用等の判断業務に集中できるようになった。
 - (4) 蒸気運用支援のために、AI(エキスパートシステム)ツールを活用し蒸気製造量制御およびアキュムレータの運用ガイダンスを可能とした。
 - (5) とくに本システムでは、オペレータ自身が自らの計画立案能力実行能力を評価し反省できる機能を加えたことにより、オペレータのシステム活用意欲を盛り上げ、システム改善に積極的に参加する効果をもたらしたことは、大きな成果である。
- 今後しばらくは、石炭依存型のエネルギー環境が続くと思われるが、製鉄所のエネルギー需給設備は、エネルギー環境や技術進歩等によりさまざまに変化していく。その変化に迅速に対応し、常にエネルギーを最適に運用することのできる体制を維持していくことが今後も要求される。

参 考 文 献

- 1) 山元 深, 篠原康章, 石田七雄, 深野輝雄: 「燃焼等価方式による混合ガス供給技術」, 川崎製鉄技報, 14 (1982) 12, 91-100
- 2) 山元 深, 佐々木洋三, 小泉 進: 「水島コンビナートにおける製鉄エネルギーの利用」, 川崎製鉄技報, 17 (1985) 2, 98-103
- 3) 三宮信夫, 岡本勝彦: 「連続系と離散系が結合した系の最適化」, 計測自動学会論文集, 18 (1982) 12, 1173-1179
- 4) 秋本圭一, 三宮信夫, 西川 一, 津田 宗: 「共同火力発電所へのガス供給最適化」, 計測自動制御学会学術講演会 (1988), 8, JS-6