

高炉操業管理システム

Operation Control Systems for Blast Furnace

高炉での操業は、その設備的な条件から現場オペレータのノウハウによって行われているのが現状である。そのため、ノウハウの個人差や熟練オペレータの減少が、安定した高炉操業を維持していくうえでの問題になっている。

新日本製鐵株式会社では、この問題を解決する一つの方法として、知識処理、を利用した高炉操業管理システムの導入を決定した。

このシステムは、高炉の操業が日々のミーティングによって決定されるなど、操業の方法が日々更新されること、また決定された操業方法に即時対応する必要があることを考慮し、オペレータ自身の手による知識の移植および検証を可能とした知識処理システムである。

現在、推論の適中率は高い水準に達し、順調に稼動中である。

天野 繁*	Shigeru Amano
平 政道**	Masamichi Taira
渡邊 敏**	Satoshi Watanabe
関 任利***	Takatoshi Seki
中井耕三****	Kôzô Nakai
滝川悟郎*****	Gorô Takigawa
小林義和*****	Yoshikazu Kobayashi
増位庄一*****	Shôichi Masui

1 緒 言

高炉は鉱石、コークスを原料として溶銑を得る大規模なプロセスであり、その設備条件から肉眼で炉内の状況を監視することは不可能である。そこで、炉内の状況を知る手段として高炉に多数のセンサを取り付け、その情報を継続的に収集している。オペレータは、そのさまざまな情報とノウハウを基に総合的に炉内の状況を判断し、高炉の状況を安定に維持することを目指して操業を行っている。

しかし、熟練オペレータといっても、数千点にも及ぶセンサの情報をすべて監視し、緩やかな高炉状況の推移まで察知するのはきわめて困難である。また、オペレータ各自のノウハウは必ずしも同一ではなく、操作量、操作時期に個人差があるため、常に高炉の状況に即した最適の操作が行われているとは限らない。さらに、熟練オペレータの減少とともに、優れたノウハウが失われていくことも問題の一つである。

この問題を解決する一つの方法が、知識工学(エキスパートシステム)の適用である。

エキスパートシステムは、エキスパートが保有するさまざまなノウハウを計算機に移植し、エキスパートと同等の判断を行わせることを目的としている。

一般にエキスパートシステムは、ナレッジエンジニアと呼ばれるシステムの専門家の手で構築される。構築に際してナレッジエンジニアは、実際に知識を保有している専門家(エキスパート)からインタビュー形式で知識を抽出し、それを基に

システムを構築する。

しかし、この方法ではエキスパートの微妙な知識や知識の抽出の深さが、ナレッジエンジニア自身の知識に左右される可能性があり、知識の正確な移植という面で少なからず不安が残る。

また、高炉の操業は不変的なものではなく、日々のミーティングによって見直され更新されていくものであり、システム構築後も容易かつ即時に知識の更新が可能なシステムでなければならない。

このシステムは、これらのことを考慮し、現場オペレータが自分の知識を自分で移植、検証を行い、将来にわたって知識のブラッシュアップを可能にしている。

この論文では、このように将来にわたり、エキスパートがみずから手で知識をブラッシュアップ可能なシステムに要求されるさまざまなニーズとその解決方法の一例、および高炉の操業管理に適用した評価について述べる。

2 システムに対するニーズと特長

2.1 システムに対するニーズ

このシステムは、現場オペレータ(エキスパート)がみずから知識のブラッシュアップが行えるシステムを構築することに特に重点を置いている。そのために、システムに要求される種々のニーズを以下に示す。

* 新日本製鐵株式会社 製銑部 ** 新日本製鐵株式会社 君津製鐵所設備部 *** 新日本製鐵株式会社 設備技術本部
**** 日立製作所 大みか工場 ***** 株式会社日立情報制御システム ***** 日立製作所 システム開発研究所

(1) 知識の表現がわかりやすいこと。

計算機の非専門家である現場オペレータが主役であることを考慮し、知識の表現は日常使用している日本語に極力近い表現であること。

(2) 知識の入力操作が容易であること。

知識の表現が日本語に近い表現であり、入力操作自体が簡単であることで、新たな知識の獲得に寄与することが必要である。

(3) 作成、修正した知識のテストが容易であり、かつ随時行えること。

新たな知識や改良した知識を入力後、そのテストが容易かつ随時行えなければ、オペレータが積極的に知識のブラッシュアップを行ううえで妨げとなるおそれがある。

(4) 知識を入力する端末は、ガイダンス機能を備え入力が容易であること。

(5) 数千点に及ぶ高炉のデータを、人手を介することなく知識側で使用可能であること。

また、システム的なニーズとして、

(6) 1台の計算機で複数高炉のオンライン推論、テスト推論が同時に動作可能であること。

(7) 限られたリソースを有効に活用できること。

(8) 知識ベースのテスト時、オンライン側へ悪影響を及ぼさないこと。

2.2 システムの特長

上述のニーズを根幹において構築されたこのシステムは、以下に述べるような特長を備えている。

(1) 知識処理ツールに日本語処理をサポートしているEUREKA(Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation)を採用し、知識の表現は日常の日本語表現に極力近い表現をとっている。

(2) インテリジェンス性を持たせられるパーソナルコンピュータを知識処理用の端末として採用し、ワードプロセッサ機能を使用することで、現場オペレータでも容易に日本語入力ができる。また、入力を促すガイダンス機能をサポートし、入力は番号で指定していけば目的とするルール、オブジェクトなどを容易に検索できる。

さらに、ルールの作成では、条件部と実行部を指定された枠の中に入力すればよく、“IF”、“THEN”、“(”、“)”のように、文法上は必要であるが人間の思考上不必要な記号は入力する必要がなく、計算機側で自動的に付加している。

(3) 知識ベースのテストを行うためのユーティリティを装備しており、テストにあたっては、オンラインデータ、保存データ、磁気テープ保存データ、オペレータによるCRTからの手動入力データでテストを可能にしている。このことにより、作成、修正された知識の検証が、より高いレベルで行える。

(4) 知識ベースのテストでは、EUREKAと会話形式で実行ル

ールのトレース、実行中断、スロット値の表示・設定などが行え、きめ細かなテストが可能である。

(5) 基本ソフトウェアにMRTCS^{※1)}(Multi Real Time Control System)を採用し、複数高炉のオンライン推論、テスト推論が同時に動作可能としている。また、これによりオンラインに影響を与えることなく、知識ベースのテストが随時行える環境を提供している。

(6) 各種端末はオンライン用とテスト用の2式を持ち、オンラインの推論を停止することなくテストが可能である。

(7) 推論は、各高炉からのリアルタイムデータを用いて行っている。また、データの更新は高炉プロセスの特性を考慮し10分ごとに行っている。

(8) 一知識ベースの容量を可変とすることで、膨大な量となる知識ベースを効率よく管理し、リソースを有効に活用している。

3 システムの構成

このシステムの構成を図1に示す。

知識処理で高炉ごとのプロセスデータを基に各種推論を行い、その結果をCRTおよびT/W(Typewriter)に操業ガイダンスとして出力する。

オペレータは、出力されたガイダンスに基づき必要な操作を行い、高炉の安定操業を目指す。

知識処理の機能概要を図2に示す。

オンライン知識処理では、オペレータはEUREKAの文法に従い、自分の持つ専門知識を知識処理端末から入力する。入力された知識は、通信回線を経て知識ベース管理処理へ渡され、知識ベース管理処理は、EUREKAの知識体系に従い知識ベースを作成する。

作成された知識ベースは、トランスレータ(知識ベース用コンパイラ)によって中間コードに変換される。この中間コードをエグゼキュータ(推論エンジン)が解釈し、推論が行われる。

推論の実行は、一定周期(10分周期)で常時動作している周期推論と、任意のタイミングでCRTからオペレータが推論を要求する任意推論の二つの推論方法が可能である。この推論の実行を管理しているのが推論実行管理である。推論実行管理では、推論の要求を受け付け、エグゼキュータに推論を要求する。

エグゼキュータは、知識を翻訳した中間コードと推論実行時点での最新の実績データを知識用のデータとして取り込み、推論を行う。行った推論の結果はCRTに表示、およびタイプライタに印字され、操業ガイダンスとして活用される。

※1) MRTCS：1台のCPUで複数のシステムを制御する機能で、システム間での干渉は排除されている。

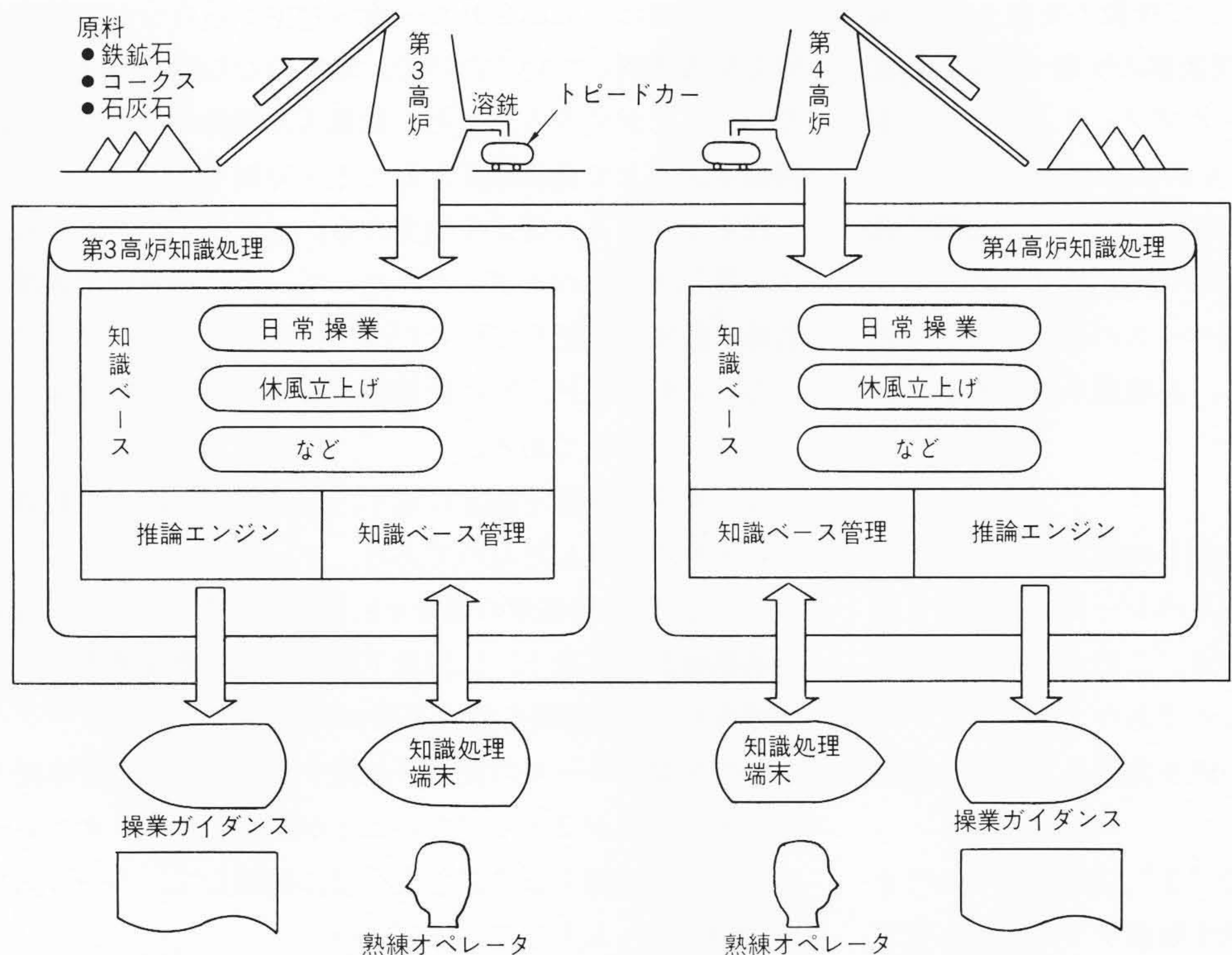


図1 システム構成図 各高炉のデータを基に推論を行い、操業ガイダンスを出力する。

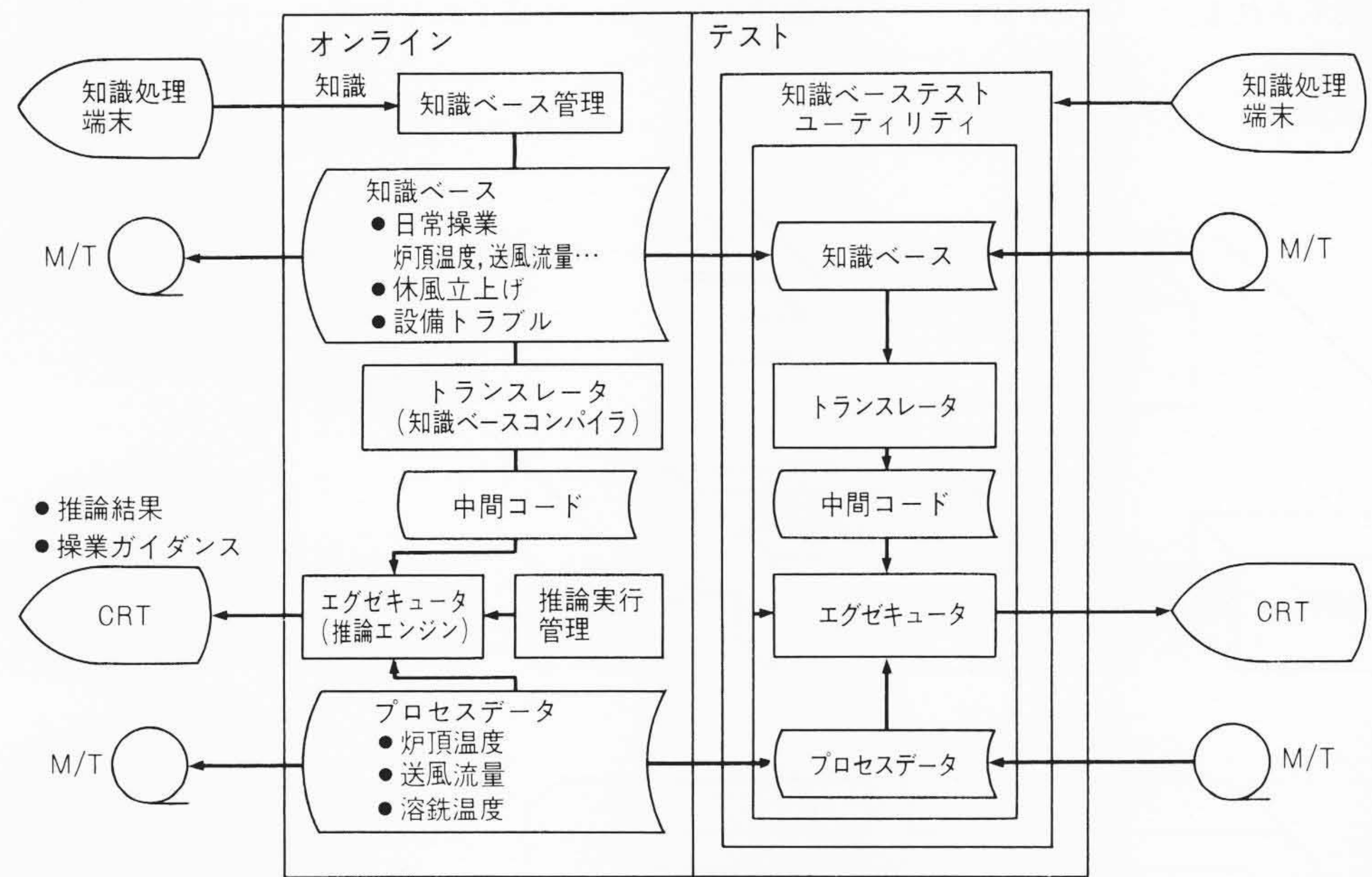


図2 ソフトウェア構成図 知識処理端末から入力された知識は、知識ベースとして格納される。推論は、この知識ベースを翻訳した中間コードとプロセスデータによって行われ、結果をCRTに出力する。

テスト知識処理では、知識処理端末によって選択された多くの知識中の一知識がテストの知識ベースに転送される。プロセスデータは、過去、現在のデータの中からオペレータによって指定されたデータが、テスト知識処理中に転送されて推論が行われ、結果をテスト専用のCRTに表示する。表示結果を見てオペレータはテスト結果の良否を判断し、テストを

続行する。
以下、各機能の詳細説明について述べる。

3.1 知識ベース管理処理

オペレータが知識処理端末から入力した知識を、計算機へ格納する処理が知識ベース管理処理である。まず、EUREKAでの知識体系を図3に示す。

図3のように知識の最上位概念として複数の知識クラス(例えば日常操業)が存在し、その下に複数の知識ベースが存在する。知識ベースの中にはルール、オブジェクト、イベントルール、メソッドおよびI/Oテーブルが存在する。

推論実行の単位となる一知識ベースの大きさは、知識作成者であるオペレータにゆだねられており、一概に決めることは不可能である。したがって、知識ベースの構造に小さな箱がつながったチェーン構造を採用し、必要最小限の容量で済むようにしている。

3.2 知識処理端末

知識処理端末には、ガイダンス機能と知識入力用エディタを装備し、計算機の非専門家であるオペレータであっても容易に操作ができるように考慮している。このガイダンス機能はオペレータの入力を促すためのものであり、このシステムでは、最も重要な機能である。この例を実際にルールを修正する場合の手順に従って説明する。

まず、図4に示すメニュー画面で“3”(知識エディタ)を選択する。そうすると、図5(a)に示す知識クラス名称一覧表がガイダンスとして自動的に表示されるので、表示された一覧表の中から修正したい知識クラスを選択する。次に、選択した知識クラスに基づく同図(b)に示す知識ベース名称の一覧表が、ガイダンスとして自動的に表示される。

以下同様に、表示された一覧表の中から自分が希望する項目を順次選択していくだけで、最終的な知識入力画面にたどりつくことができる。また、知識入力画面では、表示された内容を画面上で直接修正することが可能である。

以上がルールの修正手順である。この手順からわかるように、表示されたガイダンスに沿って、自分が希望する項目や名称を数字で選択していくだけでよい。これにより、複雑な入力から解放され、特に計算機の教育を受けた専門家でなくとも操作が可能である。

ルール入力画面を図6に示す。この例は、以下の知識をルールとして記述したものである。

「もし、計算塩基度の最新が1.30より小さく、スラグ塩基度の基準値が1.25以上、1.30以下ならば、計算塩基度が下降傾向であり、B1調整を行う必要がある。」

この知識とルールの記述を比較すると、日常の日本語と知識の表現の差がほとんどないことがよくわかる。オペレータは、自分の知識を条件部と実行部に整理して、ルール入力画面(図6)から入力していけばよい。

また、このルールはCRTにメッセージを表示するルールであり、実行されると図7の画面が表示される。

3.3 推論実行管理

推論実行管理は、作成された知識ベースを推論するタイミ

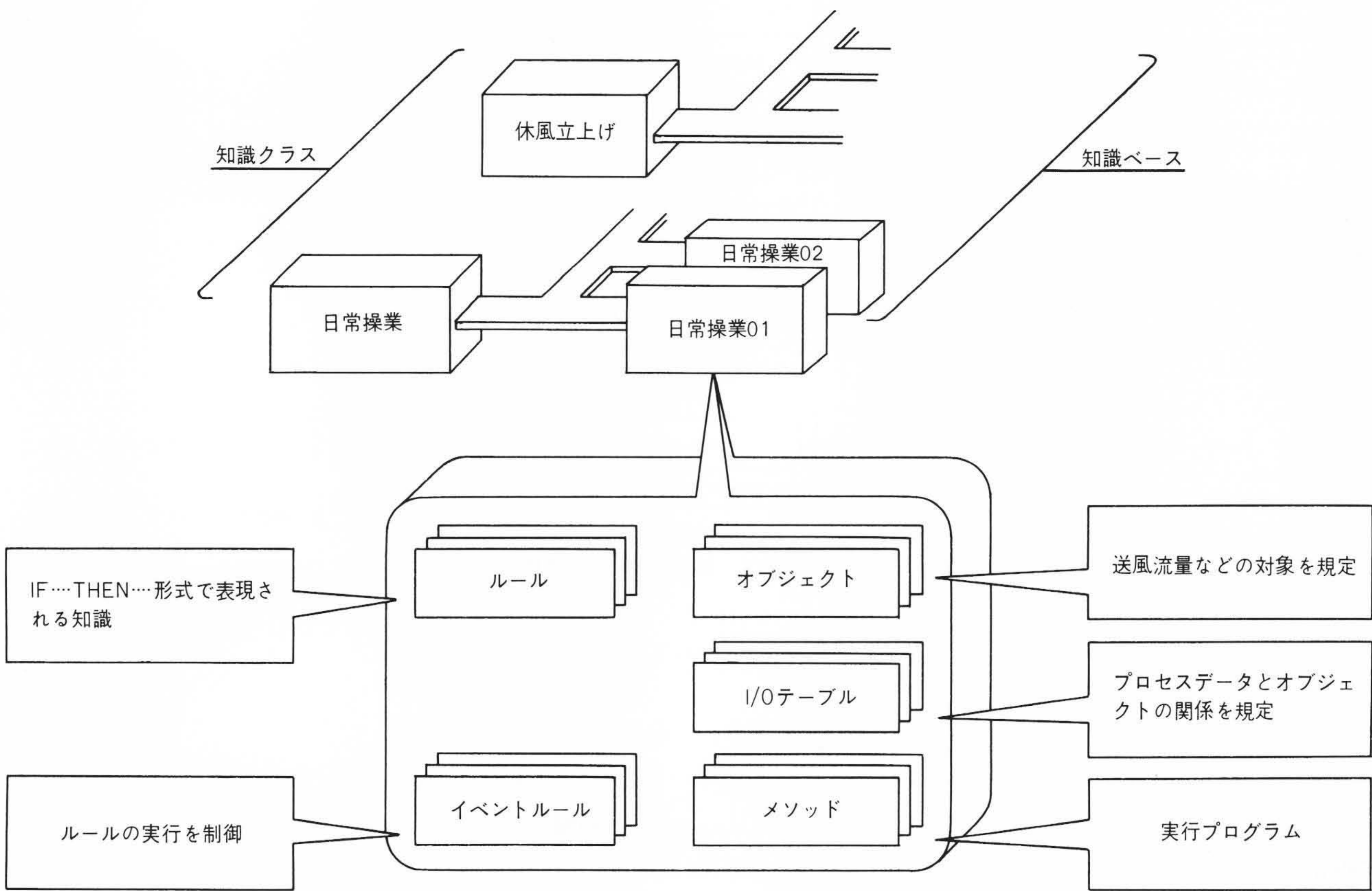


図3 知識体系 知識は最上位概念として知識クラスがあり、その下に複数の知識ベースが存在する。知識ベースはルール、オブジェクトなどから構成される。

テスト系（オンライン系）初期メニュー 04-07-1987 10:04 [B001]

データベース名 : C48F

オペレーション選択をして下さい。 ■

- 1 <知識ベーステスト>テスト系での推論の実行
- 2 <操業系>トランスレート・メソッド登録 及び 削除
- 3 <知識エディタ>知識ベース（ルール・オブジェクト等）の変更・新規作成及び削除
- 4 各種ユーティリティ

図4 知識処理端末メニュー画面 処理の選択は、この画面のようにすべて表示された項目を番号で選択するだけでよく、複雑な入力はいらない。

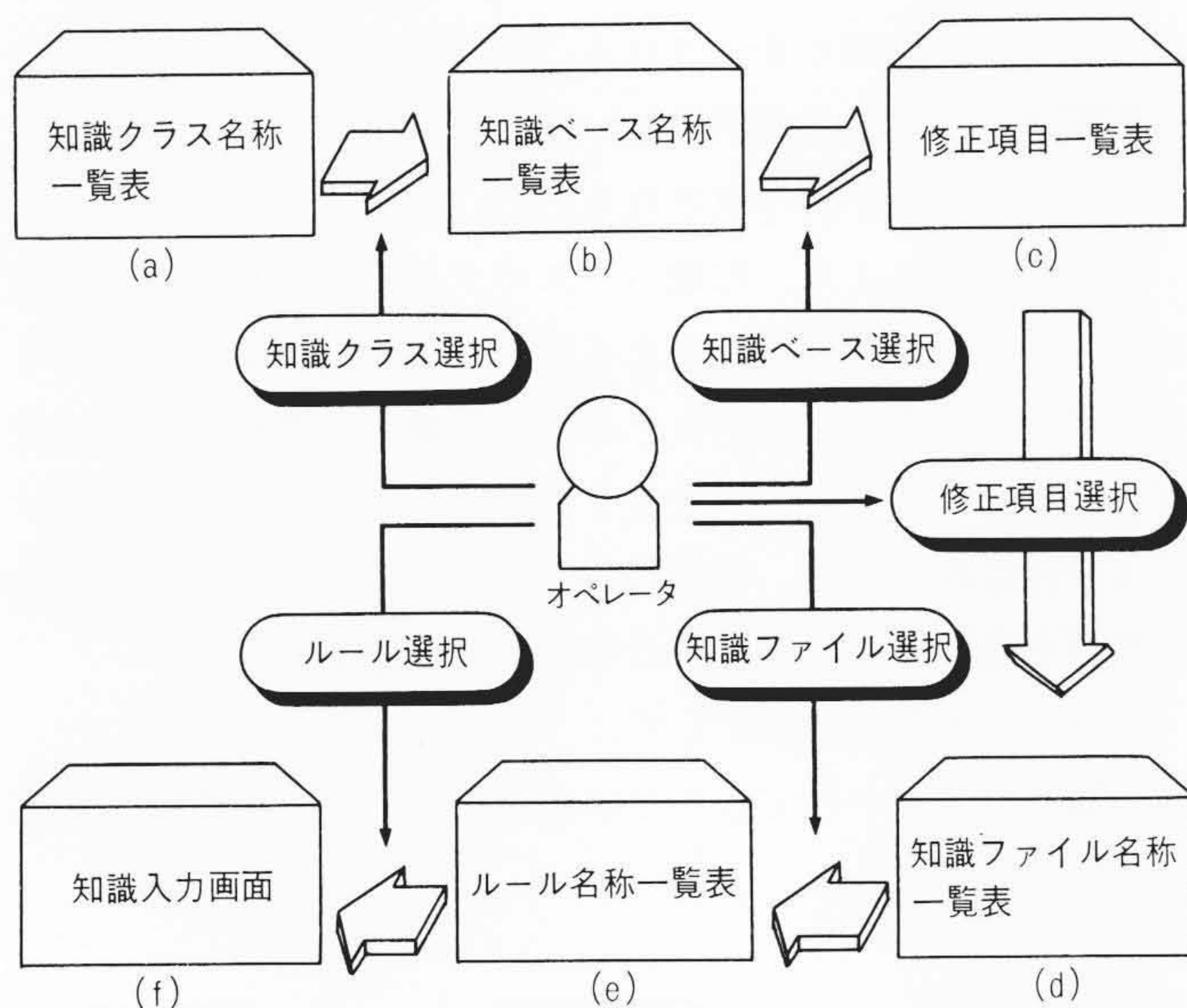


図5 知識入力操作遷移図 項目を選択すると順次画面が更新されていき、最終的な知識入力画面にたどりつくことができる。

ングを管理する処理である。

高炉システムでは、高炉の各種データを一定周期で取り込むことが一般的である。推論もデータ更新に即したタイミングで行えるように、一定周期で推論を行っている。

また、異常時などには、CRTから任意のタイミングで推論できる機能も備えている。

推論実行管理の概要を図8に示す。推論結果は図7に示すように、オペレータに対し具体的な操作指示を行っている。この操作指示によって高炉に対してアクションを行うことで、高炉の状況が異常になることを未然に防ぐことが可能である。

3.4 知識ベーステストユーティリティ

知識処理システムでも、従来のプログラム同様、入力した

タスク名	条件部 (IF)	オブジェクト名	条件表現
ダイレクト判定	計算塩基度 スラグ塩基度	の \$ 最新 が 1.30より小さい の \$ 基準値 が 1.25 以上で あり かつ 1.30以下である	

終了=F15

実行部 (THEN)	オブジェクト名	メソッド	値表現
システム	表示	アクション、" 塩基度が下降傾向です B1調整を行なって下さい"、X101	計算 塩基度 B 1調整 X101

終了=F15
ページ終了=F16

図6 ルール入力画面 日常の日本語と知識の表現の差はほとんどない。枠で囲まれた部分に知識を入力していく。“（”，“）”のような記号は入力しなくてよい。

X101 1

ALISからのメッセージ

89/ 3/ 8 22:34
(89/03/08 22:34)

実績塩基度が下降傾向です
B1調整を行なって下さい

関連グラフNO= G105,G114,G111,G101,G121,
日常操業の指示アクションを取らない時のみ理由を選んで下さい
1=タイミング不適 2=アクション方向性不適
3=アクション手段不適 4=アクション量不適 5=その他

図7 推論結果画面 ルールで記述した内容を、そのままCRTに出力することができる。

知識ベースをテストすることで知識の検証を行う必要がある。その確認テストがいかにか効率よく行えるかが、知識のブラッシュアップを左右するといっても過言ではない。

このシステムでは、知識ベースをテストするユーティリティを備え、知識ベースのテストを効率よく行える環境を提供している。

知識ベースのテストを効率よく行える環境とは、

- (1) テストしたい知識ベースが自由に選択できること。
- (2) テストで使用するデータの種類の豊富で、かつ操作が容易であること。
- (3) オンラインに影響を与えることなく随時テストが可能であること。

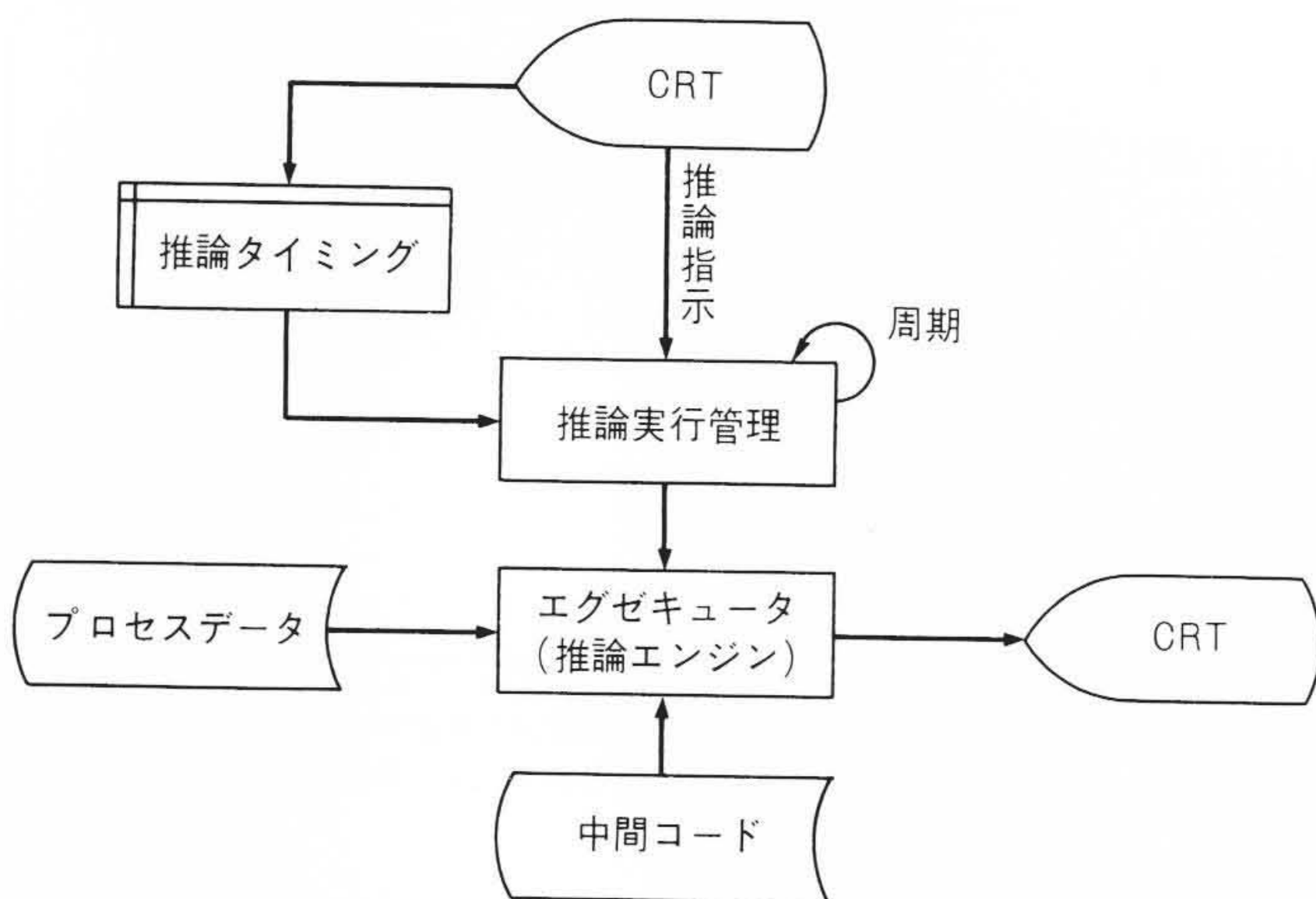


図8 推論実行管理 通常は周期的に推論を行っている。必要に応じてCRTから推論することも可能である。

の3点に集約できる。知識ベーステストユーティリティでは、上記3点について以下のようにサポートしている。

(1) 知識ベースの選択

テスト可能な知識ベースとして、

- (a) 現在、作成・修正中で計算機の補助記憶装置に存在するすべての知識ベース
- (b) ユーティリティ機能を用いて磁気テープに保存したすべての知識ベース

の2種類があり、オペレータは希望する知識ベースを知識処理端末から自由に選択してテストが行える。

(2) テスト用データの選択

テストで使用可能なデータとして、

- (a) オンライン系で現在使用しているデータ
- (b) オンライン系のデータを補助記憶装置に蓄積した過去データ
- (c) 上記(b)のデータをユーティリティ機能を用いて磁気テープに保存した磁気テープデータ
- (d) オペレータが必要に応じてCRTからデータを設定する手動入力データ

の4種類がある。操作は、オペレータが知識処理端末から希望するデータ種別と期間〔上記(b), (c)のときだけ必要〕を指定すればよい。あとは計算機が自動的にテスト用のデータを作成する。

(3) テストのタイミング

基本ソフトウェアにMRTCS^{*1)}を採用することによって、オンラインに影響を与えることなく随時テストを可能としている。

これらの機能により、例えば修正中の知識ベースをオンライン系のデータで推論し、その場でオンライン系の推論結果と比較検討することも可能である。

また、推論結果が不適當であったときの過去のデータで推論することで、知識の誤りを解析し、適切な知識へのブラッ

シュアアップが可能である。

知識ベーステストの指示も知識処理端末から行う。この場合もガイダンス機能を備えており入力を容易にしている。実際に知識ベースをテストする手順について説明する。

まず、メニュー画面(図4)で“1”(知識ベーステスト)を選択すると、図9(a)に示す知識クラス名称の一覧表が、ガイダンスとして自動的に表示される。表示された一覧表の中からテストしたい知識クラスを選択する。次に、選択した知識クラスにつながる知識ベース名称の一覧表〔同図(b)〕が、ガイダンスとして自動的に表示される。ここで、テストしたい知識ベースを選択する。これでテストしたい知識ベースの選択が終わり、続いてテストで使用するデータを選択する。

まず、テストで使用するデータの種別を指定する。画面上にデータ種別の一覧表が表示されているので、この中からテストで使いたいデータの種別を指定する〔同図(c)〕。データ種別として過去データを選択すると、自動的に現在蓄積しているデータの期間が表示される〔同図(d)〕。表示されたデータの期間内でテストで使いたい期間を指定すると、自動的にテスト用のデータが作成される。

以上の手順により、知識ベースのテストを行うための環境が整う。この手順でわかるように、オペレータは表示されたガイダンスに沿って、テストしたい知識ベースやテストで使用するプロセスデータの種類などを数字で指定していくだけでよい。これにより、複雑な入力から解放され、特に計算機の教育を受けない非専門家でも操作が可能である。

また、テストの性格として、

- (1) 随時テストが行えることは必要であるが、常時行う性格

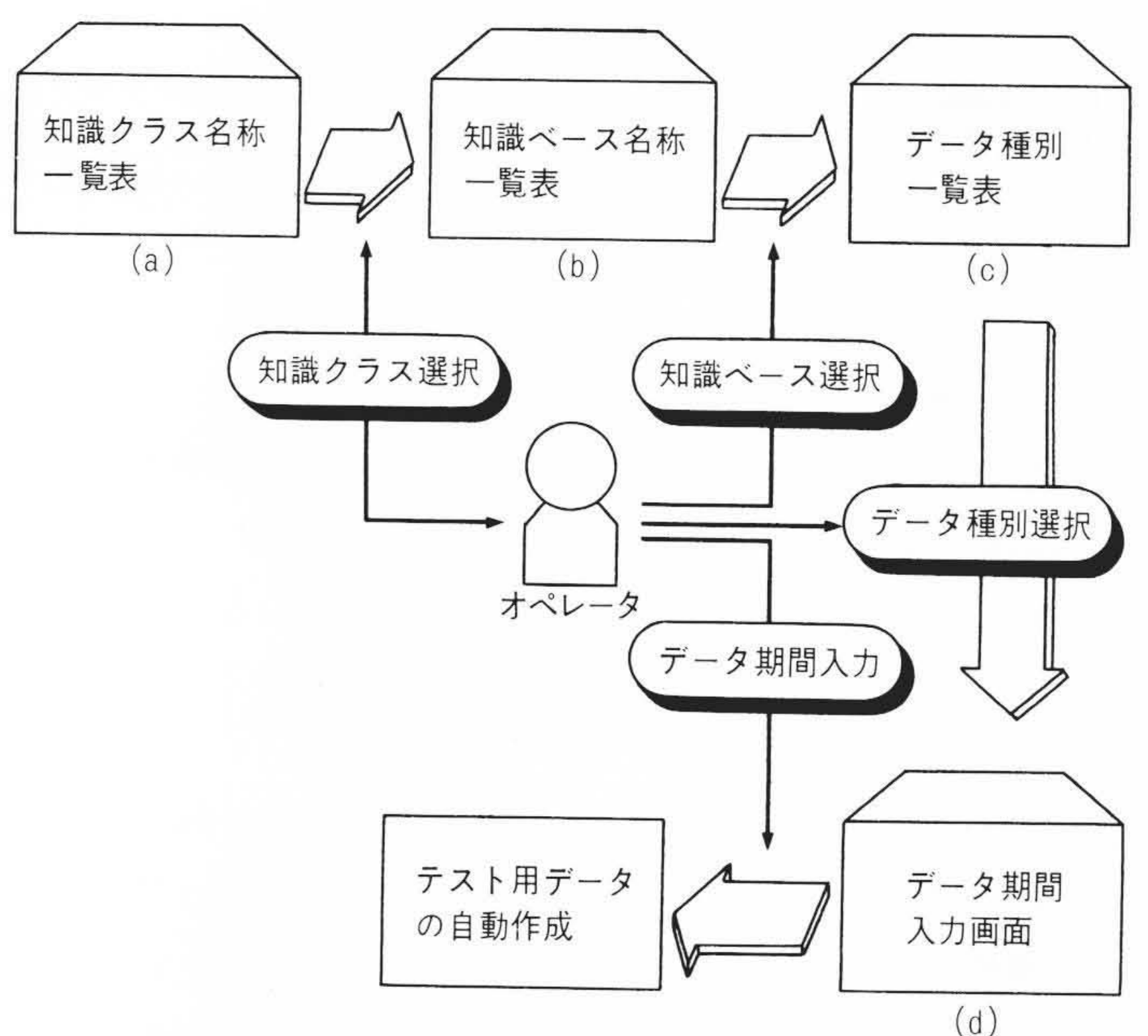


図9 知識ベーステスト入力操作遷移図 知識ベースのテストを行う場合も、表示された項目を選択していくだけでテスト用データまで作成される。

のものではないこと。

(2) リソース、特に主記憶に限りがあること。

を考慮して、主記憶の一部をテスト用のエリアとして確保し、複数高炉で切り替えて使用できるようにしている。切り替えの操作は、オペレータがCRTから行う。この切り替えに要する時間は数秒であり、リソースの有効活用と運用面での使いやすさを両立している。この概要を図10に示す。

3.5 高炉操業管理用計算機システム

高炉操業管理用計算機システムの構成を図11に示す。

知識処理用計算機として、HIDIC V90/50、基本ソフトウェアとしてMRTCS^{*1)}を採用して複数高炉のオンライン推論、テスト推論を同時に実現した。さらに、オンラインに影響を与えることなく、任意の知識をテスト可能とした。主な特長を以下に示す。

- (1) MRTCS^{*1)}の採用で、オンラインリアルタイム性に富むシステムとなった。
- (2) 各高炉、計算機室に知識処理端末用パーソナルコンピュータを設置し、各現場のオペレータが自由に知識のメンテナンスが可能となった。
- (3) 1台の計算機で複数高炉をサポートしているので、コストパフォーマンスの高いシステムが実現できた。

4 高炉実操業での評価

平易なルール表現であること、操作が容易であること、およびテストの手順が容易であることにより、従来、システムの教育を受けたシステムオペレータが専門に行ってきたシステムのメンテナンス作業を、特別なシステム教育を受けない現場オペレータでも容易に行うことができるようになった。

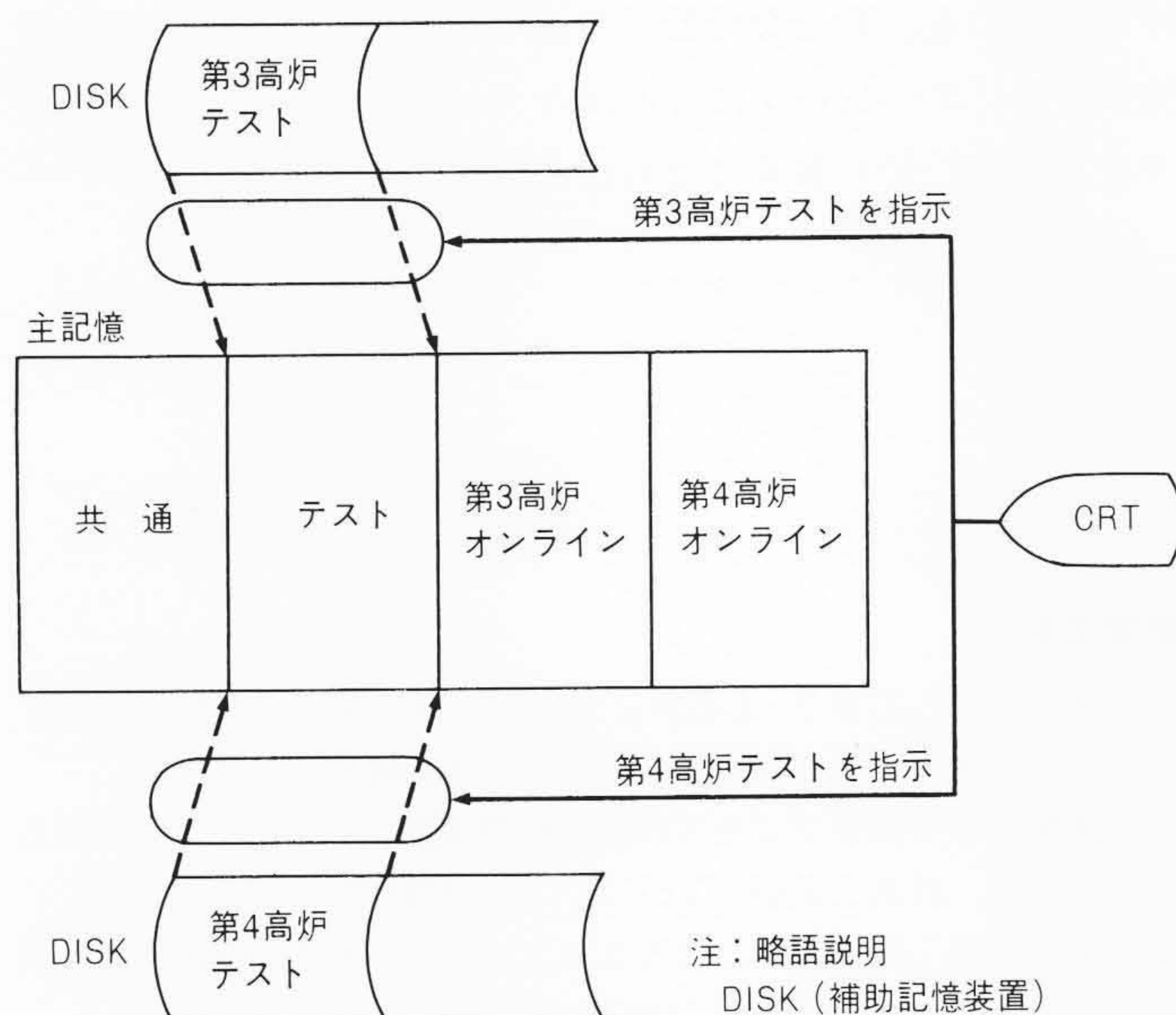
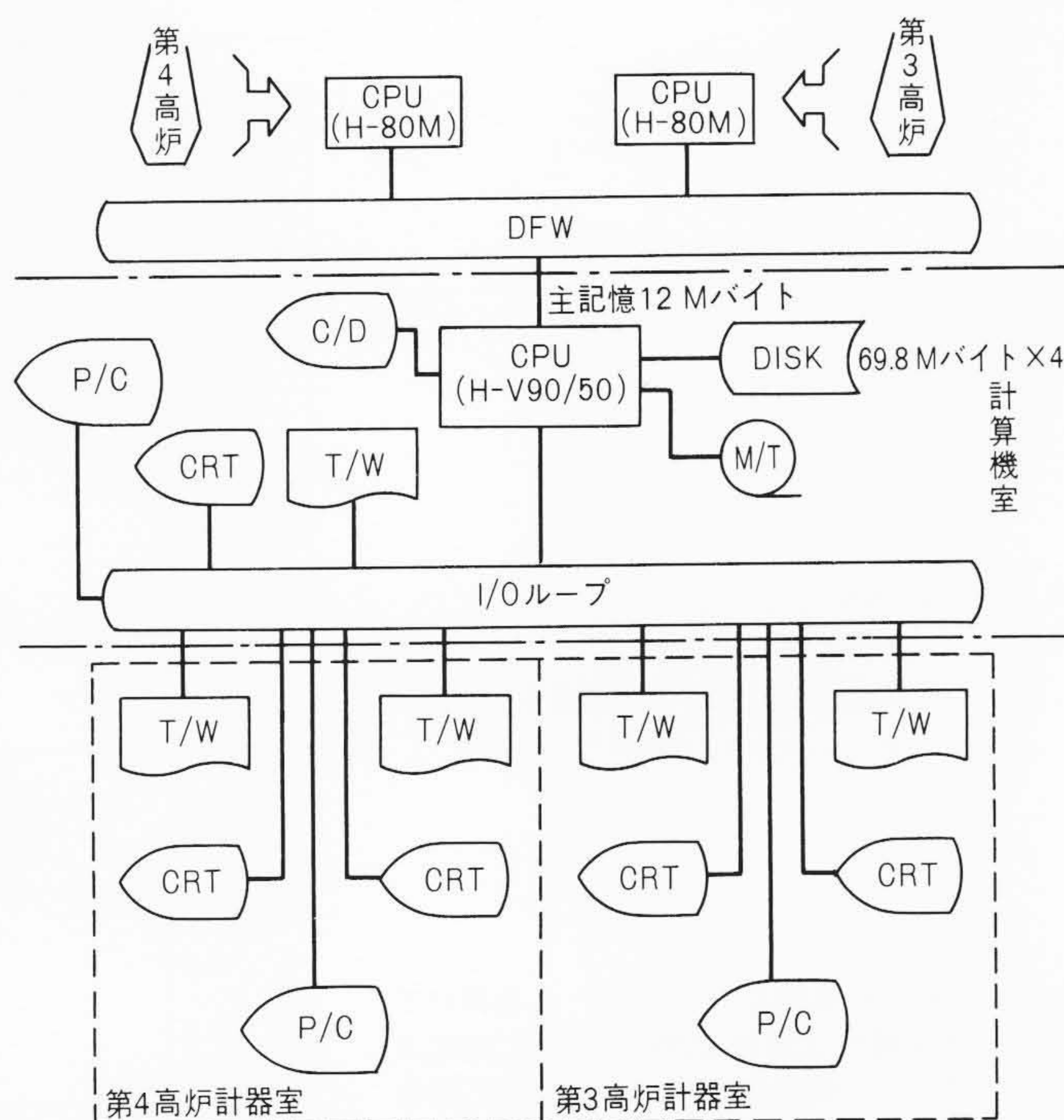


図10 テスト切り替え概念図
し、3高炉と4高炉で兼用する。

主記憶の一部をテスト用として確保



注：略語説明

DFW (Data Free Way)

C/D (Console Display)

P/C (Personal Computer : 知識処理端末)

T/W (Typewriter)

図11 高炉操業管理用計算機システム構成図
高炉操業管理システムは、各高炉、計算機室にオンライン用、テスト用の端末が配置されている。

また、ルールおよび各種知識の移植、移植された知識のテスト、さらにオンライン稼動後の知識のブラッシュアップまでを、すべてオペレータの手で行われたことで、エキスパートシステムの一つのあり方を提示できた。

なおこのシステムは、1988年4月に新日本製鐵君津製鐵所第3高炉(以下、第3高炉と言う。)知識処理が、1988年7月

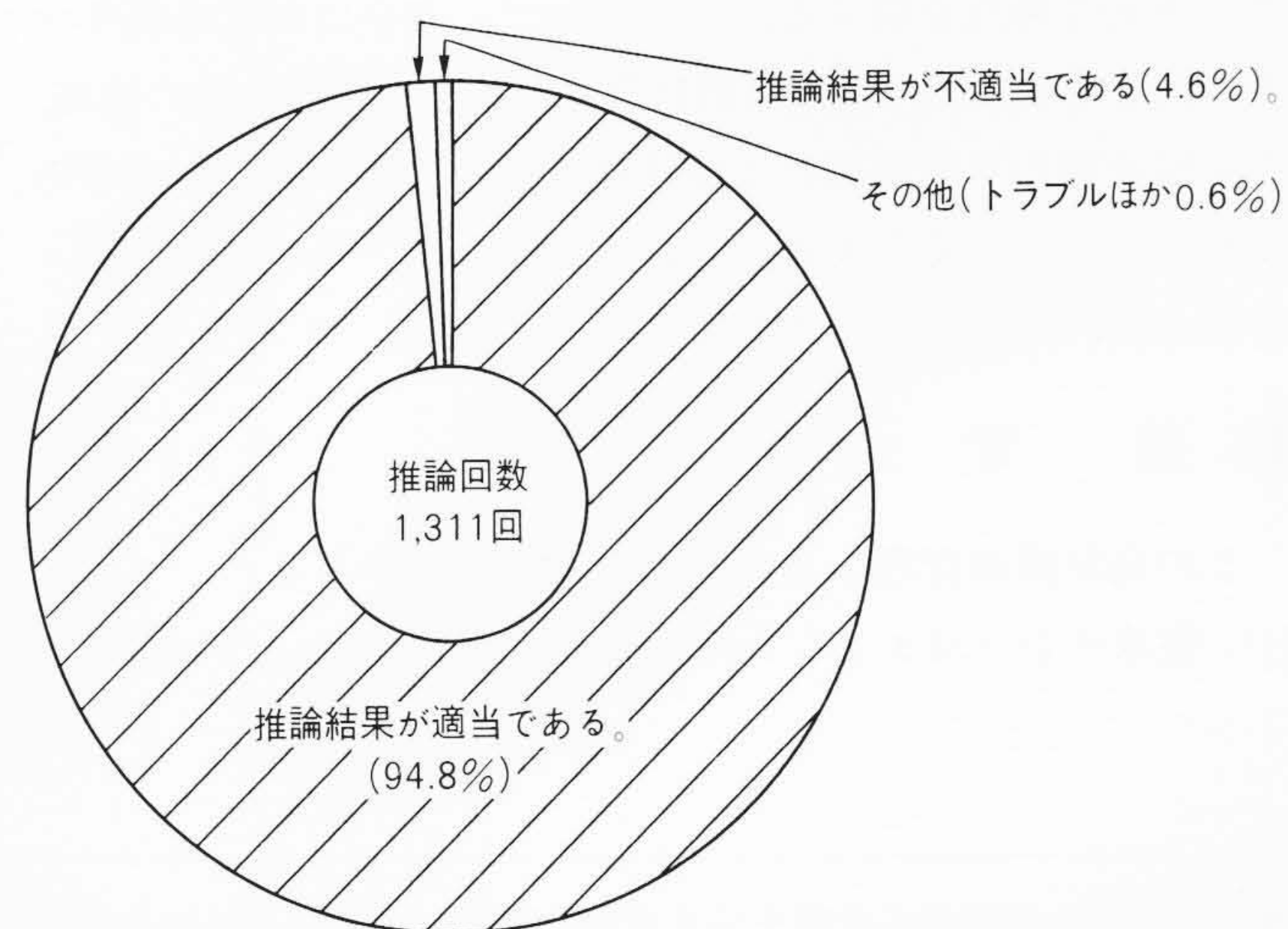


図12 推論結果評価
に達している。

第3高炉の推論適中率は、95%もの高い水準

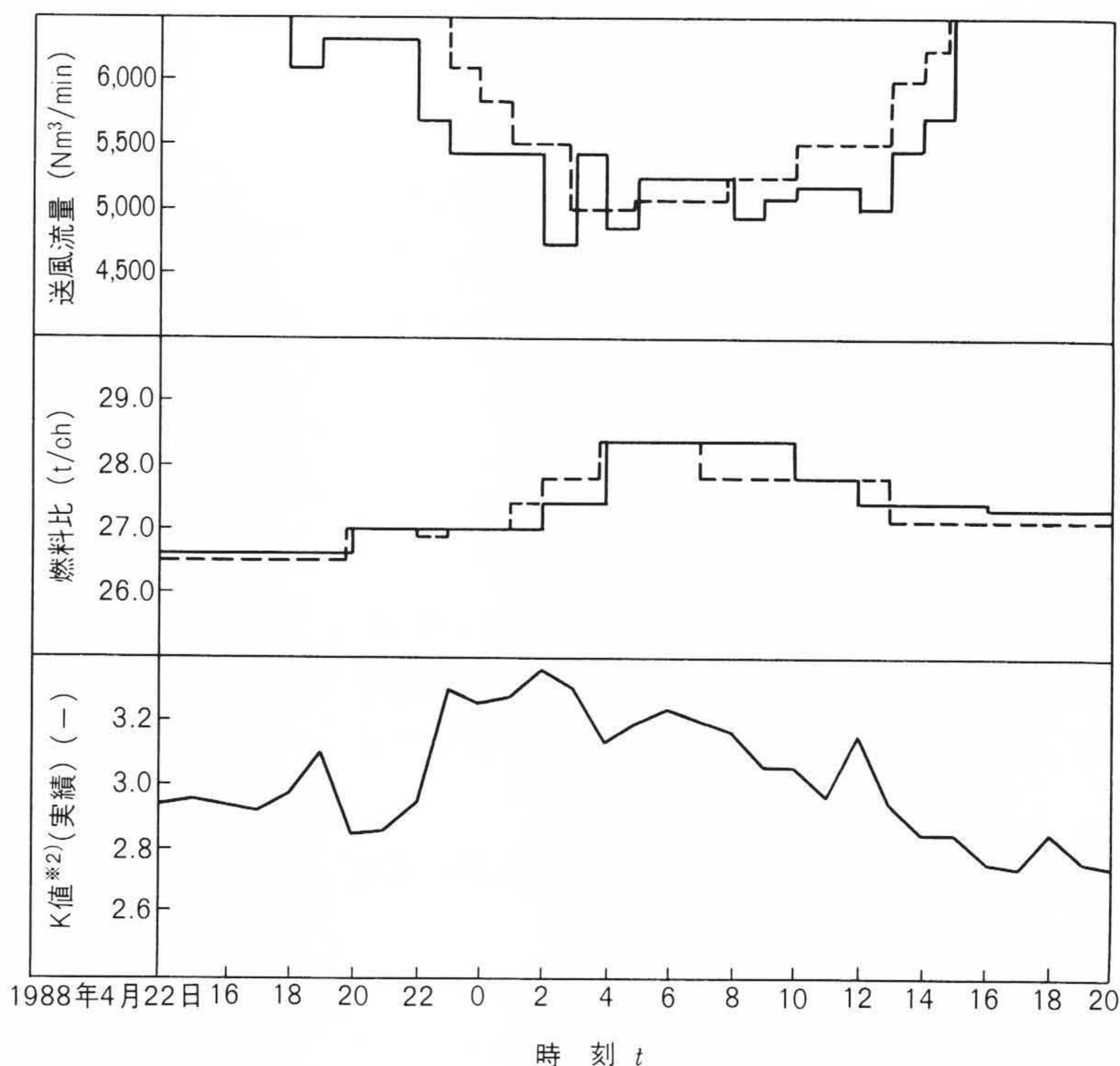
注：略語説明など

ch (チャージ)

—— (知識処理システムの推論結果)

----- (オペレータによる実操作)

図13 実操作と推論結果の比較 実操作ではK値^{*2)}の大幅な上昇後(23時)に初めて送風流量を減じている。知識処理システムでは同じ操作が必要であることを5時間前(18時)に指示している。



に第4高炉知識処理がそれぞれオンライン稼動を開始し、現在順調に稼動中である。

1988年9月の第3高炉での推論結果の評価を図12に示す。推論の適中率は、約95%もの高い水準に達している。

さらに、知識処理システム稼動前の第3高炉のデータを基に推論を行わせたところ、図13に示すような結果が得られた。

実操作では、K値^{*2)}の大幅な上昇後に初めて送風流量を減じる操作を行っている。一方、知識処理システムでは、同じ操作が必要であることを、約5時間前に推論結果として指示している。

高炉は大規模な反応炉であることから、反応の時定数が非常に大きく、一度不安定状態になると安定状態に復帰するまでに多大な時間を要する。したがって、高炉に対する操作が早ければ早いほど、安定状態に復帰するための操作量の低減、不安定状態の早期回避および状態の悪化防止ができ、高炉の状態はいっそう安定する。このことにより、コストの低減、溶銑品質の向上が期待される。

5 結 言

この高炉操業管理システムは以下の特長がある。

- (1) 従来ナレッジエンジニアによって行われていた知識のメ

ンテナンスをオペレータに開放した。

- (2) オペレーティングシステムのMRTCS^{*1)}を利用してオンラインに影響を与えることなくテストを可能とした。

- (3) 1台の計算機で複数基の高炉のオンラインリアルタイム推論とテストを可能とした。

さらにこの特長を利用し、オペレータによる知識のメンテナンスも加速され、前章で述べたように推論の適中率も約95%となり、高炉操業の安定化、コストの低減、品質の向上に大きく寄与している。

知識工学は今後さらに発展し、あらゆる分野への適用が期待されている。新たな分野への適用に際し、このシステムで提示した「オペレータによるエキスパートシステム」という考え方が少しでも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 財部，外：君津3，4高炉における知識工学の高炉管理システムへの適用，日本鉄鋼協会，第117回講演大会(1989)
- 2) 湯井，外：高炉プロセスの操業監視支援における知識システムの適用，計測と制御，Vol.26，No.8(1987)
- 3) 湯井，外：鉄鋼業におけるエキスパートシステムの応用，電気学会論文，107巻，2号(1987)
- 4) 増位，外：システム制御用知識処理ソフトウェアEUREKAの開発，SICE第2回「知識工学研究会」資料(1986)

^{*2)} K値：高炉内の状態を示す重要な指標であり、この推移を見逃がすと棚つりなどが発生し、最悪の場合、出銑を停止することになる。