

技術報告

人工知能を応用した高炉操業管理エキスパートシステムの開発と適用

中島龍一*・炭竈隆志*・牧 章*・脇元一政*
橋本紘吉*・酒井 敦*・桜井雅昭*

Development and Application of Blast Furnace Operation Control Expert System Making Use of Artificial Intelligence

Ryuichi NAKAJIMA, Takashi SUMIGAMA, Akira MAKI, Kazumasa WAKIMOTO,
Kokichi HASHIMOTO, Atushi SAKAI and Masaaki SAKURAI

Synopsis :

A blast furnace operation control expert system (BAISYS) making use of artificial intelligence (AI) was developed and applied to the commercial operation of Fukuyama No. 5 blast furnace.

BAISYS gathers real-time information from numerous sensors installed on the blast furnace, and by using both this information and knowledge base in AI processor, which consists of knowledge and experience of operators and engineers (experts), inference and judgement concerning furnace condition are performed and the optimum action is indicated.

The abnormal furnace condition diagnosis expert system, one of the two sub-system in BAISYS, predicts the probability of channeling and slip every two minutes and provides the forecast and action. The furnace heat control expert system, the other sub-system which is designed to constantly control the furnace heat level represented by the hot metal temperature, executes inference every 20 minutes.

This system is very effective for the stable operation of blast furnace.

Key words : artificial intelligence ; expert system ; blast furnace ; process control.

1. 緒 言

最近の高炉操業は、溶銑、エネルギー需給の変化に即応しつつ、高品質溶銑の安定供給、原燃料品質仕様の見直し、炉体寿命の延長など、要求が多様化してきており、より高度な操業技術が求められている。

一方、高炉プロセスの自動化、システム化は早くから取り組まれ、最新のエレクトロニクス技術やセンシング技術が積極的に導入されてきた。そして、これらの技術の進歩とともに操業管理モデル¹⁾²⁾の開発が進められ、操業技術の向上に貢献してきた。しかし、高炉のオンライン制御に関しては実操業で十分に機能しているモデルは少なく、操業技術者やオペレーターの判断に委ねる部分が多く残っている。これは、高炉特有のさまざまな変動、外乱などの現象を数式モデルに組み込むことが難しいこと、従来の手続き型言語では、プログラムの保守、改造に対する柔軟性が乏しく新センサーの設置等により情報形態や情報量が変化した場合に、システムの精度の

維持、向上が困難であることによるものと思われる。

これらの問題を解決するため人工知能 (AI) の一分野であるエキスパートシステム (ES) によるオンライン操業管理システム (BAISYS: Blast furnace Artificial Intelligence SYStem) を開発し、2次福山5高炉 (昭和61年2月19日火入れ、内容積4664 m³) に適用した。

以下にシステムの概要と操業への適用結果について報告する。

2. エキスパートシステム導入の狙い

高炉は、短期的には出銑滓状況の変化、原料性状の変化、荷下がり状況の変化等、また長期的には炉体プロフィールの変化、装入物分布の変化等、常に何らかの外乱が生じており、またそれらの外乱やアクションに対する応答時間が遅いこと、過渡特性がその時々状況により異なることなどから、数式モデルの組立てによる操業管理システムのみでは必ずしも満足すべき動的制御が得

昭和62年3月13日受付 (Received Mar. 13, 1987)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K.K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

られているとはいいがたい。そのため、現状、安定な炉況を維持し原料や操業等の諸条件の変動に対応する上で、高炉操業技術者の経験的な知識がなお重要な役割を果たしている。

以上のような背景から、高炉操業管理へのエキスパートシステムの適用においては次の4点を大きな狙いとした。

- 1) 高炉操業技術の標準化と伝承
- 2) 高精度の操業管理システムの実現
- 3) 操業者の誤判断の防止
- 4) システムの頻繁な改造要求に対する柔軟な対応

3. システム構成と特徴

BAISYS は、異常炉況診断エキスパートシステムと炉熱制御エキスパートシステムの二つのサブシステムからなっている。

本システムでは、Fig. 1 に示すようにプロセスコンピュータ（制御系）と AI 専用プロセッサ（推論系）の各機能を有機的に結合しオンラインリアルタイム処理を実現している。すなわち、センサーデータの数値処理は制御系（言語：FORTRAN）で行い、推論はバックエンド型の AI 専用プロセッサにより LISP 言語を用いて実行している。このように、推論に必要な情報はオンラインリアルタイムで収集、加工され、推論開始時には

すべて準備されているものを「センサーベース型オンラインリアルタイムエキスパートシステム」と呼んでおり、本システムの特徴の一つである。

4. 異常炉況診断エキスパートシステム

異常炉況診断 ES は、高炉に設置されている多数のセンサー情報等をリアルタイムで自動的に収集し、これらの情報と知識ベースに蓄えられた高炉操業技術者の知識、経験を使用して、2 min 周期で吹き抜け・スリップの発生する度合いの推論を行い、オペレーターに予報としてガイダンスし、その度合いにより減風のアクションを指示するものである。

4.1 知識の表現

一般に、エキスパートシステムでは、現象の事実、学習、経験などにより得た知識を If (条件) Then (結論) でルール化して表す場合が多い。これは、プロダクションルールと呼ばれている。本システムでも以下の理由により、知識の表現にプロダクションルールを採用している。

- 1) 人間の思考過程との親和性があり知識の表現が容易である。
- 2) 状況認識-行動、あるいは前提条件-結論、の対であらわされるので、診断型問題解決システムに適している³⁾。

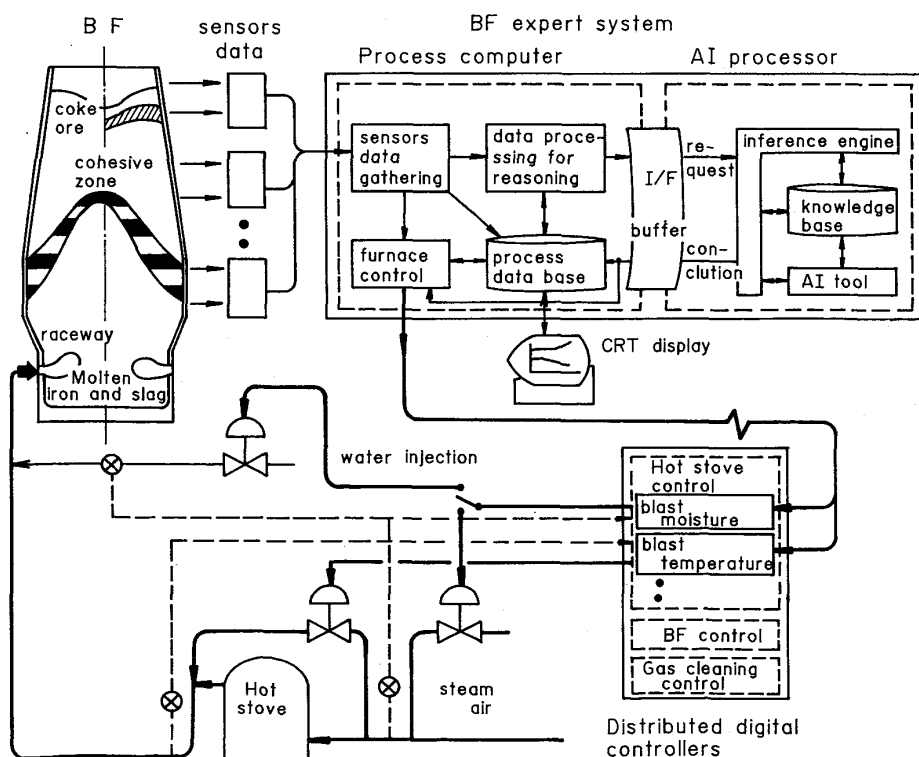


Fig. 1. System composition of BAISYS.

3)新しい知識を断片的に付加できるのでシステムとして段階的に成長することができる。

4.2 センサー情報の前処理

本システムでは、例えば If (荷下がり速度が設定したしきい値より遅い) ……というようなプロダクションルールの条件部の判定を行うためセンサーデータをプロセスコンピュータ側で2段階の前処理を行っている。

すなわち、今回使用した数百に及ぶセンサーデータは、外乱や原料の装入の影響などによる変動を伴っており、これを除去するために、一次処理として統計的手段(最小二乗法による一次回帰処理)を使つた平滑化を行っている。二次処理では一次処理の結果にもとづき、傾き、レベル、変動量、積分量などについておのおのの基準値(しきい値)との比較を行うことにより、炉況変化につながるセンサーデータの特徴を抽出している。

4.3 不確実な知識の取扱い

従来の工学において、不確実性は確率量によつて扱われてきたが、知識工学では、人間の思考過程の近似的実現を目指すことから、理論的裏付けはないが人間の感覚に適合する確実性指数が導入される場合が多い⁴⁾。本システムでも知識のあいまいさを表すために確信度(Certainty Factor; CF値)を導入した。

CF値は、+1～-1の範囲で設定することができ、その値の持つ意味は

- +1: 絶対的に正しい関係にある
- 0: 無関係の場合

1: 完全に否定される場合

である。総合したCF値の算出は(1)式で示すように、一つ前までのルールの累積確信度と今回ルールの確信度を結合関数⁵⁾により統合して行っている。

$$CF_i = \sum CF_i$$

$$= \sum CF_{i-1} + (1 - \sum CF_{i-1}) \cdot cf_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i はルールであり、 cf_i は i ルールの確信度、 CF_i は総合CF値を示す。CF値の調整方法は、現在決定的な方法は確立されておらず各システムで最適な方法を設計する必要がある。本システムでは、テストシステムを用いて、火入れ前は福山2高炉のデータ、火入れ後は蓄積された過去のデータにより決定した。

4.4 知識ベースの構成

異常炉況診断ESにおける知識ベースの構成をFig. 2に示す。知識ベースは約200のプロダクションルールからなり、それらは機能、センサーの属性により知識源(Knowledge Source: KS)ごとに集合、ユニット化し、さらに階層化構造としている。

知識ベースは、センサー情報から直接的に吹き抜け・スリップを判定するKS群と、吹き抜け・スリップに大きな影響を与える残銑滓の状態を判定するKS群などから構成されている。

センサーより吹き抜け・スリップを判定するグループでは、内部の知識源を「荷下がり」、「温度」などのセンサーの属性ごとに分割している。また、残銑滓判定KS群では、センサーデータ判断KS群と人間判断KS群

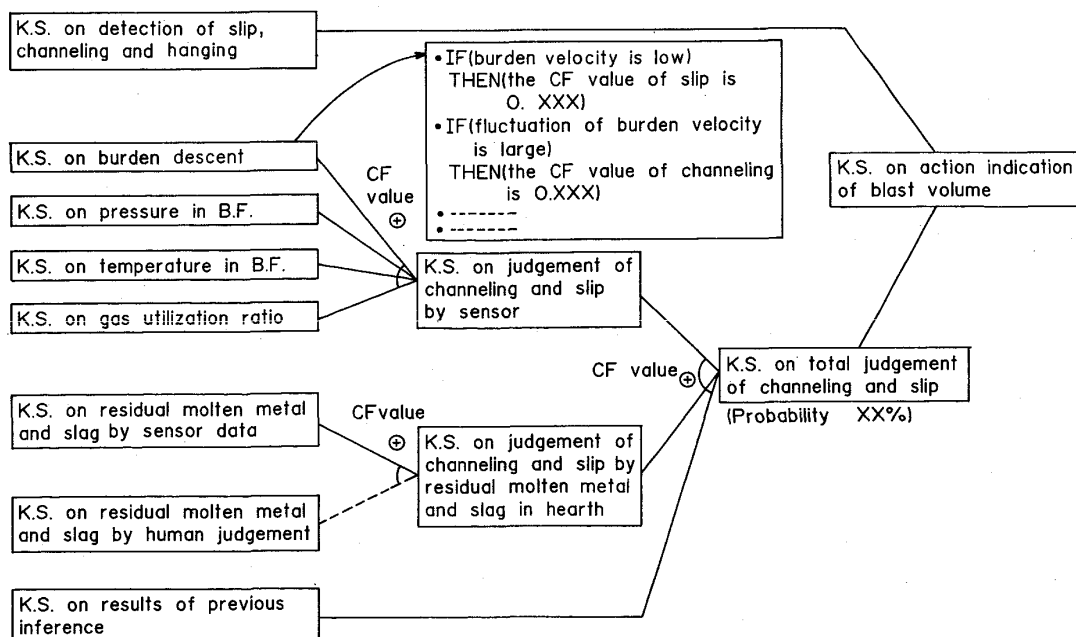


Fig. 2. Composition of knowledge base of abnormal furnace condition diagnosis expert system.

とに分割している。ここで人間判断 KS 群は、現状、センサーのみでは不十分な炉内残銑滓貯留状況の把握を人間判断により補填するもので、センサー情報より炉内に残銑滓が発生したと判定した場合のみ起動し、対話形式で入力することにより炉況の推論精度の向上を図っている。

異常発生検出ルールは、吹き抜け・スリップ・棚吊りを検知するためのものである。

次に推論過程について概略説明する。

まず、二次処理したセンサーデータ値がしきい値を超えていればプロダクションルールの条件部が“真”と判定され CF 値が設定される。これらの CF 値が各センサーごとに前述の(1)式により累積加算され最終的にスリップ、吹き抜けの発生予知確率を求めている。

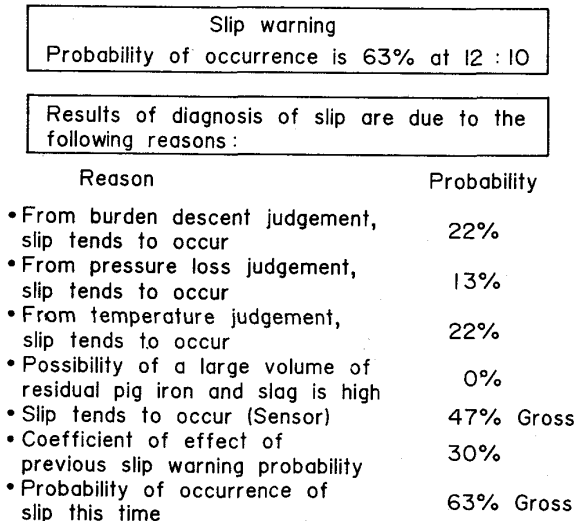


Fig. 3. Example of guidance on slip warning.

次に、この予知確率に基づいてアクション指示 KS により減風（量）等の取るべきアクションを決定する。

なお、スリップと吹き抜け予知に対するルールの基本構成は同一であるが CF 値を変えて対応している。

4.5 ガイダンス機能

推論結果として、2 min ごとに吹き抜け、スリップの総合 CF 値を CRT に表示するとともに、CF 値がある値以上になった場合、オペレーターにスピークモニターでガイダンスする。また、推論の経緯説明の表示と各種中間推論結果の推移図を表示できる。これにより異常炉況の理由、場所等が診断結果としてオペレーターに告知できるようになっている。それらの表示例を Fig. 3 に示す。

4.6 適用結果

異常炉況予知に対する操業アクションとしては、現状吹き抜け発生予知確率 (CF^c_i) のランクにより減風基準を次のように設定している。

$CF^c_i = 60 \sim 80\% \Rightarrow$ 送風流量 $-300 \text{ Nm}^3/\text{min}$

$CF^c_i = 80\% \text{ 以上} \Rightarrow$ 送風流量 $-500 \text{ Nm}^3/\text{min}$

Fig. 4 は本システムの判定により減風し、炉況異常を回避した例である。吹き抜け確信度が 60% を超えたため減風 $300 \text{ Nm}^3/\text{min}$ を行い、その結果、スリップは生じたが吹き抜けには至らなかった。その後、吹き抜け、スリップ CF 値の低下に合わせ増風し定常状態に回復したものである。

Fig. 5 は、スリップに関する発生予知確率 (CF^s_i) と実際の発生率の関係を示したものであるが、 CF^s_i が 60% 以上では 70% 以上の確率で実際にスリップが発生していることがわかる。なお、スリップ実発生率は、30 min ごとに CF^s_i の最大値を代表値として 10% きざみ

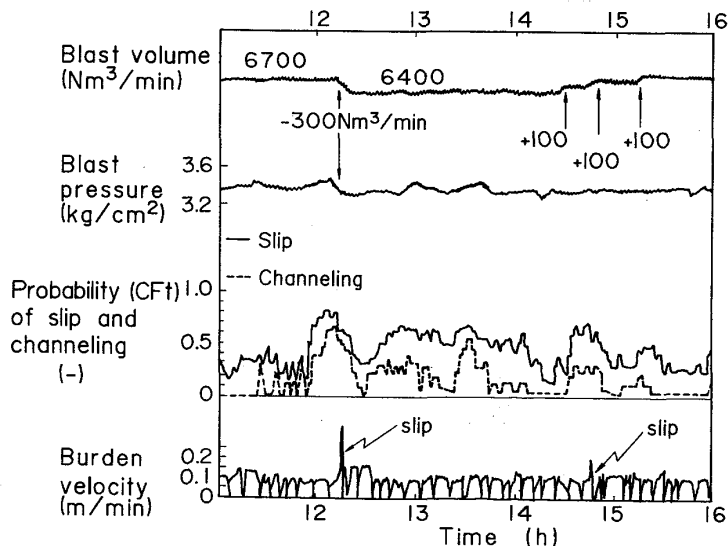


Fig. 4. Example of the operation by abnormal furnace condition diagnosis expert system.

ごとに各 CF レベルに割り振りデータ採取期間内の各 CF レベルの出現回数 (N) と各 CF レベル内のスリップ発生回数 (F) との比 (F/N) で表したものである。

このように、本システムの異常炉況予知に対する信頼性は高く評価できることが示された。

なお、これらの判定結果 (CF_i) は炉況指数として炉

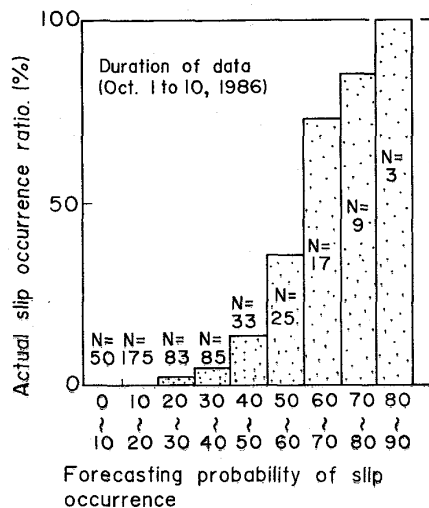


Fig. 5. Relation between the forecasting probability and the actual occurrence ratio for slip.

況の安定度も表しており長期的な炉況判断にも役立つている。

5. 炉熱制御エキスパートシステム

高炉操業管理上溶銑温度で代表される炉熱を一定状態に管理することは、溶銑の安定供給、熱的効率の上昇、高品質溶銑の生産などを行う上で最も重要である。これを目的に開発された炉熱制御 ES では、20 min ごとに推論を行い必要なアクションを決定している。

5.1 知識ベースの構成と推論プロセス

本システムの知識ベース構成を Fig. 6 に示す。知識の表現の大部分は、異常炉況診断 ES と同様プロダクションルールを用いているが、一部フレームと LISP 関数も使用している。それらのルール数は約 550 である。

フレームには、推論の材料となる定数値や、炉熱の推論結果から導かれる操作量などの事実型の知識が格納されている。また、LISP 関数は後述するあいまいさの表現となる CF 値の算出や、各種の計算など手続き型知識を記述している。

これらの知識ベースの内容を推論プロセスにそつて以下に述べる。

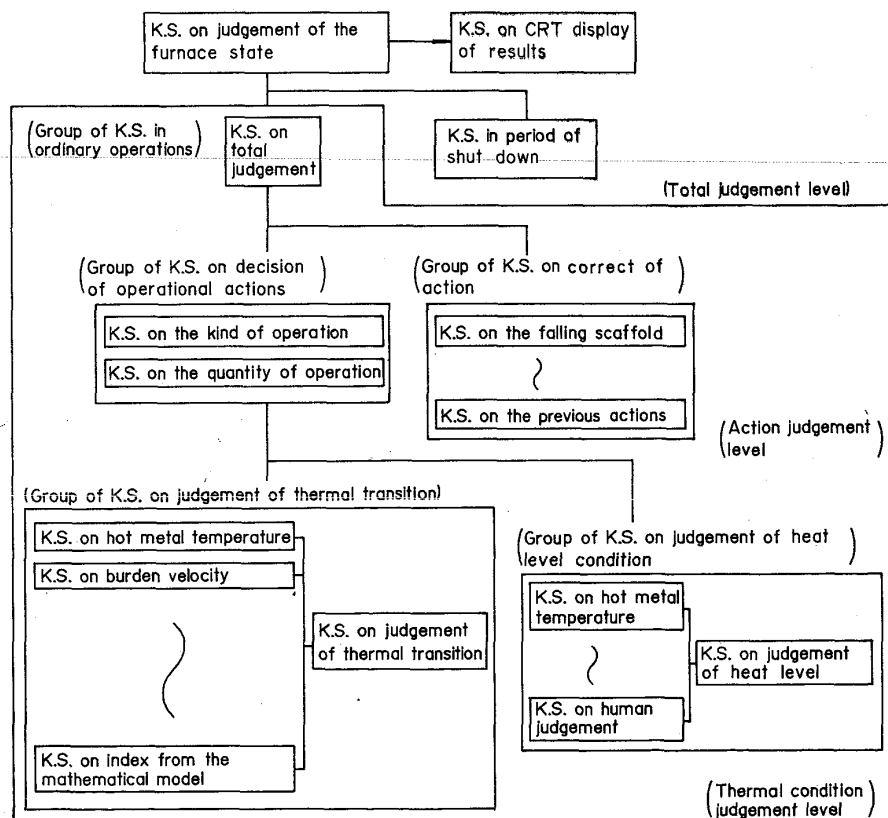


Fig. 6. Composition of knowledge base of furnace heat control expert system.

1) 炉熱レベル判定 KS

推論開始時刻における炉熱の状態を判定する知識ベースである。

「溶銑温度」、「送風圧力」、「羽口埋込み温度」など、センサーの属性、機能に分割された KS 群からなっており、各 KS 群ごとに高～低レベルまで7段階に分けられた炉熱レベルに対し、次項で述べる方法で CF 値分布を求め、最大確信度のレベルを現時刻の炉熱レベルとしている。また、炉熱レベルが極度に低いと判定した場合は、羽口状況、出銑状況などを任意の時刻に対話形式で入力し、センサー関係ルールで得られない情報を取りこむことができる人間判断ルールを有している。

なお、その他残銑滓貯留、溶銑成分、出銑口間温度偏差、出銑形態などさまざまな条件に対応できる知識ベースで構成している。

2) 炉熱推移判定 KS

炉熱推移を、過去から現在に至る変化の度合いにより、急上昇～一定～急降下の間で5段階にわけ各ランクごとに確信度をもとめ、その最大の値を示す段階を現時刻の炉熱推移状態とする。

知識ベースは、「溶銑温度」をはじめとした各種センサー類と、「溶銑成分」などから構成されており、また、「溶銑温度」と「溶銑成分」については、さらに「短期推移」および「長期推移」にわけてルール化している。

3) アクション判定 KS

現時刻の炉熱状態を炉熱推移と炉熱レベルを軸としたマトリックス上で求め、とるべきアクションを決定する。Photo. 1 は、その例を示す。本例では CF 値の頂点が、レベル=5、推移=3、にあり対応するアクションはC型であることを示している。なお、マトリックス上の各

位置のアクション型および、アクション量は、あらかじめフレームに知識として格納されている。

4) アクション補正量判定 KS

過去にとられたアクションあるいは外乱の判定をするとともに、それらの現時刻における影響量を考慮して補正アクション量を決定する。その内容は、送風湿度、送風温度、液体燃料、コークス比などの操作量変更、およびコークス水分、付着物脱落等の外乱などを検知して対応するルールなどから構成されている。

例えば、送風湿度を変更した場合、その変更時刻と変更量は「操作量変更検知」ルールで自動的に検出され、その後の影響量は「送風湿度」ルールにより時間の関数として考慮される。また、炉壁付着物の脱落時には、「壁落ち」ルールにより自動的に脱落箇所と炉熱への影響量および羽口先降下時間が判定され、予備アクションの操作時刻と操作量が決定され補正計算に組み込まれる。

5) アクション指示 KS

1)～4)の判定結果と操業方針に基づいて取るべきアクション量をオペレーターに指示し、ガイダンスすると同時に制御装置にフィードバックし完全自動制御を行うことが可能である。(Fig. 1 参照)

5.2 Fuzzy 集合理論の導入

知識のあいまいさを表す手法として、異常炉況診断システムでは CF 値を採用したが、本システムでは、さらに、CF 値の決定方法にして、Fuzzy 集合の考え方⁶⁾を応用した3次元拡張メンバーシップ関数を導入した。

この理由は、メンバーシップ関数を導入しない通常のプロダクションルールにおいて、関係するすべてのセンサーに対して、例えば、①If (センサー i の温度が $T_1 \sim T_2$ の範囲である。) Then (高熱レベルである CF 値

SBF ACTION TABLE FOR HEAT LEVEL CONTROL 1984-10-01 04:17

ACTION	TRANSITION						
	1	2	3	4	5	6	7
1	A2	A1	A0	B0	C		
2	B2	B1	B0	C	D0		
3	B0	C	C	D0	D1		
4	C	C	D0	D1	D2		
5	D0	D1	E0	E1	E2		
6	E0	E1	F0	F1	F2		
7	F1	F2	G0	G1	G2		

Available Action
ACTION FACTOR
1 2 3 4 5 6 7
A B C D E F G
NO ACTION

Photo. 1. Display of action table.

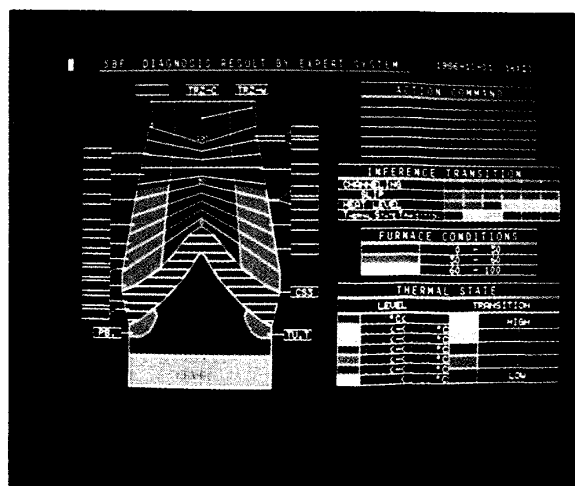
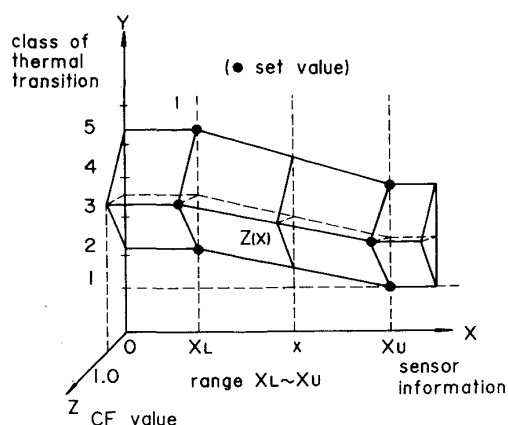


Photo. 2. Display of diagnosis results.



Class	Description
5	Steep ascent
4	Ascent
3	Leveling
2	Descent
1	Steep descent

Fig. 7. Example of membership function for thermal transition.

は C_1), …… (低熱レベルである CF 値は C_n); ② If (センサー i の温度が $T_2 \sim T_3$ の範囲である.) Then (高熱レベルの CF 値は C'_1), …… (低熱レベルの CF 値は C'_n); ③ …… とルールを表現していくと膨大なルール数となり、推論時間が増大しかつ、 CF 値の調整が極めて複雑になる欠点があると判断したためである。

Fig. 7 は、ある一つのセンサー情報に対する炉熱推移のメンバーシップ関数を示したものである。図中 (・) は、この関数の境界条件として与える入力値である。

$X \sim Z$ は、

X 軸：一次処理データ (例えばソリューションロスカーボン量)

Y 軸：炉熱推移状況 (変化の程度を 1～5 段階に区別)

Z 軸：確信度 (CF 値)

を意味する。ここでは、あるセンサーの値が X 軸上 x の時、Fig. 7 内に示す Y 軸上の各段階 ($j=1 \sim 5$) に対する確信度 $Z_j(X)$ が求まることを表している。このようにして各情報ごとに確信度分布を求めた後、センサーごとに重み付けをして累積加算し、推移総合確信度分布を決定する。

炉熱レベルについても同様にして各段階 ($i=1 \sim 7$) のレベル総合確信度分布を求める。このようにしてアクションマトリックス上の各位置の炉熱総合確信度を求め、前述したようにその最大値位置を現在の炉熱状況とする。なお、溶銑温度については、通常、出銑開始より時間の経過とともに上昇し、やがて定常状態に達して炉熱を代表する値になる。そこで、遷移過程では溶銑温度

をそのまま使用すると誤った推論結果を導くおそれがある。従つて、溶銑温度が定常状態か遷移状態かを判定し、その状態に対応したメンバーシップ関数を与えている。すなわち、あらかじめ出銑開始からの任意の時間における溶銑温度とそのタッ内最高温度の関係を統計的手法を用いて解析し、遷移状態においても適切な炉熱レベルの判定ができるようにしている。

このように CF 値の決定に拡張メンバーシップ関数を導入した結果、ルール数の膨張を防ぎ推論実行時間の短縮とシステムメンテナンスの容易化を実現できた。

5.3 ガイダンス機能

20 min ごとに、推論結果と最終アクション指示が CRT に表示される。なお、自動制御運転時において、アクション変更される場合には、オペレーターへアナンシェータで注意を喚起する。

また、オペレーターの要求により、推論経緯の説明や中間推論結果などの表示も可能である。Photo. 2 は BAISYS の総合判定表示例を示す。

5.4 実操業への適用

システムを実操業へ適用するにあたり、次の手順により進めた。

- 1) シミュレーション (昭和 61 年 5 月～)
- 2) オペレーションガイド (昭和 61 年 9 月～)
- 3) オンライン自動制御試験 (昭和 62 年 1 月～)
- 4) 全自動制御の実用化 (昭和 62 年 3 月～)

1) シミュレーション

ここでは、まずオペレーターが適切にアクションを行っている期間の操業データを用いて、オペレーターと同様な判定を示すように、テストシステムを用いて確信度、メンバーシップ関数、およびアクション操作量を決定した。次に、オペレーターの誤判断により炉熱の異常低下や異常着熱を生じた時の操業データにより判定の信頼性を確認し、必要に応じてルールの追加を行つた。

2) オペレーションガイド

この期間では、実際にオペレーターへガイダンスを行いつつアクション補正、指示量の調整等を実施し信頼性の向上を図つた。

3) オンライン自動制御試験

シミュレーションおよび、オペレーションガイドの結果、本システムの判断に有効性が認められたので、62 年 1 月より自動制御化の試験として、本システムの指示による、マニュアル制御を実施した。試験期間中の本システムの適用率は 97% 以上であり、完全自動化が可能であると判断した。ここで、適用率の定義は以下のとおりである。

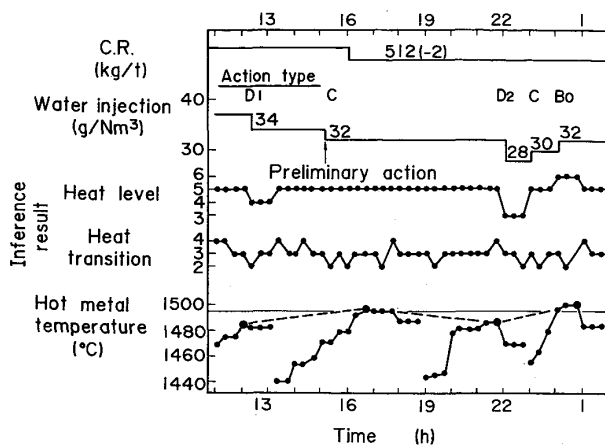


Fig. 8. Example of full automatic control of furnace heat by BAISYS.

適用率(%)=

$$\frac{(\text{BAISYSの指示による実施回数})}{(\text{BAISYSの指示回数})} \times 100$$

4) 全自動制御の実施

Fig. 8 に吹込み水比制御による自動制御実施後の操業例を示す。たとえばアクション D_1 は、炉熱レベルの低下(レベル=4, 推移=3)によるものである。15 h のアクションは、現時刻ではC型(ノーアクション)であるが、16 h のコークス比-2 kg/t に対する予備アクションを考慮して取られたものである。

6. 結 言

福山5高炉において、人工知能を応用した高炉操業管理エキスパートシステム(BAISYS)を開発し実操業に適用した。

本システムは、異常炉況診断ESと炉熱制御ESの二つのサブシステムから成り、その特徴は、

1) センサーベースのオンライン・リアルタイム型エキスパートシステムである。

2) 知識の表現はプロダクションルールを基本としており、知識ベースのユニット化、階層化により、ルール変更、追加の柔軟性、推論実行の効率化を実現している。

3) 知識による判定のあいまいさを確信度で表現することにより、効率的な知識ベースの作成と、システム全体の精度向上が可能となつている。なお、炉熱制御ESでは、CF値の決定にFuzzy集合の考え方に基づく拡張したメンバーシップ関数を導入している。

本システムによる判定結果は非常に良好で異常炉況を高い精度で事前に予知し、回避することができることが明らかになった。また、炉熱制御についてもシステム適用率97%以上を達成し、オンライン自動制御を実用化した。

これらの結果、次の効果が達成または期待されている。

- 1) 操業管理の標準化
- 2) 人間の誤判断の防止
- 3) 温度、成分変動の少ない高品質溶鉄の次工程への安定供給
- 4) 炉冷の回避
- 5) 省力化

文 献

- 1) 例えば、羽田野道春、的場祥行、大塚宏一、芳木通泰、宮本俊光: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 528 など
- 2) 岡部俊児、福武 剛、高橋博保、河合隆成、岩村忠昭、崎村 博: 川崎製鉄技報, 11 (1979), p. 34
- 3) P. H. WINSTON 著、長尾 誠、白井嘉明訳: 人工知能 (1985), p. 147 [培風館]
- 4) 石塚 溝: 計測と制御, 29 (1984), p. 774
- 5) E. H. SHORTLIFFE: Computer-based medical consultations (1976) [MYCIN. Now York, American Elsevier]
- 6) L. A. ZADEH: "Fuzzy Sets" Information and Control 8 (1965)