

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol. 23(1991) No.3

焼結操業管理に対するエキスパートシステムの適用
Sinter operation Control System with Artificial Intelligence

深川 卓美(Takumi Fukagawa) 井山 俊司(Syunji Iyama) 奥山 雅義(Masayoshi Okuyama)

要旨：

水島製鉄所の第3，第4焼結工場に診断型エキスパートを用いた操業管理システムを導入し，操業の自動化を行った。制御機能は焼成完了点管理（BTP管理－1分，5分周期），設備管理，生産管理および品質管理である。ソフト構成はエキスパートツール（約500ルール）とフォートランプログラム（約11Kステップ）である。システムの適用によりBTPのばらつきを半減し，焼結鉱品質を高位に安定することができた。

Synopsis：

At Nos. 3 and 4 Sinter Plants of Kawasaki Steel's Mizushima Works, a sinter operation control system with a diagnostic expert system has automated its sintering plant operation. Control functions include burning through point (BTP) control at 1- and 5-min cycles, equipment protection, sintered ore production control, and quality control. Software structures include expert rules (about 500 rules) and FORTRAN program (about 11 K steps). The expert system has achieved reduction by half of BTP dispersion and highly stabilized production quality.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Sinter Operation Control System with Artificial Intelligence



深川 卓美
Takumi Fukagawa

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(掛
長)



井山 俊司
Syunji Iyama

水島製鉄所 製鉄部原
料処理課 課長



奥山 雅義
Masayoshi Okuyama

水島製鉄所 製鉄部製
鉄技術室 主査(課長
補)

1 緒 言

焼結操業の自動化の試みは従来より高炉各社で行われており、水島製鉄所においても'84年10月より焼結自動操業システムを稼働させているが、完全自動化までに至っていない。現状のシステムはその後の操業技術のレベルアップの成果が十分反映されておらず、また最近の要員合理化要請の高まりにより自動化のレベルアップが必要となった。このような課題を解決するため、診断型のエキスパートツールを用い、オペレータのノウハウを十分に取り入れ、かつ導入後の維持管理の容易な焼結操業管理システムを当所の第3および第4焼結工場に導入した。

2 システムの概要

焼結工場は高炉操業に必要な焼結鉱の品質と量を安定供給する役割を担っている。Fig. 1に焼結プロセスと本システムの機能構成を示す。焼結プロセスは、原料配合槽、ミキサー等の原料工程、点火炉、焼結機、主排風機等の焼結工程、クーラー、成品篩分け、成品搬送の成品工程で構成されている。従来のシステムで、均一焼成制御¹⁾は、バレットの幅方向の原料装入および焼成速度を均一に制御する基本機能でありそのまま流用した。従来の生産管理、品質管理、焼成完了点(burn through point: BTP)管理および設備管理の方式は²⁾、急激なBTPの変化に追従できない、大きな外乱(主排風機のダンパー操作を必要とするような外乱)に対処できない、生産管理、品質管理、BTP管理の制御ロジックが三次元マトリックス表現のためオペレータになじみにくいなどの問題点があり、自動運用率が60~80%と低く、改善が必要であった。今回これらの機能を大幅に見直し、開発を行った。

要旨

水島製鉄所の第3、第4焼結工場に診断型エキスパートを用いた操業管理システムを導入し、操業の自動化を行った。制御機能は焼成完了点管理(BTP管理-1分、5分周期)、設備管理、生産管理および品質管理である。ソフト構成はエキスパートツール(約500ルール)とフォートランプログラム(約11Kステップ)である。システムの適用によりBTPのばらつきを半減し、焼結鉱品質を高位に安定することができた。

Synopsis:

At Nos. 3 and 4 Sinter Plants of Kawasaki Steel's Mizushima Works, a sinter operation control system with a diagnostic expert system has automated its sintering plant operation. Control functions include burning through point (BTP) control at 1- and 5-min cycles, equipment protection, sintered ore production control, and quality control. Software structures include expert rules (about 500 rules) and FORTRAN program (about 11 K steps). The expert system has achieved reduction by half of BTP dispersion and highly stabilized production quality.

2.1 開発の目標

一つの焼結機をワンマンでオペレーションすることを自動化の目標とし、操業管理システムの開発を行った。今回は第1ステップとしてAI計算機の導入を中心とし、操業管理システムのソフトの開発を行うものであり、第2ステップで監視機器、操作機器の充実を図り、ワンマン化を達成の予定である。設計方針を以下に示す。

- (1) 大幅な操業変化にも適応し、操業予測モデルによる迅速なアクションが採れること。
- (2) 予測値の精度チェックを行い、予測誤差が大きいときは、予測値に頼らずオペレータの経験則に基づいたアクションが採れること。
- (3) オペレータの判断思考フローを反映した設計とし、状況判定の結果およびその推定過程をわかりやすくガイダンスすること。
- (4) システムのメンテナンスフリー化をねらいとし、管理値、予測式の係数、制御のアクション係数の自己修正が可能なこと。
- (5) 操業結果を自己評価できること。

2.2 システム構成

本システムは、Fig. 2に示すように既設の計装制御用DDC、既設プロセス計算機および今回導入したAI計算機で構成している。既設プロセス計算機はDDCを介してプロセスとのインタフェース、実績収集および設備管理機能(1分周期)等を分担し、AI計算機はBTP管理機能(5分周期)、品質管理機能(30分周期)、生産管

* 平成3年7月18日原稿受付

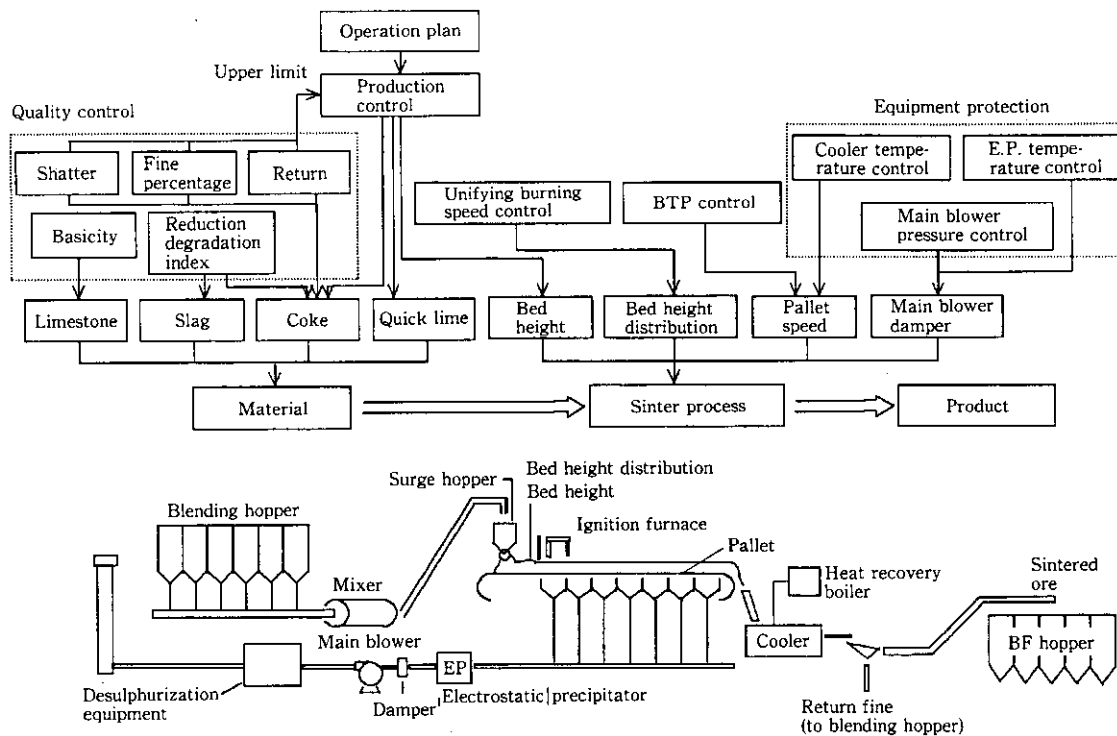


Fig. 1 Outline of sintering process and control system

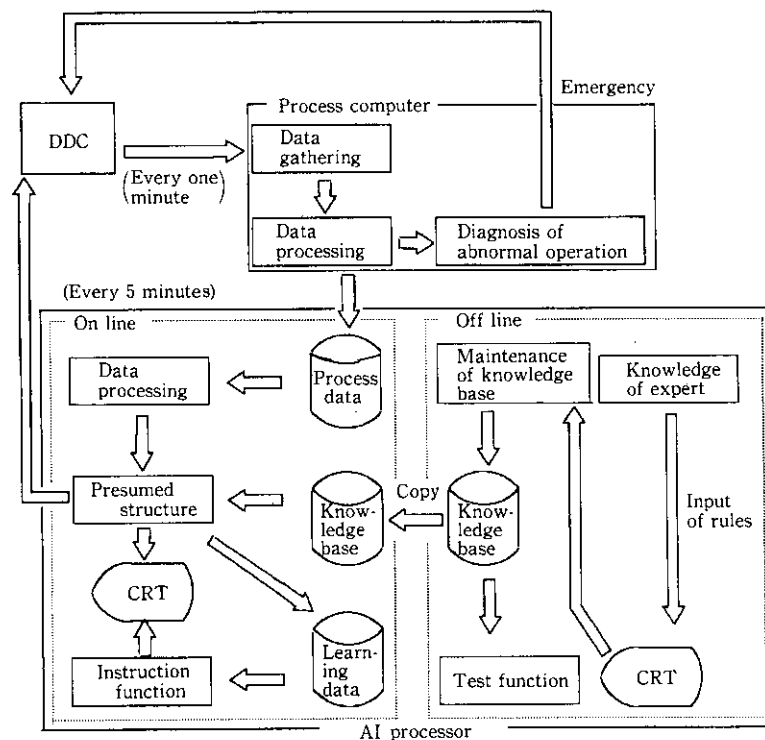


Fig. 2 Hardware structure of expert system

理機能 (30 分周期) 等を分担している。

3 機能

3.1 BTP 管理機能

BTP は、焼結機のパレット上の原料が点火炉で表面に着火され、

パレットの進行とともに焼成が表面から下方へ進んでいき焼成が完了する位置を表す指数である。Table 1 の P_3 付近が通常の BTP であり、ウインドボックス温度 a ~ e の 5 点中最高温度をはさむ 3 点の温度で 2 次曲線近似し、その頂点のパレット上の位置を BTP としている。BTP は中間管理項目で、焼結鉱品質や生産性と密接な関係がある。BTP が目標値から給鉱側に動くと、焼結鉱品質は向上するが品質スペックは過剰となり、焼結鉱製造コスト高となる。

Table 1 Definition of actual BTP and its prediction

	Definition	
BTP	Burn through point which is end point of sintering (point P3)	
BTP _A	Actual BTP which is expressed x-coordinates of top of approximate equation (1)	
BTP _L	Long time predictive BTP which is predicted by permeability of raw material at point P1 (about 30 min before BTP _A)	
BTP _S	Short time predictive BTP which is predicted by temperature of wind box at point P2 (about 10 min before BTP _A)	

また焼結の生産性は低下する（パレット速度を増速する余裕がある）。逆に BTP が排鉱側に動くと焼結鉱品質は悪化し、焼け残りが生じる原因にもなり、返鉱の発生が増加し、歩留りを低下させる。操業計画時に生産量や品質の目標値から BTP の目標値を決定し、BTP が目標値から外れた時、パレット速度を変更して目標値になるようにしている。

3.1.1 BTP 管理の特徴

BTP 管理の特徴として次のことが挙げられる。

- (1) 点火炉から排鉱部までのパレット上の原料の性状にはばらつきがあるが、これを同一の条件で焼成する。
- (2) 制御の応答 (Table 1 の BTP 予測点 P₂ で制御した結果が P₃ に現れるまでの) 時間が約 10 分で、トータルの焼成時間約 30 分に対しその割合が大きい。

3.1.2 BTP 管理機能のしくみ

BTP 管理機能は、定常 BTP 管理機能と 3.2 で述べる非定常 BTP 管理機能がある。定常 BTP 管理にはさらに、実績 BTP 管理 (1 分周期) と予測 BTP 管理 (5 分周期) がある。通常は予測 BTP 管理で BTP の制御を行い、急激な外乱等によって実績 BTP が通常の

管理範囲を超えた時、即時に実績 BTP 管理に制御が移る。以下予測 BTP 管理について述べる。

(1) BTP の予測

Table 1 に実績 BTP と二つの予測 BTP の定義を示す。予測値の一つは図の P₁ 点の原料通気度からの長期予測値 (約 30 分前) で、他の一つは P₂ 点のwindボックス温度からの短期予測値 (約 10 分前) である。長期予測値は、原料の配合比変更や、配合制御のトラブル等による配合比の大きな変動、原料槽のレベル管理の乱れによる原料の偏析、原料水分のばらつき等の外乱を P₁ 点の原料通気度の変化として検知し、BTP 予測を行うものであり、原料系統の大きな外乱に対する早期対応に有効である。短期予測値は制御の応答時間が短く、また予測精度が高いので、外乱の少ない時の制御に使用する。予測方法はいずれも自己回帰モデルを用いた。

(2) 予測 BTP 管理機能

Fig. 3 に BTP 管理機能の管理機能の構成を示す、長期予測値で上限以上が予測される時は、即時にパレット速度減速のアクションを採っている。これはアクションの遅れによる焼け残

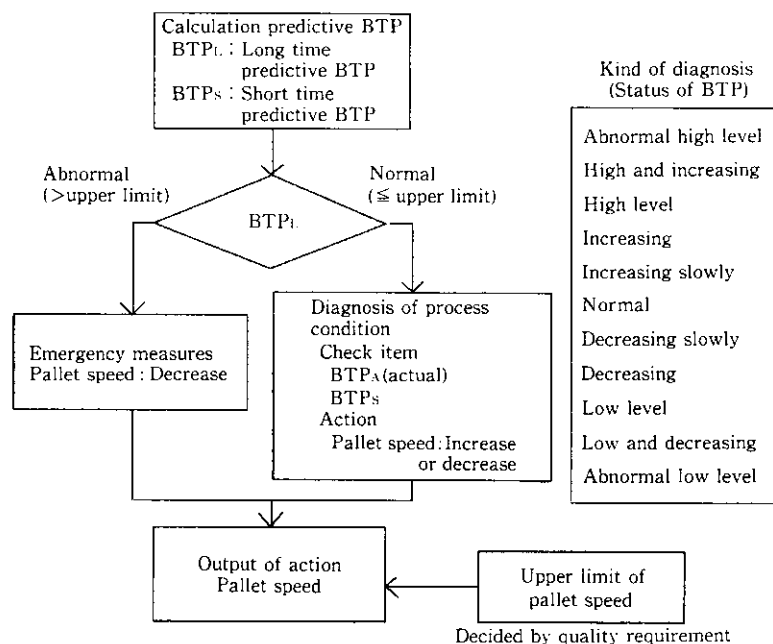


Fig. 3 General flow of predictive BTP control function

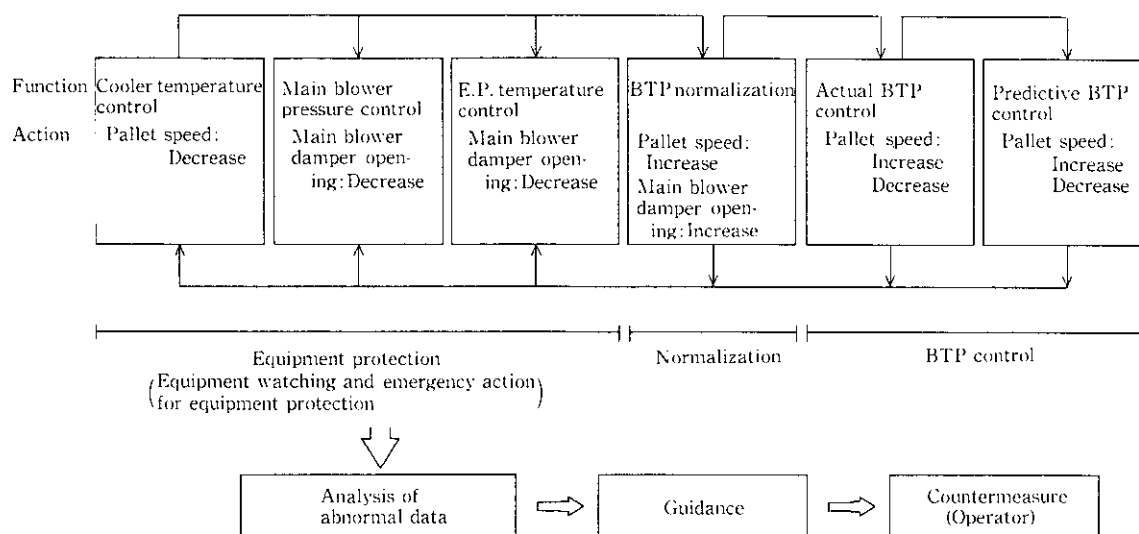


Fig. 4 Relation between equipment protection and BTP control

りが発生するのを防止するためである。さらにこの原因を分析してガイダンスする。長期予測値が上限未満の時は、短期予測値と実績 BTP から焼成状態を診断し、結果を 11 段階に区分し表示している。正常範囲以外の時はパレット速度変更のアクションを採っている。

3.2 設備管理機能

設備管理機能は、操業状態が設備の破損や焼損等を生じる管理限界を超えないようにプロセス値を監視し、それを超えた場合緊急処置を自動的に行うものであり、クーラー温度、EP 温度および主排風圧力等の管理項目がある、これらの項目は各々独立に 1 分周期で操業状態を診断し、管理値を超えたらパレット速度、主排風機ダンパー開度閉の緊急アクションを採っている。さらに異常原因を分析し推定結果をガイダンスする。オペレータが異常原因を除去すると、非定常 BTP 管理機能で、実績 BTP の状況に応じて主排風機ダンパーの開度とパレット速度を徐々に通常操業レベルまで回復させ、BTP 管理機能へ戻す。操業状況の変化と各管理機能の移行状態を Fig. 4 に示す。

3.3 生産管理機能

当所では高炉と焼結機が各々 3 基稼働している。生産管理機能は、目標生産率の決定機能と実績生産率を目標値に維持管理する機能に分けられる。Fig. 5 に生産管理機能の構成を示す。

3.3.1 目標生産率の決定

焼結機と高炉の関係を Fig. 6 に示す。両者の関係は必ずしも 1:1 ではなく、図はその対応の一例であり、焼結機と高炉間のコンベア上の焼結鉱をトラッキングして対応づけしている。高炉が操業状態の時、各焼結機の目標生産率は対応する高炉の使用予定量とバランスさせ、かつ高炉ホッパーの在庫量の過不足量を所定時間内に回復するように決定している。ただし、在庫過剰時は目標生産率増加を禁止、不足時は目標生産率減少を禁止し、さらに品質管理機能から品質悪化時に目標生産率の上限を制限している。対象高炉が休風の時は、高炉ホッパー在庫量が目標値に達するまで目標生産率を維持し、目標在庫量に達したら最小目標生産率とし、送り先変更や生産調整（焼結機停止）等の判断はオペレータに委ねている。

3.3.2 実績生産率の管理

前述の目標生産率に対し、実績生産率の過不足が発生すれば、減

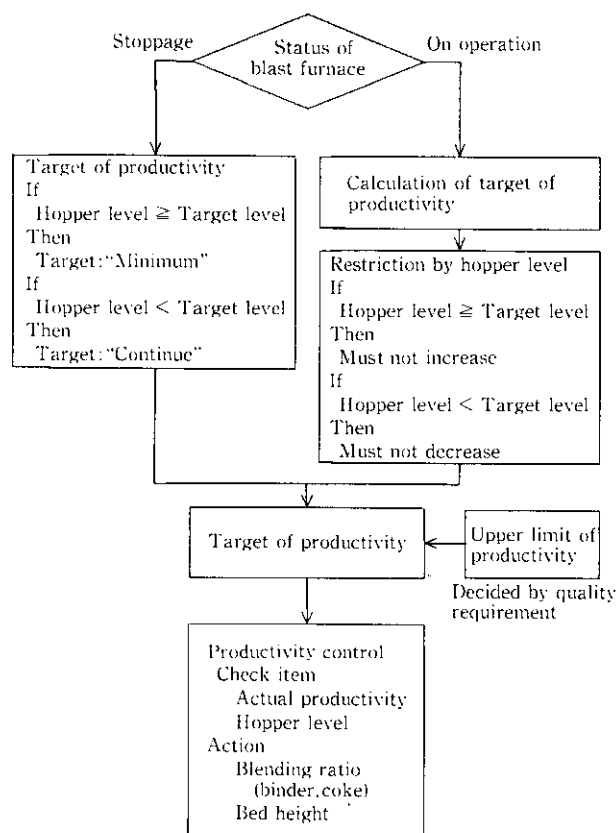


Fig. 5 General flow of sintered ore production control

産または増産のアクションを行う。ただし、3.3.1 と同様に高炉ホッパー在庫量が過剰または不足の時は、それぞれ増産アクション、減産アクションは禁止している。増産の時は、原料の通気性をよくするように生石灰等のバインダーの配合比を増加する。この結果原料の通気性がよくなり、焼成が早くなって、パレット速度が一定であれば、BTP は給鉱側に向かう。さらに BTP 管理機能は BTP を目標値に判別するため、パレット速度を増加し、増産となる。バインダーの配合比が上限で変更できない時は、原料層厚の下げアクションに置き換えて増産アクションを行っている。

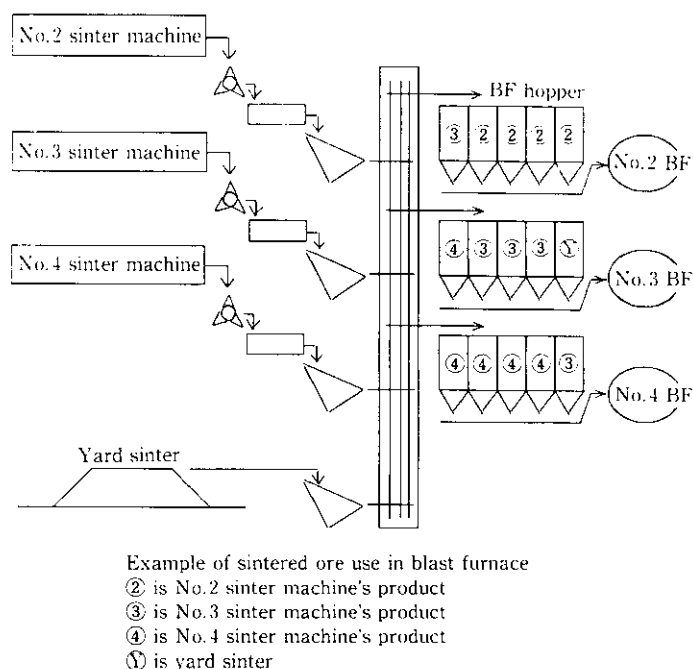


Fig. 6 Sinter product transport process

3.4 品質管理機能

品質管理する項目には、RDI、塩基度、強度、粉率(粒度)、返鉱発生率などがある。このうち、強度、粉率、返鉱発生率に関する機能について述べる。これら三つは、例えば強度が大きければ、粉率は小、返鉱発生率も小と相互に関連があるが、一律の関係でなく、それぞれ品質上の管理基準を持っている。Fig. 7 に品質管理機能のフロー図を示す。強度、粉率、返鉱の各項目ごとに、操業実績の現在値とこれに至る傾向を評価し仮アクションを定める。仮アクションの定め方は、「軽度の不良」の時は投入熱量の調整、すなわちコークスなどの炭材の配合比を増加し、逆に品質が回復し、さらに「軽度の良」となれば炭材の配合比を減らす。しかし、「重度の不良」の時は焼成時間を長くするため、目標生産率を下げる。その結果、生産管理機能と BTP 管理機能の働きによってバレット速度が減速され、十分な焼成時間が確保され、品質が回復する。さらに品質に余裕が出てくれば、回復状況に応じて徐々に目標生産率を元の状態

へ戻すようにしている。目標生産率の調整は Fig. 7 の生産管理機能の目標生産率の上限値の変更で行う。

3.5 学習機能

本システムにおいて、予測のための回帰係数、アクション量算出のためのアクション係数、状況判定のための判定基準値等、継続してチューニングすべきパラメータが多数あり、これらを学習機能により自動更新している。Fig. 8 に学習機能の概要を示す。

(1) 予測式の回帰係数

各種予測値を自己回帰または単回帰で求めており、これらの回帰係数を自動更新する。

(2) BTP 予測値の精度チェック (Fig. 8 の①)

予測誤差の σ を評価し、誤差が大きい時は、予測式の予測値は用いず、実績値の傾向から BTP を管理する。

(3) アクション係数 (Fig. 8 の②, ③)

アクション係数に補正係数 (通常 0.3~0.7 で任意に設定) を

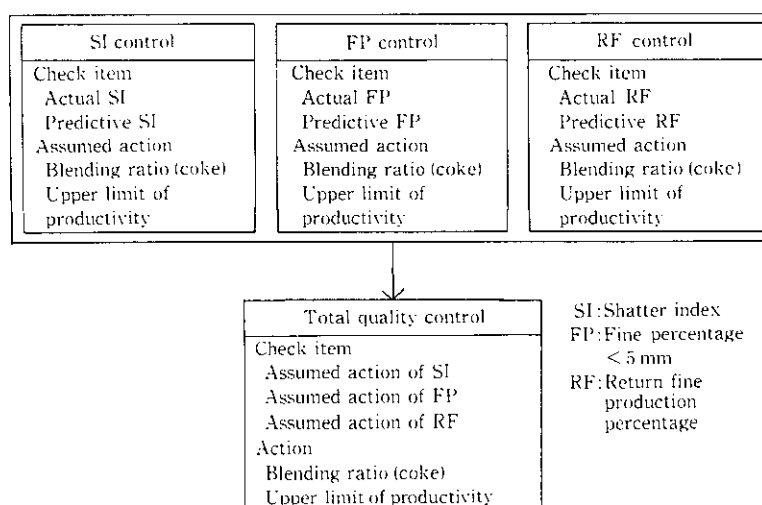


Fig. 7 General flow of quality control

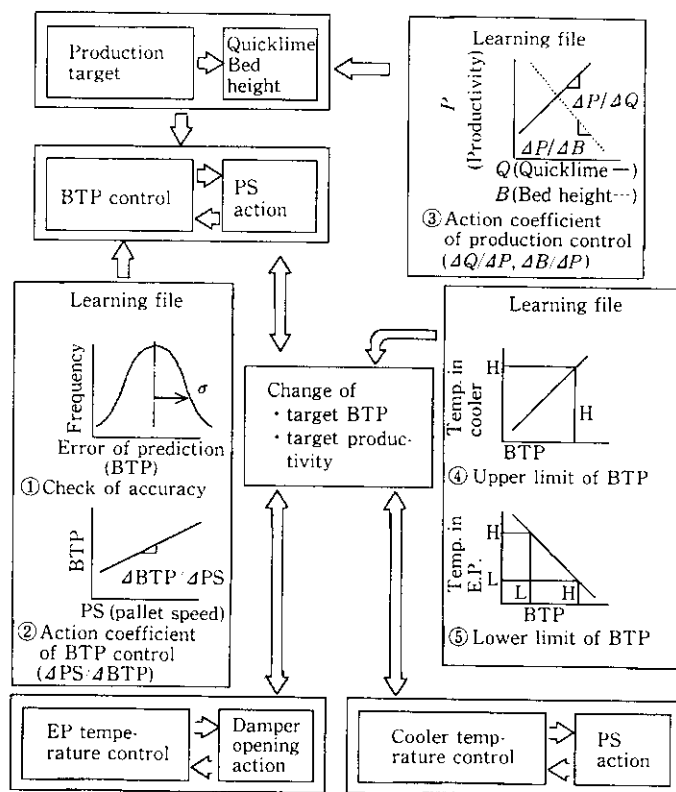


Fig. 8 Outline of learning of expert system

掛けて制御ゲインとしている。アクション係数は被制御変数と操作変数の単回帰の傾きの逆数から求めている。

(4) BTP の設備保護上の上下限值 (Fig. 8 の④, ⑤)

BTP とクーラー温度、EP 温度との単回帰を求め、クーラー温度上限、EP 温度上下限から、BTP の上限、下限値を求める。

(5) BTP の変化量判定基準

BTP の標準偏差を求め、BTP の変化状態の大小の判定基準としている。

4 エキスパートシステムの適用

上述した機能を実現するために診断型のエキスパートシステムを開発、適用した。エキスパート適用の理由、エキスパート使用ツールおよび知識ベースの抽出について説明する。

4.1 エキスパート適用の理由

従来の手続き型のみでソフト開発する場合、機能変更を行うには既設ソフトを理解する段階の開発負荷が大きく、開発効率が悪い上、理解不足に起因するトラブルが発生するケースもあった。これに対し、エキスパートシステムツールは平易な日本語表現であるため、既設ソフトの理解が容易である。さらにオンラインデータを使ったシミュレーション等によりデバッグが簡単にできるため、開発効率が高くなり、ソフトの品質が向上しトラブルの少ない開発ができる。焼結操業管理システムは、今後とも機能改善は不可欠であり、フォローがやりやすいエキスパートツールを適用した。

4.2 エキスパートツール

既設プロセス計算機はエキスパートツールを付加できないため、

エキスパートツール (EIXAX: 富士電機製) を備えた計算機を導入し、プロセス計算機とプロセスデータ、エキスパート制御指令を伝送する構成とした。

ソフト構成は、マクロ的、定性的な判断は知識型ルール約 500 ルール、ミクロ的な判断や数値計算は手続き型プログラム、約 11K ステップに分担し開発した。

4.3 知識ベースの抽出

熟練オペレータの実操業上のノウハウを、操業部門のエンジニアと KE (knowledge engineer) が共同でヒアリングし、機能の分析、設計を行った。特に非定常ケースの洗い出しに重点を置いた。

5 運用状況

以上の機能を水島製鉄所の第 3 および第 4 焼結工場に導入し、操業の安定化、焼結鉱品質の向上など十分な成果を発揮している。

5.1 エキスパート操業の例

エキスパート画面の一例を Photo 1 に示す。通常操業時、オペレータはこの画面で操業状況、アクション状況、生産率、品質状況を監視している。画面の左半分のトレンドグラフは BTP の実績値、予測値、パレット速度など BTP 制御状況を表している。右半分は、下部の表が直近のアクション履歴で、アクションの種類、状況、アクション量を表示し、中央が品質のヒストグラム、上部が生産判定と全機能の総合評価を示す。

5.2 操業の効果

Fig. 9 に当システム導入による BTP ばらつき量の低下の実績を示す。システム導入前は BTP のばらつき量の平均が約 7% であっ

Photo 1 Example of expert control display

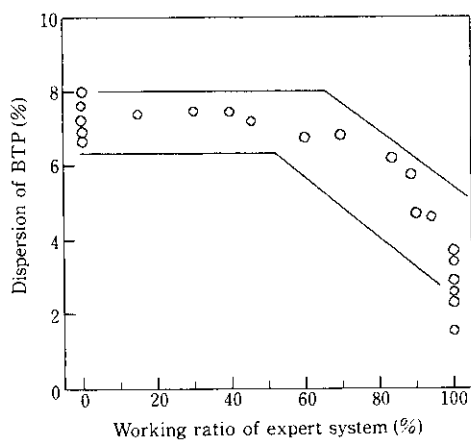
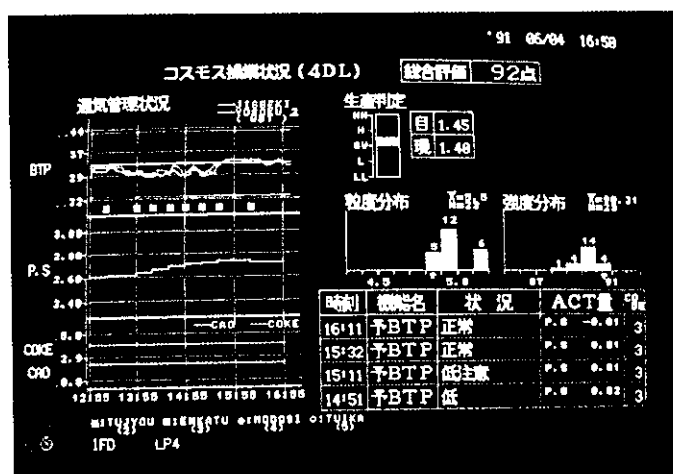


Fig. 9 Dispersion of BTP by expert system

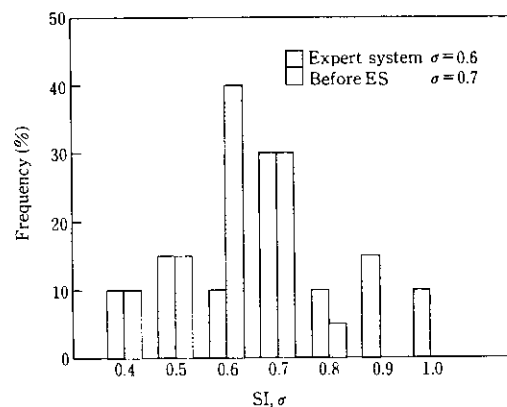


Fig. 11 Dispersion of shatter index by expert system

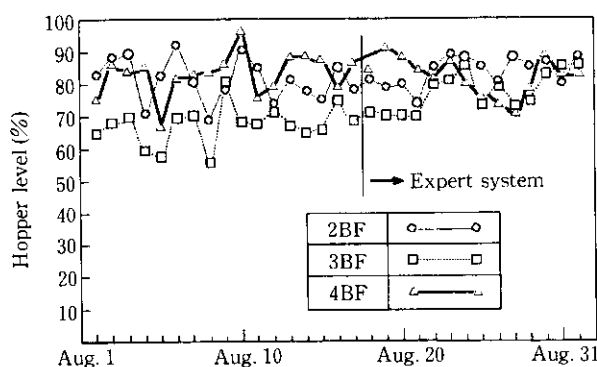


Fig. 10 Stabilization of BF hopper level by expert system

たが、導入後は約3%と所期の目標を達成した。BTP安定化に伴い、クーラー入口での焼結成品の温度を(コンベアを焼損しない範囲で)高温に安定に維持し、クーラーの排熱回収蒸気量が増加、安定し、さらに強度、粉率など品質面の安定化に寄与している。Fig. 10に焼結の次工程の各高炉の貯鉄槽内の焼結鉄の実績を示す。当システム導入後は各高炉とも高位に安定している。Fig. 11に焼

結鉄成品の品質管理項目の一つのシャッター強度のばらつきの実績を示す。導入後はばらつきが大幅に低減している。

6 結 言

今回、診断型エキスパートシステムを適用した焼結操業管理システムを開発導入し、1990年4月より順調に稼働している。

- (1) 診断型エキスパートシステムを採用し、オペレータのノウハウをベースに機能設計を行い、使いやすくまたフォロー、改善の容易なシステムを構築できた。
- (2) 焼結操業管理機能として、BTP管理、設備管理、生産管理および品質管理機能を取り込み、すべての機能を実用レベルで運用している。
- (3) 操業効果としてBTPのばらつきの低減($\sigma=7\%$ が3%)、シャッター強度のばらつきの低減($\sigma=0.7\%$ が0.6%)のほか、粉率の安定や高炉貯鉄槽レベルの高位安定化に大いに寄与している。

以上のとおり所期の目標を達成することができた。今後は1人のオペレータで一つの焼結機の運転を可能とするワンマンオペレーションの実現を図る予定である。

参 考 文 献

- 1) 牧 勇之輔, 高島暢宏, 小幡晃志, 飯田 修, 中島一磨, 沢田寿郎: 「製鉄プロセス制御へのファジィ理論の適用」, 川崎製鉄技報, 22 (1990) 3, 196
- 2) 飯田 修: 「統計的手法を用いた焼結自動操業システムの開発」, 第89回計測部会, 計 89-1-1 (1985), 私信