
高炉操業に対する AI 技術の適用

Application of AI Technique to Blast Furnace Operation

飯田 修(Osamu Iida) 谷吉 修一(Syuichi Taniyoshi) 上谷 年男(Toshio Uetani)
沢田 寿郎(Toshiro Sawada) 橋本 正広(Masahiro Hashimoto) 斧田 大介(Daisuke
Onoda)

要旨：

水島製鉄所第3高炉では、最新鋭の運転制御システムを活用することによって、AI技術を適用した数多くの機能を実現している。その代表的なものとしては、操業ガイダンスと炉熱の自動制御を行うエキスパートシステムである高炉操業管理システム、ファジィ制御を用いた熱風炉燃焼制御システムとホッパーからの原料排出速度制御、計画型エキスパートシステムである貯鋳槽配置計画、リアルタイムエキスパートシステムを用いた水砕脱水槽分配制御がある。これらは高炉操業の自動化、効率化に大きく貢献している。

Synopsis：

In No.3 blast furnace of Mizushima Works, several functions applying AI (artificial intelligence) techniques were realized, utilizing the thoroughly re-modernized plant control system. The representative AI-applied functions are blast furnace operation expert system, which diagnoses blast furnace condition and controls furnace heat, hot stove heat control with the fuzzy theory, planning of material hopper arrangement which is a planning type expert system, distribution control of granulated slag which is a control type expert system in real-time, and feed speed control of material with the fuzzy theory. These functions have greatly contributed to the achievement of highly automated and efficient operation of the furnace.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Application of AI Technique to Blast Furnace Operation



飯田 修
Osamu Iida

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長補)



谷吉 修一
Syuichi Taniyoshi

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長補)



上谷 年男
Toshio Uetani

水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 主任部員(掛長)



沢田 寿郎
Toshiro Sawada

水島製鉄所 製鉄部製
鉄課 主任部員(課長
補)



橋本 正広
Masahiro Hashimoto

川鉄鉱業(株) 水島製
造部粒鉄原料課 掛長



芥田 大介
Daisuke Onoda

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室

1 緒 言

水島製鉄所の製鉄部門では、人工知能(AI)技術の工業分野への応用が開始された当初よりその有用性に着目し、種々の問題に対し積極的な適用を進めてきた。これらの中には、高炉における操業管理システム(診断型エキスパートシステム)¹⁻⁴⁾や原料炭配合計画(計画型エキスパートシステム)⁵⁾のようにすでに実用化され、大きな成果を上げているものも多い。

1990年6月に第3次の火入れを行った水島製鉄所第3高炉では、これまでのAI技術応用の成果をベースとして、高炉操業のさまざまな分野に対してAI技術の適用を行った。本論文では、水島第3高炉に適用した内容を中心に、当社の高炉におけるAI技術について報告する。

2 高炉操業の特徴とAI技術の有用性

高炉は鉄鉱石を還元熔融し、銑鉄を生産するプラントであり、Fig. 1に示すように還元熔融反応が行われる高炉本体、高炉内へ

要旨

水島製鉄所第3高炉では、最新鋭の運転制御システムを活用することによって、AI技術を適用した数多くの機能を実現している。その代表的なものとして、操業ガイダンスと炉熱の自動制御を行うエキスパートシステムである高炉操業管理システム、ファジィ制御を用いた熱風炉燃焼制御システムとホッパーからの原料排出速度制御、計画型エキスパートシステムである貯鉱槽配置計画、リアルタイムエキスパートシステムを用いた水砕脱水槽分配制御がある。これらは高炉操業の自動化、効率化に大きく貢献している。

Synopsis:

In No. 3 blast furnace of Mizushima Works, several functions applying AI (artificial intelligence) techniques were realized, utilizing the thoroughly re-modernized plant control system. The representative AI-applied functions are blast furnace operation expert system, which diagnoses blast furnace condition and controls furnace heat, hot stove heat control with the fuzzy theory, planning of material hopper arrangement which is a planning type expert system, distribution control of granulated slag which is a control type expert system in real-time, and feed speed control of material with the fuzzy theory. These functions have greatly contributed to the achievement of highly automated and efficient operation of the furnace.

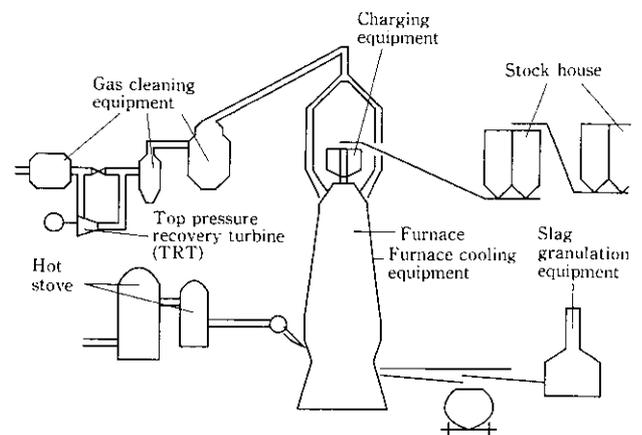


Fig. 1 Schematic diagram of blast furnace

送風する空気を加熱する熱風炉、銑鉄の原料となる鉄鉱石、コークス等を切り出し、高炉内へ装入する原料装入設備、高炉の副産物である水砕スラグを製造する水砕製造設備などの複数のサブ設備から構成されている。

高炉の操業では、これらの各設備を使用して鉄鉱石およびコークスから銑鉄を作りだしているわけであるが、取り扱っている対象が粒状の固体(鉱石、コークス)、液体(銑鉄)および気体(空気、高

* 平成3年5月27日原稿受付

炉ガス)と三様であるうえに、これらが複雑な反応挙動をするため、プロセスの動きを理論的に表現することは非常に難しい。さらにプロセスが大規模かつ高温高压であるため、プロセス特性を表す物理量を測定し、それに基づいた制御理論によるモデルを組み立てることも困難である。そのため、その操作は経験に頼って行われている面が強く、高炉本体のみならず、熱風炉や原料装入設備の操作においても、物理モデルや制御理論を用いたプロセス制御モデルの適用は立ち遅れていた。

しかし、近年の AI 技術の進展に伴って、従来からオペレータの経験と勘に依って動かされてきた高炉設備こそ、知的制御手法ともいえる AI 技術の最適な応用対象であるという認識がなされ、高炉本体の操作ガイダンスシステムを中心として、エキスパートシステムやファジィ理論などの AI 技術の適用が試みられてきた。当社においても、1988年の高炉操作管理システムの開発を手始めに、いくつかの AI 技術を応用したシステムを開発してその有用性を確認してきた。

これらの成果を踏まえて、水島製鉄所第3高炉の3次改修では、全面的にリフレッシュした最新鋭の運転制御システムを最大限に活用して、既存の AI システムのレベルアップを行うとともに、AI 技術の適用対象を計画問題やリアルタイムの制御問題にまで拡大し、高炉操作のより一層の自動化・高度化を試みた。

3 第3高炉運転制御システムの構成

第3高炉の運転制御システムの構成を Fig. 2 に示す。本システムは、電気計装制御装置 (PLC, DCS), プロセス計算機および中央計算機の3階層で構成されており、電気計装制御の一体化 (EI 統合) とフル CRT オペレーションを実現したシステムである。下位の PLC と DCS はプラントの運転・監視、プロセス計算機は操業管理、中央計算機は操業の計画・解析という機能分担になっており、プロセス制御機能は、PLC, DCS およびプロセス計算機が行っている。エキスパートシステム、ファジィ制御などの AI 技術を応用した機能は、プロセス計算機および PLC システムの一部である専用マイコンで実現しており、AI 技術を適用する対象と目的に応じて、使用するハードウェア、使用する AI ツールを使い分けている。

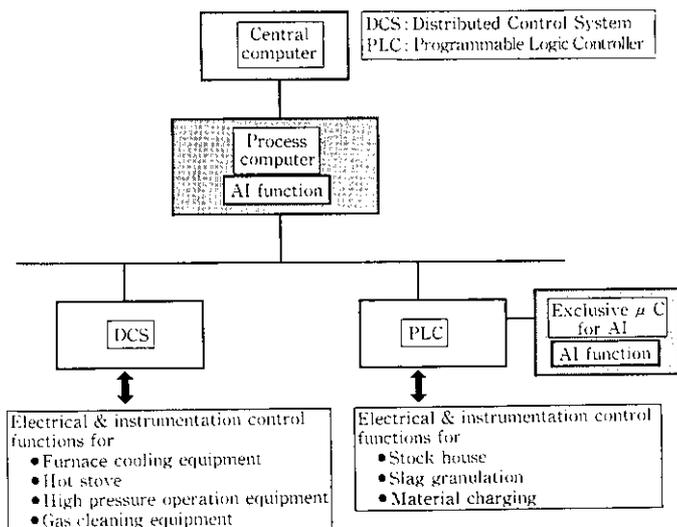


Fig. 2 Configuration of the control system for No. 3 blast furnace

4 高炉における AI 技術の適用事例

水島第3高炉では Fig. 3 に示すような AI 技術を適用したさまざまな機能を実現している。ここでは、診断型エキスパートシステムである「高炉操作管理システム」、計画型エキスパートシステムである「貯鉱槽槽配置計画」、リアルタイム制御型エキスパートシステムである「水砕脱水槽分配制御」、およびファジィ推論を用いた「熱風炉燃焼制御」、「ホッパーからの原料排出速度制御」について報告する。

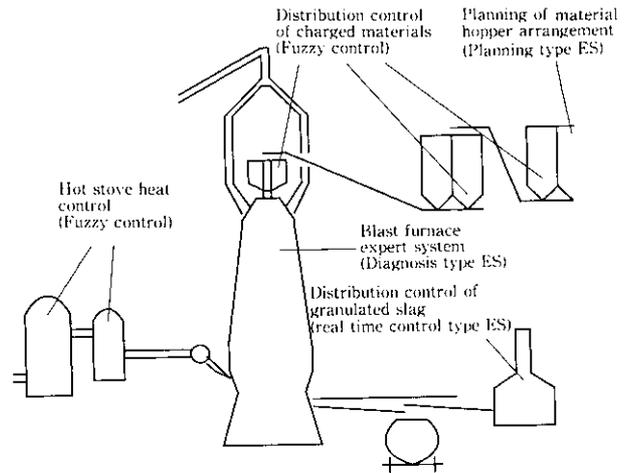


Fig. 3 Functions applied to No. 3 blast furnace with AI technique

4.1 高炉操作管理システム

高炉操作管理システムとは、多数のプロセス情報から高炉の操業状態を診断し、その診断結果とともに必要となる操業アクションをオペレータに対してガイダンスするシステムである。高炉の操業状態を診断するシステムは、エキスパートシステムを適用するのにふさわしい対象であり、すでに述べたように鉄鋼各社が競ってその導入を図ってきた⁸⁻⁹⁾。当社においても、1988年4月より水島第4高炉へ導入したのを皮切りに、以後第2高炉、第3高炉と適用の対象を拡大してきた。ここでは主として第3高炉の高炉操作管理システムについて述べる。

高炉操作管理システムの機能は、プロセスの状態を示す多数の(第3高炉の場合約250)計測データや指数から、高炉内部で生じている現象を推定・診断し、その現象に対処するための適切なアクション方法とアクション量を決定することである。高炉で生じる現象には大きな時定数を持って変化するもの(高炉内の熱的状态一炉熱一や出鉄のバランスなど)と突発的に変化するもの(送風圧力の急変動など)がある。そのため本システムでは、Fig. 4 および 5 に示すように診断のための知識ベースを前者に対応した定周期の診断を行う「定常知識ベース」と後者に対応する知識を記述した「非定常知識ベース」の二つに分けている。定常知識ベースには前者の診断に関する知識がプロダクションルールの形で記述されており、判断する現象に対応した23通りの個別のルール群に分割されている。さらにこれらのルール群はエキスパートの思考過程を反映させる形で「状況把握」、「現象認定」および「アクション決定」の三つのルール群に分かれている。これらの個別の現象に対するルール群から

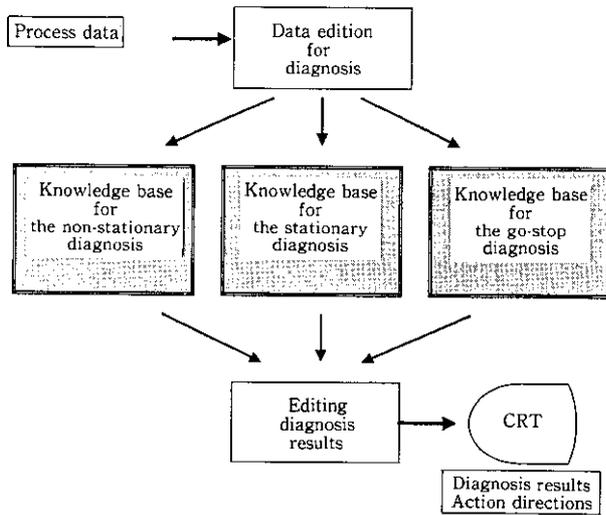


Fig. 4 Configuration of the knowledge base in the blast furnace expert system

Table 1 Scale of the knowledge base

Name	Number of production rules	Number of knowledge frames	Execution timing
Knowledge base for the stationary diagnosis	508	50	Every 5 min, 15 min, and 1 day (different from rule groups)
Knowledge base for the non stationary diagnosis	50	5	Executed by events
Knowledge base for the go-stop diagnosis	37	1	Every 15 min

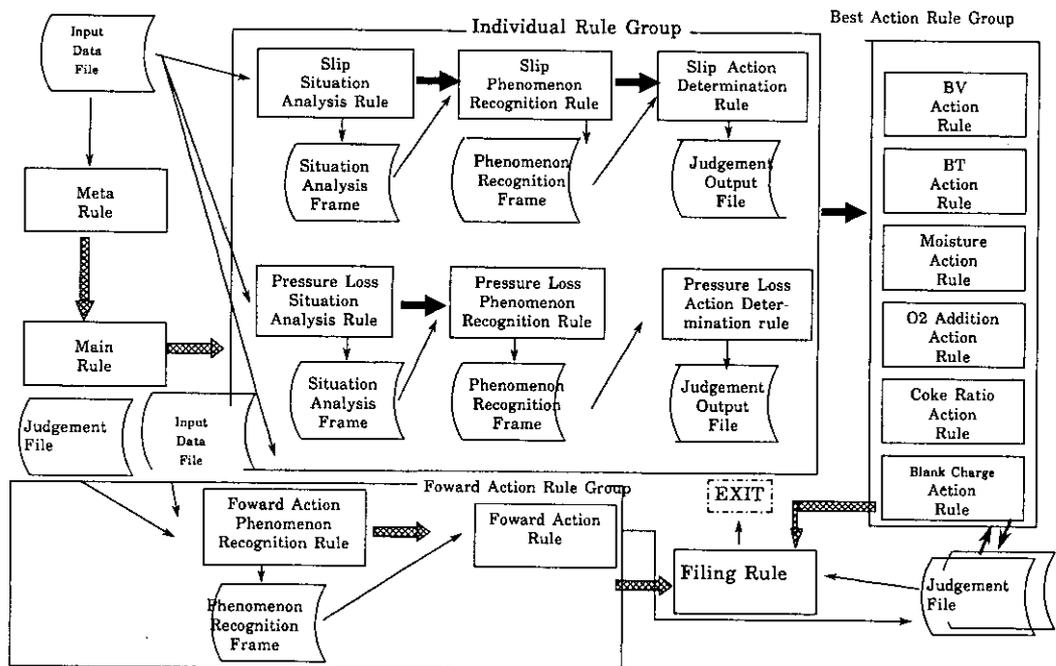


Fig. 5 Configuration of the rule groups

導き出された診断結果は、「最適アクション決定ルール群」および「戻しアクション決定ルール群」により最終判断が行われ、オペレータに対してガイダンスされる診断結果とアクションが決定される。本システムのアクション項目は、送風流量、送風温度、送風湿度、コークス比、富化酸素量およびブランクチャージ（コークスのみの装入）の六つである。各ルール群間の知識の受け渡しは、フレームを介して行われる。

非定常知識ベースは突発的な現象に起因するプロセスデータ変化が発生した時に起動され、定常知識ベースと同様に診断結果とアクションを出力する。それぞれの知識ベースの規模を Table 1 に示す。

知識ベースからの出力は、CRT とボイスアナランシェータによってオペレータにガイダンスされるが、単に推論の結果を示すだけでなく、その結果に至った理由も説明される。この説明機能は、結果を得るためにたどったルールをトレースバックすることによって実現している。Fig. 6 に出力の一例を示す。

第3高炉のシステムでは、これらの知識ベース以外に、従来の

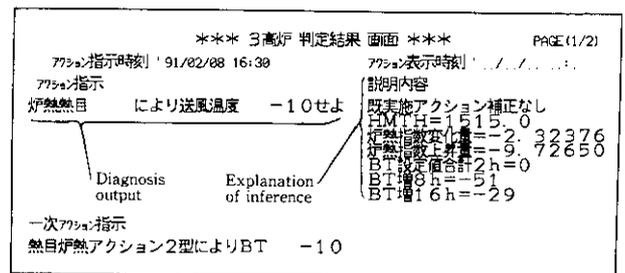


Fig. 6 An example of diagnosis output and explanation of inference flow from the blast furnace expert system

GO-STOP システムに相当する緊急避難的な知識を記述した「GO-STOP 知識ベース」を追加しており、高炉の状態が急激に変化した場合の対応度を向上させている。

本システムのようなガイダンス型の診断システムの場合、その出力をいったんオペレータが解釈し、指示どおりアクションを実行するかどうかの判断を下す。そのためどうしてもオペレータの個性や

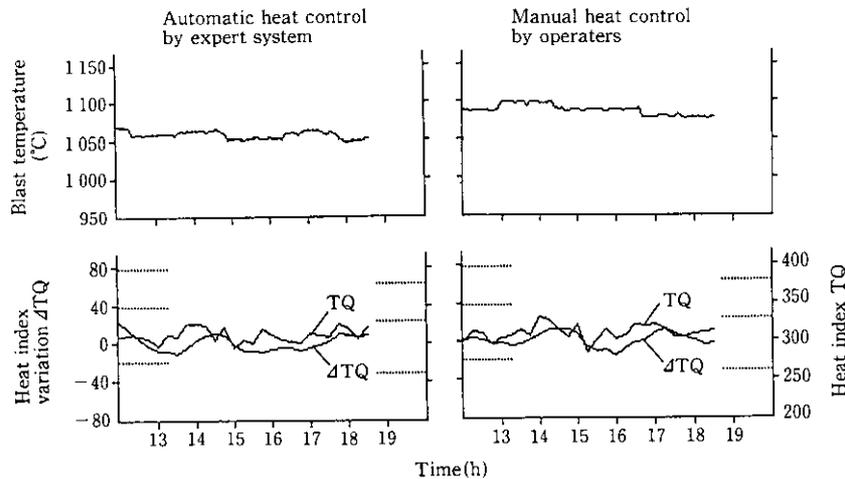


Fig. 7 Results of the automatic blast furnace heat control

Table 2 Comparison of the blast furnace expert systems

	System for No. 2 and No. 4 BFs	System for No. 3 BF
Hard wear	Use an exclusive computer for a backend processor of the AI function	Practice the AI function on a process computer
Functions of an expert shell	Production rules Knowledge frames Meta rules View notes	Production rules Knowledge frames Equation bases
Number of production rules*1	671	506 (Except GO-STOP rules)
Number of knowledge frames*2	150	50
Inference time	About 30 sec	6~8 sec

*1 The configuration of rule groups is slightly different between the two systems.

*2 Number of knowledge frames in the No. 2 and 4 BF system is more than one in the No. 3 BF system because the former system has all data in knowledge frames.

技量の差が入ってしまい、システムの指示どおりアクションが実行されず、その機能が十分発揮されない場合がある。そのため第3高炉のシステムでは、定常操業における炉熱のアクションに限って、システムからの送風温度変更の指示を自動的に実行する炉熱の閉ループ自動制御を行っている。Fig. 7 にエキスパートシステムによる自動炉熱制御とオペレータによる操業の比較を示す。

炉熱の状態を示す炉熱指数 (TQ) および炉熱指数変化 (ΔTQ) の自動制御の場合の変動は、オペレータによる操業の場合と比べて何ら遜色はなく、本システムによる炉熱自動制御が十分機能していることがわかる。

第3高炉のシステムは他の高炉のシステムとは、使用している計算機、エキスパートシェルともに異なっている。しかし本システムは基本的にプロダクションルールをベースにしたものであり、スタンダードな機能を有するシェルであれば知識構造をほとんど変えなくても記述することができ、非常に移植性の良いものとなっている。Table 2 に第3高炉と第2および第4高炉のシステムの比較を示す。

4.2 熱風炉燃焼制御システム

熱風炉は Fig. 8 に示すような巨大なバッチ式の熱交換器であり、高炉へ送風するための熱風を作り出す設備である。熱風炉燃焼制御の目的は、所定温度の送風量を確保するために必要となる熱量を最高の熱効率で熱風炉に投入することであるが、同時に熱風炉内の珪石レンガの温度を設備保護のために一定の範囲に保つ必要がある。このような要求を満たす操業条件は、理論的には入出熱量の計算から求めることができる。しかし現実には、炉ごとの通過風量などの熱風炉の特性を示す量が測定できず、操業状態を正確に把握することが難しいため、モデルの適用は十分な成果を上げていない。これに対して、熟練したオペレータは、熱風炉の熱的状態 (熱付) をある種のプロセスデータから推定して良好な操業を行っている。そのため最近では物理モデルに代わって、オペレータの操業ノウハウをファジールールの型で表現した制御モデルが、千葉製鉄所第6高炉をはじめ、いくつかの高炉で適用され始めている^{10,11)}。

第3高炉で適用した熱風炉燃焼制御システムは、Fig. 9 に示すように、熱収支計算を用いた物理モデルとファジィ推論を用いたファジィエキスパートシステムから成るハイブリッド型の制御システム

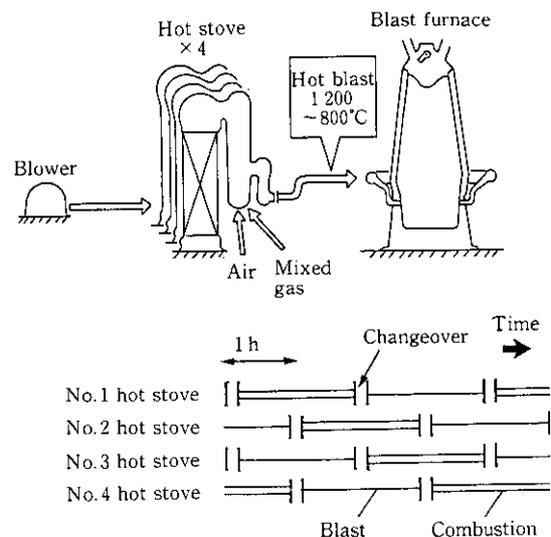


Fig. 8 Outline of hot stoves

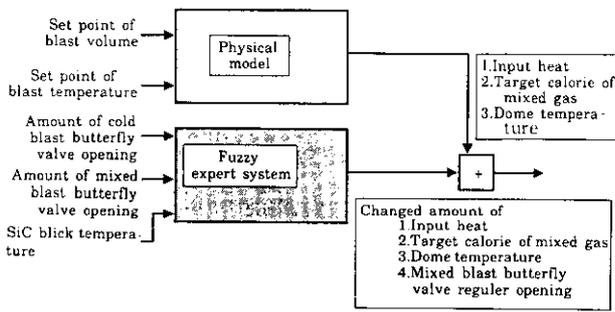


Fig. 9 Configuration of the hot stove heat control

ムである。ファジールールはオペレータのノウハウを記述したものであるが、操業ノウハウが各製鉄所ごとに微妙に異なっているため、千葉第6高炉のルールとはかなり異なっている。

物理モデルは、操業条件が変化して、送風流量、送風温度の設定が大きく変わった場合に起動され、熱効率が最良で操業コストが最低となる熱風炉の操業条件が算出される。このモデルによって、炉ごとの必要投入熱量、目標Mガスカロリーおよびドーム温度の各設定値が与えられる。

熱風炉の特性が物理モデルのとおりであれば、モデルから得られた操業条件どおりに操業を行えば最適な結果が得られるはずであるが、特性の変化や外乱によって操業状態は変わってしまう。ファジィ推理による制御モデルは、このような状態変化に対応するために、各炉が送風を終了して燃焼を開始する前に起動され、炉の熱付とレンガの温度をチェックして、最適な操業状態を維持するための操業条件修正を行う。本制御モデルのファジールールの構成を Fig. 10 に示す。本モデルは2種類のファジィ群から構成されており、多段推論を行う形式になっている。1段目のファジールール群では、Fig. 11 に示すように炉が1基送風となった時（切替時）の混合冷風バタフライ弁の開度と、送風終了直前の冷風バタフライ弁の開度を入力として、炉の熱付状態を評価する指数を求めている。熱風炉の操業では二つの炉が同時に送風（または燃焼）となるパラレル操業を行っているため、弁開度には二つの炉の熱付状態が合成された

形で現われる。本ルール群は単独の炉の熱付状態を判断する必要があるため、弁開度の情報は四つ入力し、判断すべき炉の熱付状態を推定するルールを組んでいる。

なおルールを分かりやすくするために、出力ファジィ変数を確定値とした菅野の簡略化法¹²⁾によるファジィ演算を行っている。

2段目のファジールール群では、1段目の推論によって求めた熱付評価指数と対象炉の送風終了時のレンガ温度、およびその温度の過去3回のサイクルでの変化量を入力として、必要となる操業アクションの変更量をファジィ推論により求めている。このルール群から出力されるアクション項目は投入熱量、目標Mガスカロリー、ドーム温度の各変更量、および2基送風時の混合冷風バタフライ弁規

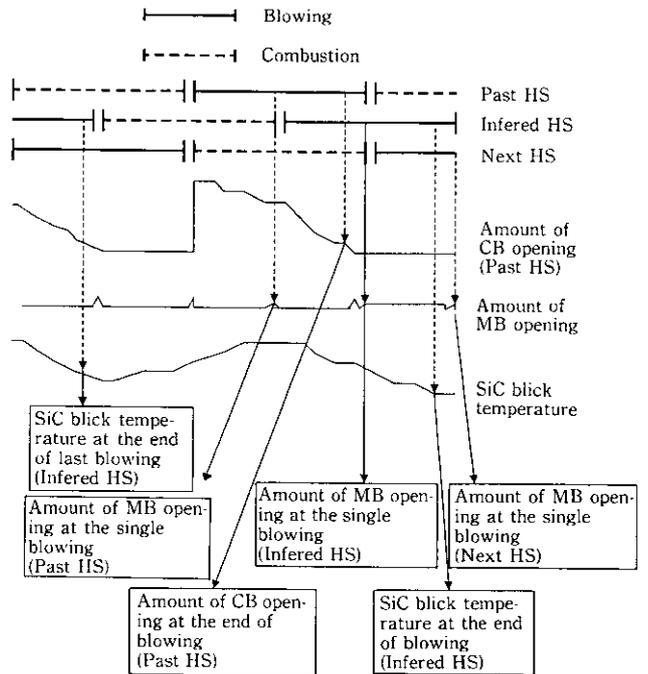
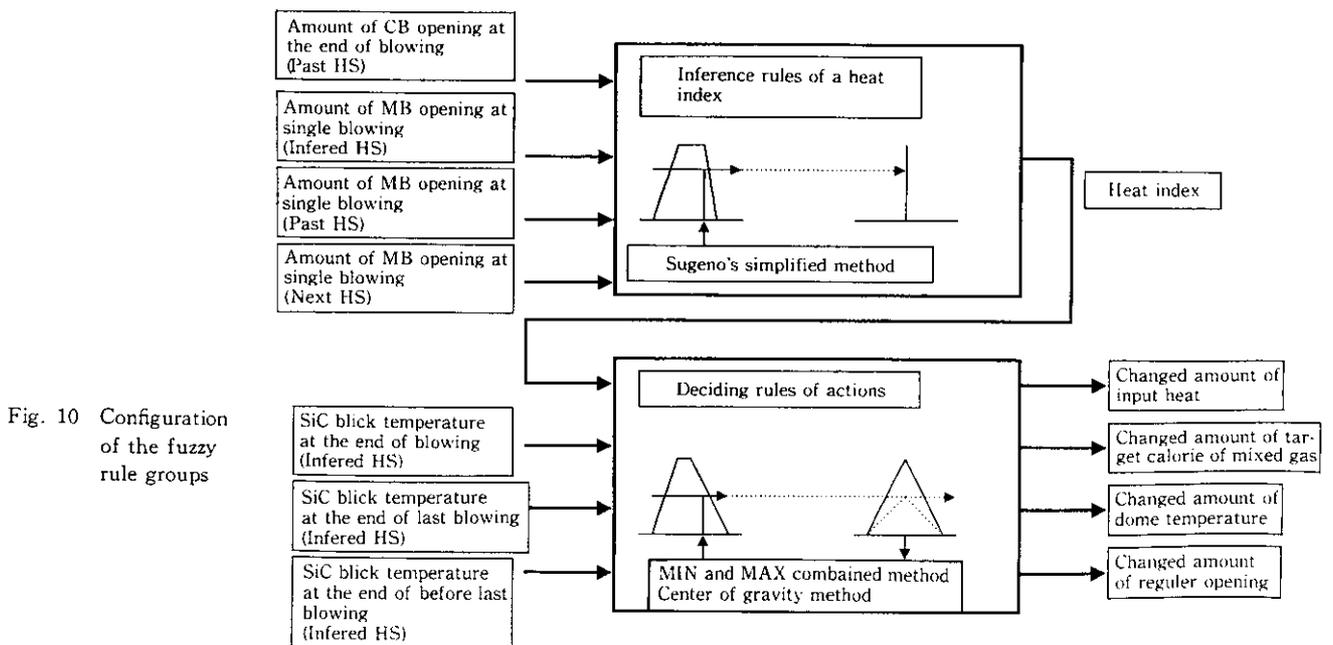


Fig. 11 Input data for the inference



CB:Cold blast butterfly valve
MB:Mixed blast butterfly valve

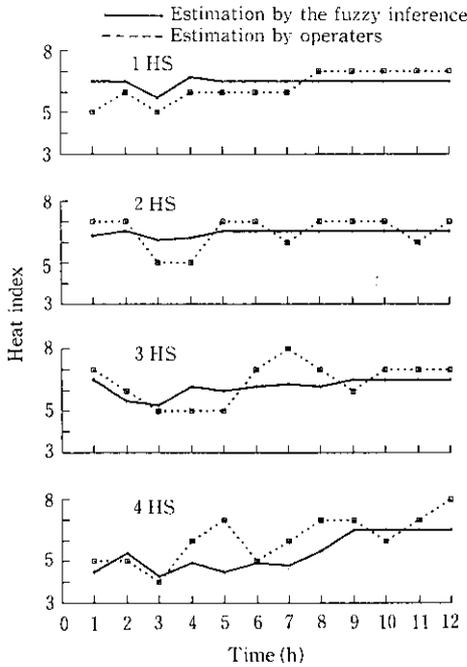


Fig. 12 Estimation of the fuzzy inference

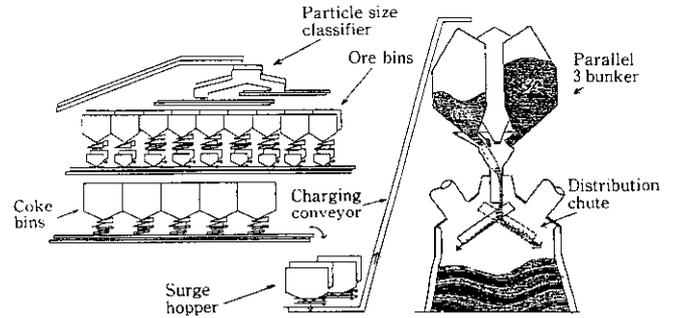


Fig. 13 Process flow of material charge

Table 3 Comparison of the productivity to make "the planning of material hopper arrangement" by use of expert shell and procedure-oriented language

Language	Process computer	Central computer
	Expert shell (AIMAX-C)	COBOL
Number of program steps	4 612	5 124
Productivity (step/man-month)	1 749	557

定開度の変更量である。ここでは出力変数もファジィ集合であり、MIN-MAX 合成および重心法により確定値を求めている。

Fig. 12 にファジィルールにより求めた熟付評価指数とオペレータによる評価の比較およびファジィルールによるアクション変更量とオペレータによる実際の変更量の比較を示す。両者はよく対応しており、ノウハウが十分反映されたルールとなっている。

4.3 貯鉄槽配置計画

高炉へ装入される原料には、焼結鉄や生鉄、ペレット、さらに副原料である石灰石などの成分や粒度の異なるものが数十種類存在する。これは高炉設備の一つである貯鉄槽にストックされており、槽の下部に設けられた計量装置で計量された後、コンベアによって高炉へ装入される。第3高炉の場合、Fig. 13 に示すように貯鉄槽は2系統、10槽ずつあり、計量装置の計量能力はそれぞれ異なっている。槽内への鉄石の装入は、槽上に設けられたシャトルリバース・コンベアによって行われるが、第3高炉の場合、鉄石を細粒と粗粒に分級して別々の槽に入れるための設備が槽上に設けられている。ただし分級した鉄石を装入できる槽は特定の槽に限定される。

貯鉄槽配置計画とは、高炉に対して与えられる「ある銘柄の鉄石を1回当たり $\times \times$ ton 高炉に装入せよ」という装入指示に基づいて、各槽の計量能力や装入制限を逸脱することなく、指示された量の鉄石を切り出すために、どの貯鉄槽をどの銘柄の鉄石用を使用すればよいかを決定する問題である。従来は、オペレータの判断によって決めていたが、分級設備の設置により考慮すべき条件が多くなってきたため、プロセス計算機によって自動的に計画できるようにした。計画問題としては比較的単純なものであり、通常の手続き型言語で機能構築することも可能ではあるが、構築の容易さ、修正のしやすさを考慮して、高炉操作管理システムで使用しているエキスパートシェルを用いて、プロダクションルールによる計画型エキスパートシステムとして構築した。全く同様の機能が操業設計のために中央計算機にも入っており、これは COBOL で記述されている。Table 3 に両者の比較を示すが、エキスパートシェルを用いて

指令票NO: 96314100 槽指定確定: 0

+	NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
+	銘柄名	L-S-L	30L04	30L04	30L04	PSC92	30L04	AL-PL	SS	B-A14	
系	コードNO	64113	73103	13043	13043	17923	13043	46023	19013	20143	
	粒度 装入	0 0	0 1	0 2	0 2	0 0	0 1	2 0	0 0	0 0	0 0
	NO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
II	銘柄名	SF-MN	30L04	30L04	30L04	PSC92	30L04	NB-PL	SS	B-A14	
系	コードNO	62443	00009	13043	13043	13043	17923	13043	46043	19013	20143
	粒度 装入	0 0	0 1	0 2	0 2	0 2	0 0	0 2	0 0	0 0	0 0

--- Hopper number
 --- Charged material name
 --- Charged material code

Fig. 14 Output image of the planning of material hopper arrangement

作成した本システムの方がソフト生産性の上ではるかに優れており、エキスパートシェルが特定の問題に対して、ソフト生産性を向上させるツールとなりうることをよく示している。

本機能は、中央計算機から送信される装入指示命令を基にしてバッチ的に起動される。装入指示に含まれる銘柄ごとの切出量以外の制約条件はすべてシステム内に持っているため、特にデータをオペレータがインプットすることなく、自動的に配置計画が作成され、非常に特異なケースについてのみオペレータが介入する。Fig. 14 に計画作成の例を示す。

4.4 水砕脱水槽分配制御

水砕プロセスは、鉄の副産物としての水砕スラグを製造する高炉の付帯設備である。本プロセスの特徴を以下に述べる。溶鉄と分離した熔融スラグは、圧力水により細粒化・急冷され、攪拌槽へ流入し水砕スラグになる。水砕スラグは水砕ポンプでスラリー輸送し脱水槽に選択装入する。また同時に自動品質判定装置により、色相、地金混入量の品質判定がオンラインで実行される。この後、水砕スラグは、脱水槽下部に設置されたスクリーンにて一定時間捕捉、かつ全量濾過脱水し、払出弁より専用ダンパーへ積み込み、

出荷ヤードへ運搬する。

本プロセスにおいて、操業上、最も重要なオペレーション判断を要求されるのが上記の脱水槽の選択装入の部分である。ここでは4基の脱水槽の効率的運用と水砕スラグの製品品質の確保を図るために、水砕スラグを装入する側の属性と、水砕スラグを受け入れる側の属性に基づいて即座に判定を下さなければならない。前者の属性としては、熔融スラグの量、時間、品質などの推移予測であり、後者の属性としては、脱水槽状況、脱水予測、払い出し予測、品質等級、量(水砕、水)、水バランス、タッパー脱水槽間情報、および制御条件としての操業パターン・モード、分配弁状況、出滓速度演算状況等の多量の情報である。

今回、上述の脱水槽分配制御を目的とした実時間制御型・事象駆動型のエキスパートシステムを開発した。本システムにより前述の効率的運用と品質確保だけでなく、高炉本体のオペレーションを含めたワンマン化を達成した。

本システムの機能構成を Fig. 15 に示す。水砕プロセス本来の制御を実行する PLC、AI 専用コントローラ、ソフトウェア開発環境用としてのパソコン、およびそれらをつなぐ高速シリアル伝送装置にて構成されている。PLC は制御駆動型のプログラム言語に基づく固定的なシーケンス・PID 制御による高速自動制御に徹し、このループの外側で認識→推論→実行の柔軟なループを形成するのが AI コントローラである。認識のベースとなる情報および実行結果は、高速シリアル伝送装置を介して PLC と結ばれている。この構成により実時間制御はもとより、システム運用の柔軟性と開発期間の短縮を図った。

この AI コントローラは、IF—THEN 形のプロダクションルールに基づく、前向き推論を高速に実行する制御モジュールである。32 ビット、10 MIPS の高速 CPU プロセッサをベースに作成されたハードウェア上で、ルール記述言語 PSL で記述されたプログラムを実行する。

推論は水砕プロセスの運転状況に応じて、大きくは以下の四つの構成となっている。

- (1) 全自動指令で出滓を開始する時の判定。
- (2) 受け入れ中の槽の水もしくは水砕が満量状態となり、いずれかの槽を代替としなければならない時の判定。
- (3) 定常状態であっても、将来を予想して複数槽選択を判断する。
- (4) 次回出滓時の選択槽を予約する。

上記推論結果は、おのおの槽選択指令あるいは予想表示として出力され実行される。

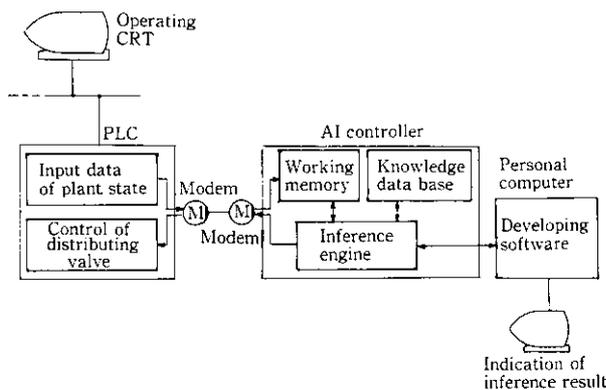


Fig. 15 Function block diagram

本システムのその他の特徴を以下に示す。

- (1) 各ルールおよび各属性には調整係数を設けて、判定、推論の重みづけを調整する仕組みとしている。約3箇月間のオペレータの手動運転と本システムとの並行操業の過程にて、この係数の調整によりオペレータ判定との一致性を図り、実運用を開始した。
- (2) 本システムのトータルルール数は、約170あり、1制御サイクルは約13秒で、実用上問題のない、リアルタイム性を得ている。

4.5 ホッパーからの原料排出速度制御 (粒体ファジィ制御)

原料・装入プロセスは、高炉炉内へ鉱石、コークスといった粒状原料を供給するハンドリング設備である。本プロセスでは、高炉炉内へ安定に正確に原料をダンプさせるために、銘柄、スケジュール、時間、位置、速度といった管理が重要な制御要素となり、総じて装入物分布制御という。そのプロセスフローを Fig. 13 に示す。今回の3次改修においては、さらに粒度別装入、ベルレス方式、パラレル炉頂3パンカ等の新プロセスを導入している。これらは粒体の偏折をコントロールすることを主目的としており、粒体を対象とした高度な制御技術が要求される。

今回、ファジィ制御を貯鉱槽からの払出し、サージホッパーからの排出、および炉頂パンカからの装入の3箇所に適用した。それらに共通して制御目標値は排出速度であり、制御手段はゲート開度のみである。排出速度とゲート開度とは、ほぼ線形の関係にあるが、その他に銘柄、槽の個性、粒度、水分、原料重量といったパラメータがあいまいに影響し合い、さらに面倒なことにこれらの事象の生起に時間的な規則性がない。制御として粒径値および水分値をもってフィードフォワードする手法も考えられるが、センシング技術が現在のところ未開発である。排出速度とゲート開度とのテーブルを持って、これを熟練オペレータが経験と勘によって、状況を判断しつつ微調整するのが従来のレベルであった。

今回導入した粒体ファジィ制御のシステム構成を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。Fig. 16 は前者の貯鉱槽からの払出しに適用したもので、熟練者の持っている制御規則 $Y_i = f_i(X_i) (i=1, 2, \dots, n)$ をファジィ推論により、開度修正量としてフィードバックしている。ファジィ変数はゲート開度、実績排出速度、偏差等である。一方、Fig. 17 は後者のサージホッパーからの排出と炉頂パンカからの装入に適用したもので、パッチ単位で駆動する閉ループ PID 制御を基本とし、これに対して、制御結果を専門家の特性変動に関するファジィ知識に結び付け、推論することで制御ゲインを調整するファジィ適応制御を付加している。

さてこの粒体ファジィ制御の特徴は、簡易化したメンバーシップ

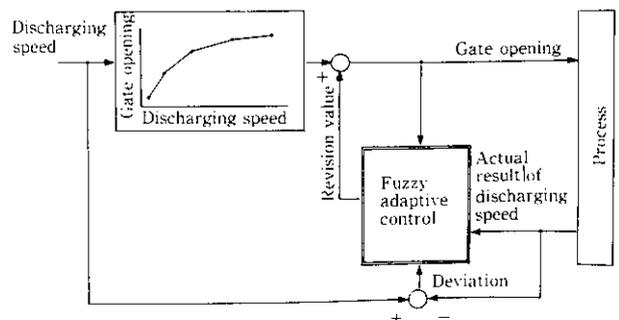


Fig. 16 System block diagram of fuzzy control for grains (adaptive control for revision value of gate opening)

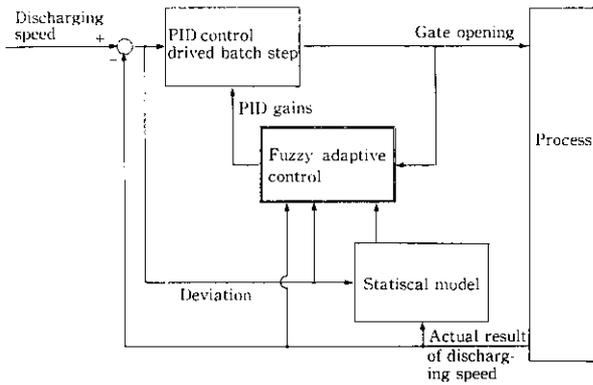


Fig. 17 System block diagram of fuzzy control for grains (adaptive control for PID closed loop)

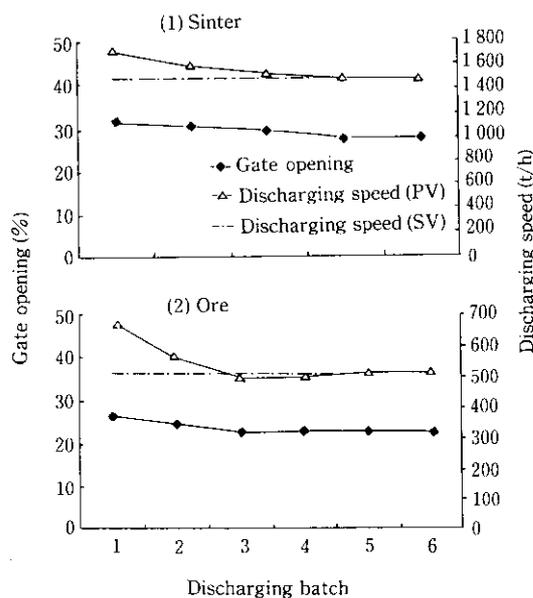


Fig. 18 Result of discharging speed control

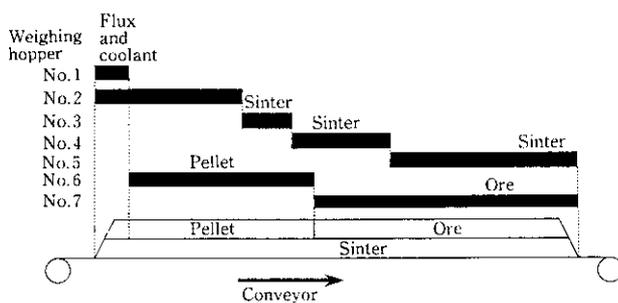


Fig. 19 Tracking result of layer discharging

関数により、PLC 上で実時間性で高速処理していることである。したがって、PLC 本来のシーケンス制御と共存して IF-THEN 形式の論理型制御アルゴリズムを並列実行させている。

本制御と従来制御との適応性の比較例を Fig. 18 に示す。これは貯鉱槽からの払出し制御の例であり、オペレータ密着の手动微調整に比べて格段の速応性を得ている。この技術を複数の槽からの複数の銘柄による層状払出し制御に応用した制御結果例を Fig. 19 に示す。複数の銘柄が整然とベルトコンベア上で層状に払出され、これらが混合されて銘柄偏析を解消しようとする目的が達成されてい

る。

5 結 言

水島製鉄所第 3 高炉における適用例を中心に、当社の高炉における AI 技術について述べた。

- (1) 高炉操業管理システムは、診断型のエキスパートシステムであり、操業アクションのガイダンスを行うだけでなく、送風温度の自動設定による高炉炉熱の自動制御を行う。
- (2) 熱風炉燃焼制御は、ファジィ推論と物理モデルを組み合わせた制御であり、熱風炉の熱効率の向上と珪石レンガの保護を目的としている。
- (3) 貯鉱槽槽配置計画は、計画型エキスパートシステムをプロセス計算機レベルで実現したものである。
- (4) 水砕脱水槽分配制御は、リアルタイムで動作する制御型エキスパートシステムであり、水砕運転の完全自動化のための機能である。
- (5) 原料排出速度制御は、ファジィ推論を用いた制御であり、原料排出時の銘柄偏析を解消するために用いられる。

高炉あるいは製鉄部門においては、AI 技術はもはや特殊な技術ではなく、操業の自動化・効率化を図る上で必要不可欠な技術となっており、その利用価値は非常に高い。今回紹介した適用例も、AI 技術の使用によって初めて実現可能となった機能であり、その操業への寄与はたいへん大きい。製鉄部門には制御問題、計画問題を中心に、AI 技術の適用によって解決される可能性の高いテーマはまだ残っている。そのため、今後一層の適用範囲の拡大を図っていくとともに、ニューラルネットワークなどの新しい技術の利用にも取り組み、AI 技術のより一層の戦力化を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 秋月英美, 山崎 信, 野村 真, 飯田 修, 佐藤政明, 上谷年男, 福村 聡: 鉄と鋼, 73 (1987) 12, S829
- 2) 秋月英美, 山崎 信, 佐藤政明, 木口 満, 飯田 修, 上谷年男, 福村 聡: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 111
- 3) O. Iida, M. Sato, M. Kiguchi, T. Iwamura, and S. Fukamura: "Blast Furnace Control by Artificial Intelligence", Proceeding of IFAC Work Shop "Artificial Intelligence in Real Time Control", IFAC, Swansea (UK), September (1988)
- 4) 山崎 信, 佐藤政明, 木口 満, 飯田 修, 福村 聡: 材料とプロセス, 2 (1989) 1, 6-9
- 5) 中田衛志, 木村 晋, 三宅真弓, 藤本英男: 富士通ジャーナル, 16 (1990) 2, 22-28
- 6) 永井信幸, 新井照男, 松田浩一, 門口維人, 矢場田 武: 材料とプロセス, 2 (1989) 1, 10-13
- 7) 大塚宏一, 松岡 進, 綱永洋一, 吉田正明, 横井 毅, 稲田隆信: 材料とプロセス, 2 (1989) 1, 14-17
- 8) 財部 毅, 中森 孝, 織田博史, 平 政直, 渡辺 敏, 関 住利: 材料とプロセス, 2 (1989) 1, 18-21
- 9) 丹羽康夫, 炭産隆志, 櫻井雅昭, 青木太一: 材料とプロセス, 2(1989) 1, 22-23
- 10) Y. Maki, Y. Masuda, J. Sawada, T. Matsumoto, H. Obata, and N. Takashima: "Application of Fuzzy Theory for Automatic Control of Hot Stove Combustion Gas Flow Rate", 6th IFAC-3M Symposium, IFAC, Buenos Aires (Argentina), September (1989)
- 11) 吉井修一: 石川島播磨技報, 30 (1990) 2, 116-120
- 12) 菅野道夫: 「ファジィ制御」, [日刊工業新聞社]