

知識工学応用ルール型制御のFAへの適用

Rule Based Control System applied Knowledge Engineering for Factory Automation

FAシステムでは、従来の設備単体の制御から設備運用全体までシステム化の範囲が拡大してきている。一方で生産対象製品の多様化、ライフサイクルの短期化の傾向が強くなっている。このため、FAシステムのソフトウェアとしては簡単に運用規則のシステム化ができ、頻繁なライン変更、運用変更に対処できる柔軟で拡張容易なソフトウェアとする必要がある。この解決策として、知識工学を応用した新しいFA用ルール形制御アーキテクチャSCR/SCDを開発し、物流FAシステム、鉄鋼FAシステムほかへ適用した。これはリアルタイム制御に十分耐えられる応答性と高いソフト生産性を実現し、更に柔軟なソフト構造のため、エンドユーザーによる容易なシステム構築を可能とした。

解良和郎* Kazuo Kera
高倉修一* Syūichi Takakura
薦田憲久** Norihisa Komoda
三井善夫*** Yoshio Mitsui

1 緒 言

最近のFA(Factory Automation)では、ますます製品の多様化、製品ライフサイクルの短期化の傾向が強くなり、このためFAシステム化に当たっても、(1)運用、ライン変動に対する柔軟性、(2)部分FAからトータルFAへのシステムの拡張性、(3)FA化の進展とともにソフト専門家でなく、エンドユーザーである生産技術者が簡単に使いこなせる操作性、プログラミングレス技術、(4)製品の早期立上げのためのシステム開発期間短縮のニーズが高くなってきている。一方でFAシステム化の範囲が拡大されており、設備・機械単体の制御から運用全体のシステム化というように、従来の人間の経験・ノウハウに依存していた分野へのシステム化の進展が重要課題となってきた。これらのニーズに対してソフトウェアの面では、運用ルールのシステム化が簡単にこなせること、しかも柔軟性・拡張性に富み、エンドユーザーである生産技術者が容易に使いこなせることが要求される。

以上のような要求にこたえるソフトウェアを知識工学を応用し開発した^{1),2)}。以下、FAでの知識工学適用の考え方、知識処理形アーキテクチャSCR/SCD(Station Controller/Station Coordinator)及び適用事例について述べる。なお、SCDはEUREKA(Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation)シリーズ³⁾のマイクロコンピュータ用高速推論ソフトμ-EUREKAをFA向きに製品化したものである。

2 FAにおける知識工学の適用

FAでのソフトウェアでは、容易な運用ルールのシステム化、柔軟性、拡張性などが必要であり、そのニーズにこたえるために知識工学の応用が有効である^{4),5)}。そこで従来の方式と知識工学を適用した方式との差異について図1により考察してみたい。同図の左側はFORTRANなどの従来言語による例である。エンドユーザーが考えている内容をSE(システムエンジニア)が整理し、仕様書にまとめ、それに基づいてプログラマーがプログラム作成を行ない、テストで機能を確認した後、エンドユーザーに引き渡す。不具合やライン変更により、プログラムを変更する場合にも、再び仕様書作成以降のプロセス

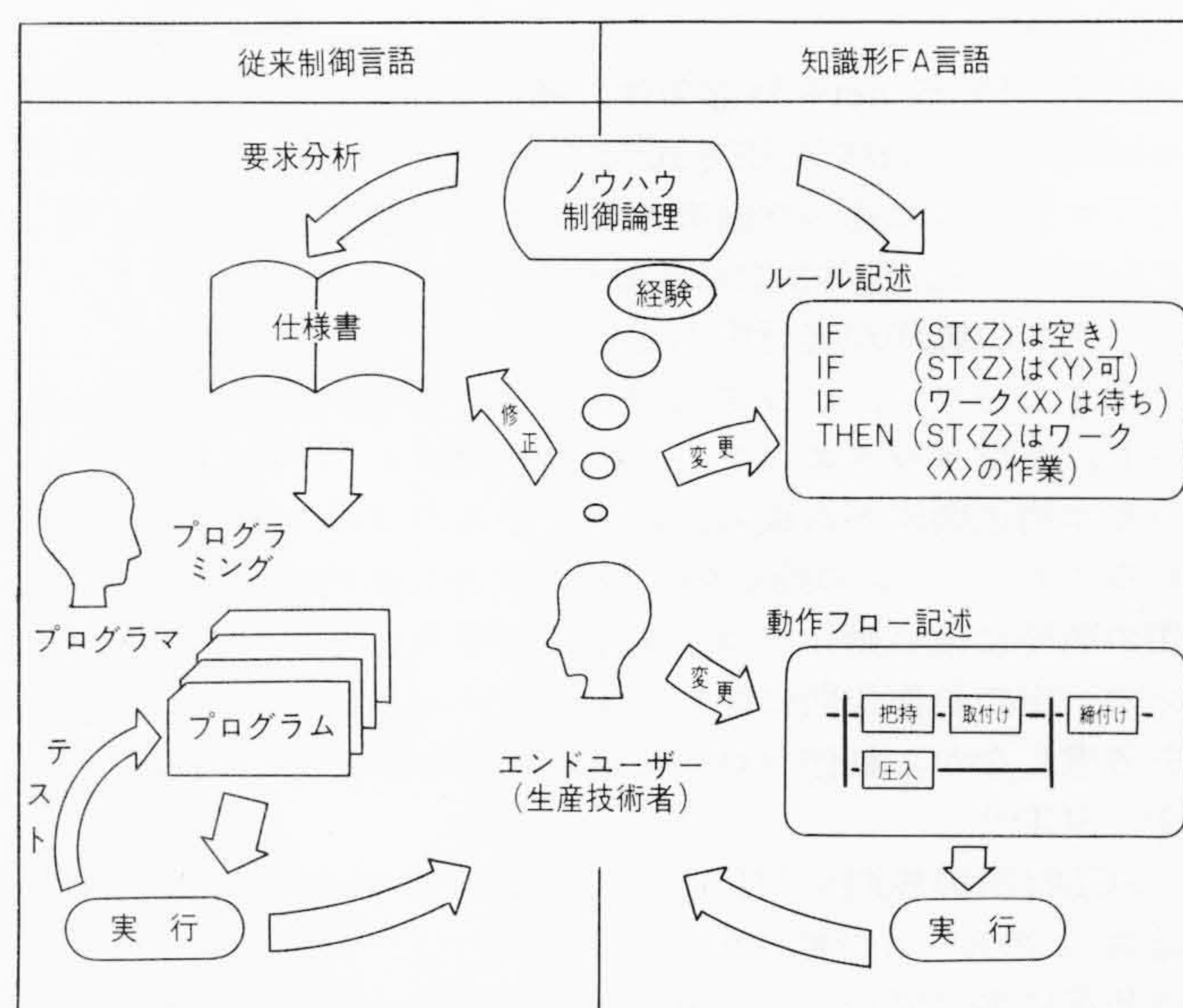


図1 従来形制御言語と知識形FA言語によるソフト作成方法比較
知識形FA言語の方式はエンドユーザーの経験、ノウハウを直接「IF、THEN」ルールや「動作フロー」により入力するもので、可視性が良く柔軟なソフトが構成できる。

を繰り返す必要がある。これに対し、知識形言語を採用すると同図の右側の例のように、エンドユーザー(生産技術者)が運用ルールを直接「IF(条件)、THEN(結果)」のルール形式又は動作フローをグラフ形式で入力してやると、後は計算機内推論機構が自動的にその時点の状況に合致した制御出力を決定することが可能となる。

このようにエンドユーザーが自らノウハウのシステム化を行なうことができ、しかも頻繁に論理の変更が必要となっても変更が容易な、柔軟で拡張性に富んだシステムとすることができる。FAではこのような運用ルールのシステム化、ソフトウェアの柔軟性強化といった用途のほか、論理の追加、変更が容易であることにより、未解明プロセスモデルのプロト

* 日立製作所大みか工場

** 日立製作所システム開発研究所 工学博士

*** 日立製作所機電事業本部

タイピング(すなわち、最初は簡易形でモデルを記述し、適用・評価し、その結果をモデルへ反映し、徐々に本格的なモデル発展させていくこと)や段階的なモデル開発に適用できる。

3 FAにおける知識工学応用ルール形制御アーキテクチャ

3.1 ルール形制御方式の概要

知識工学は対象業務の論理をプログラムフローの中から取り出し、データとして取り扱うことによりプログラムの開発・保守を容易にする方法を与えた。この考え方を柔軟なFA制御システムの実現のために導入したものがルール形制御方式である。FAシステムの制御の形態は、(1)あらかじめ動作順序が決められたもとで同期・排他制御を行なう「動作フロー形制御」と、(2)各種条件組合せで制御指令が決まる「条件組合せ形制御」の二とおりがある。前者の動作フロー的知識についてはPetri-net⁶⁾をFA用に拡張した記述法で表現できる。また後者の制御規則は、「IF(条件) THEN(結論)」ルールで表現できる。それぞれ表現形式の拡張、リアルタイム制御へ適用するための処理の高速化、信頼性、保守性の向上を図り実用化したFA用知識処理形ソフトウェアがSCR/SCDである⁷⁾。

(1) SCR

SCRはPetri-netを外部条件、繰返し作業などを扱えるように拡張したC-netを記述方式⁸⁾として採用し、C-netで記述されたプログラムに基づき制御を行なえる高速処理機構を実現したものである。具体的には、動作及び状態を表わすボックス、ボックスの動作が実行中あるいは状態が占有されていることを示すトークン、ボックス間のトークンの移動を制御するゲート、及びボックスとゲートの接続関係を示すアークの四つの基本構成要素から成る。図2に2台のロボットから構成されるステーションの動作をC-netで記述した例を示す。制御動作の順序に従い動作フローを記述してやるとゲート、トークンの一定の動作規則に従ってトークンが移動し、同期・排他を考慮しながら動作フローに従って制御が実行される。

(2) SCD⁹⁾

SCDは制御規則を「IF(条件) THEN(中間結論あるいは最終結論)」のルールで断片的に与えておけば、自動的にそのときの状況に応じてルールを組み合わせて、制御指令を自動的に決定する。ルールの適用過程の例を図3に示す。ルールのIF部の条件がシステム現況と一致するか判定し、一致した場合の

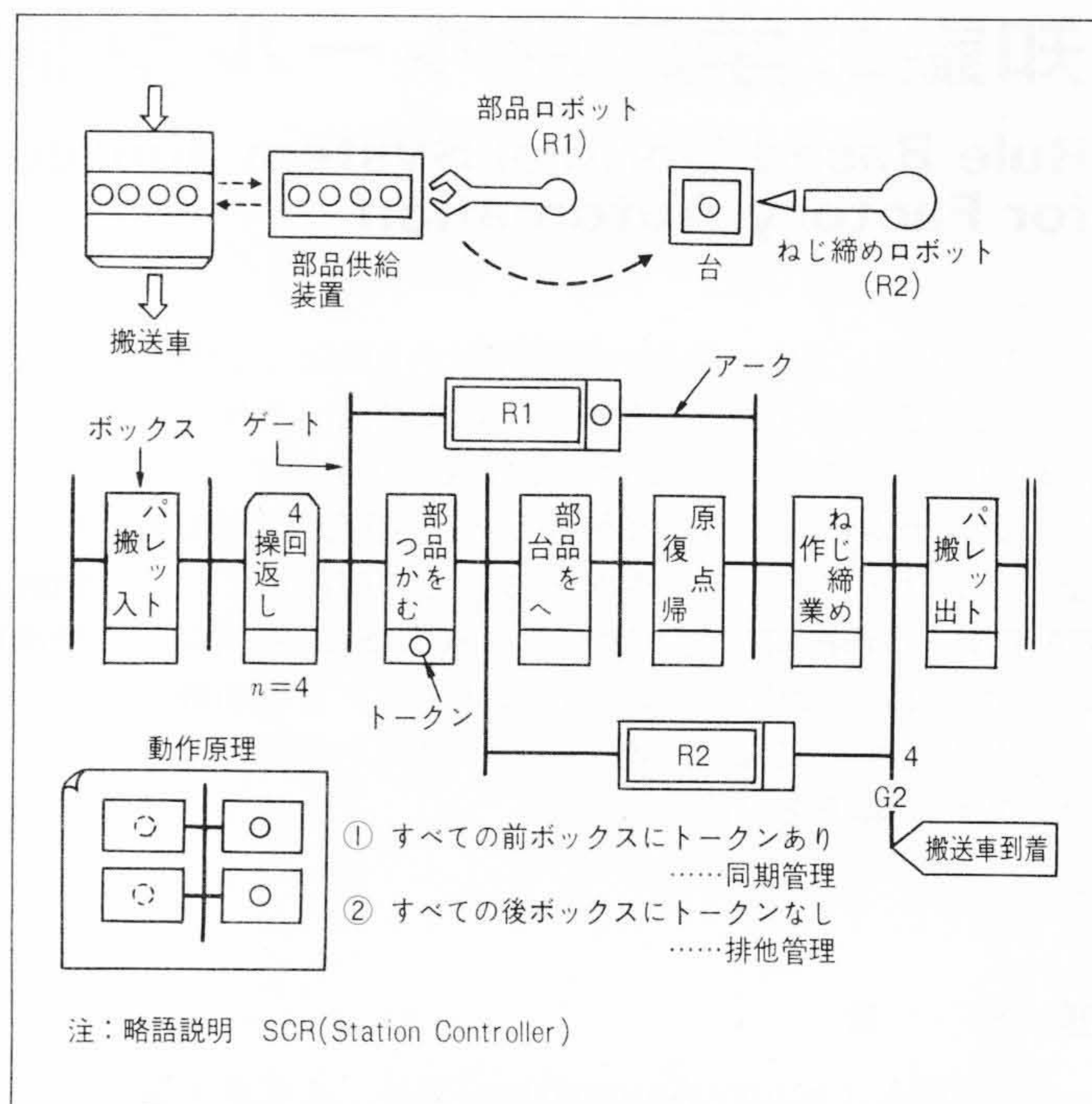


図2 SCR(動作フロー形制御ソフト)の記述例 SCRは制御動作フローをそのまま記述する。ゲート、トークンにより同期排他制御を自動的に行なう。

該当ルールのTHEN部の結論を現況として追加する。以上の処理が繰り返され、最終結論に至ると制御指令が出力される。

3.2 SCR/SCDベースシステムのアーキテクチャ¹⁰⁾

図4にSCR/SCDベースのFAシステムのアーキテクチャを示す。SCR/SCDの支援機能として会話形エディタ、実行状況のモニタ、テスト機能をもつ。SCR/SCDは核となるソフトであり、実際には周辺ソフトが重要である。すなわち、SCR/SCDへのデータ収集、提供(割込み解析、ルール制御で扱う情報の収集)、制御出力、データベースとの論理インタフェースなどである。この部分は各アプリケーションによって異なる部分も多く、各分野共通部と分野別標準パッケージとに分離し、いずれもサブルーチン形式でコマンドライブラリ登録することにより簡単にSCR/SCDから呼び出し接続できるようにし

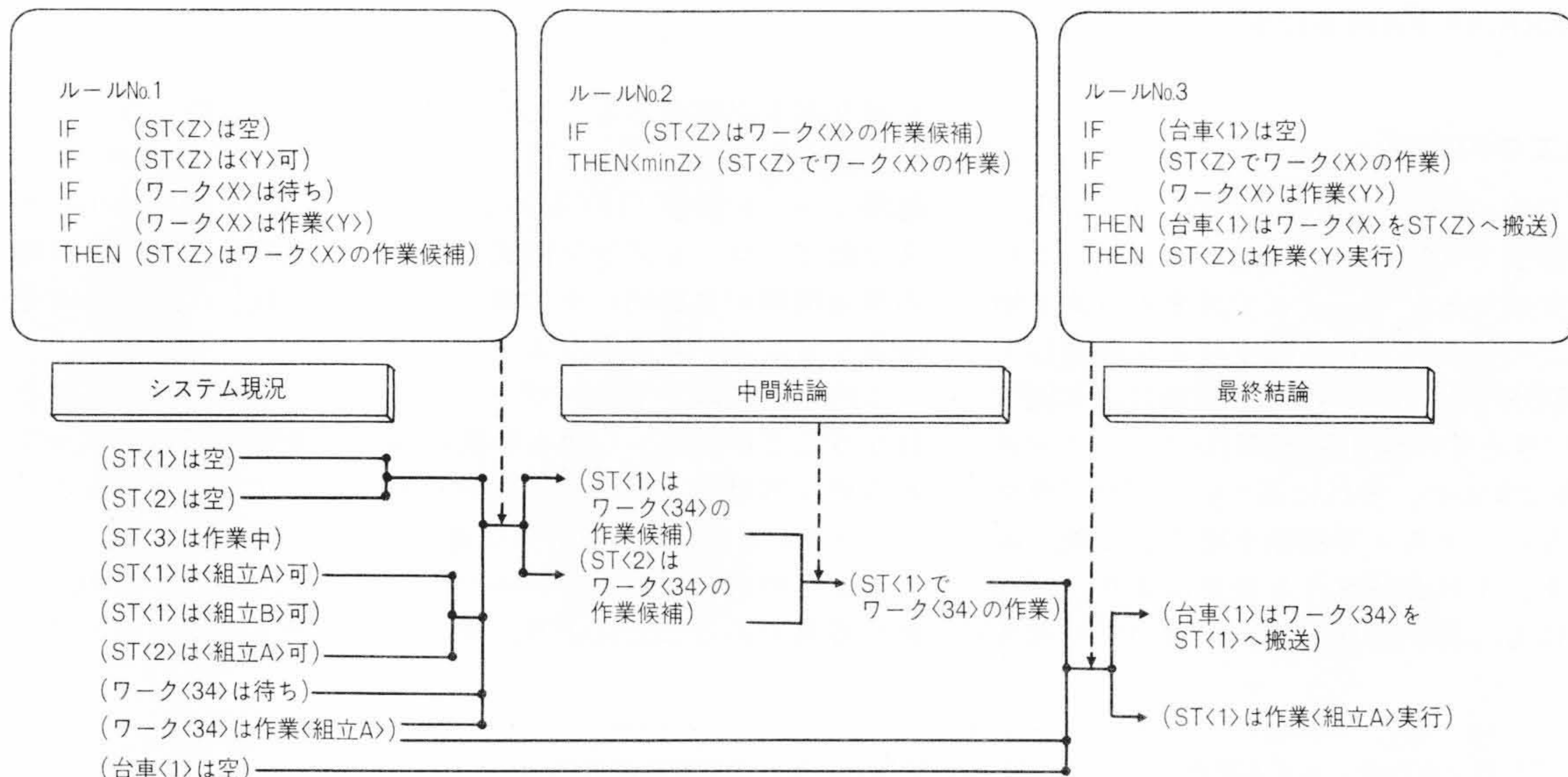
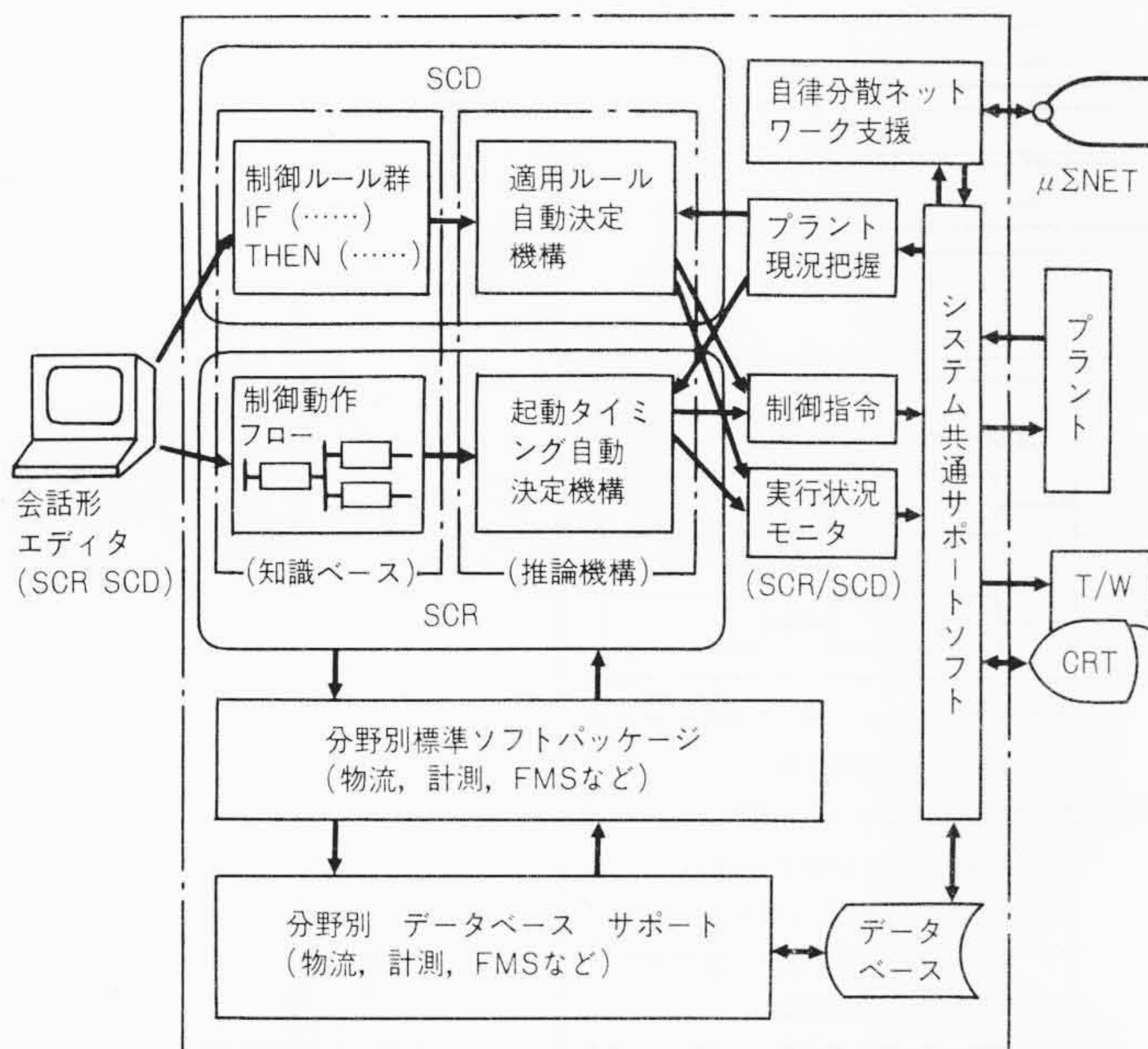


図3 SCDのルール適用過程 SCDは「IF(条件) THEN(中間結論、結果)」形式のルールを入力すると、システムの現況と合致するルールを求め、推論を進め制御出力を導出するものである。



注：略語説明 SCD[Station Coordinator(ルール型制御ソフト)], SCR[Station Controller(動作フロー型制御ソフト)], FMS(Flexible Manufacturing System) T/W(タイプライタ), CRT(Cathode Ray Tube)

図4 SCR/SCDベースのFAシステムアーキテクチャ “IF THEN” ルールや「動作フロー」をCRTから会話形で入力することによりソフトが作成可能である。制御出力処理、データベースアクセスは分野別標準パッケージによりサポートする。

た。これにより、ユーザーがSCR/SCDの会話形エディタベースでソフトシステムを構築することが可能となった。

SCR/SCDはFAシステム全般に適用可能である。特にSCRは順序制御に適しており、例えば機械加工、組立てラインでのロボット、NC(数値制御)マシンの群管理、搬送ライン、倉庫などの工場内物流など、動作順序を制御する分野では設計、保守両面に大幅な生産性向上が図れる。一方、SCDは搬送系の最適運用モデルのように、ヒューリスティックな手法によりアルゴリズムを手続き形言語でプログラム化していた分野、しかも現場の生産事情の変化に応じ、頻繁にアルゴリズムを変更しなければならない分野でソフトの保守性、生産性向上という点で大きな効果を発揮する。すなわち、人間のノウハウ、経験を手続き形言語で記述することはプログラム容量が大きくなり、また論理がプログラム内に埋没するために極めて固く、保守性の悪いソフトになりがちであるが、SCDによれば、論理(ルール)とプログラム(推論機構)が分離されるため、記述量が減り、見やすく保守性に優れるということである。

SCR、SCDは当然両者を組み合わせて使うことも可能である。

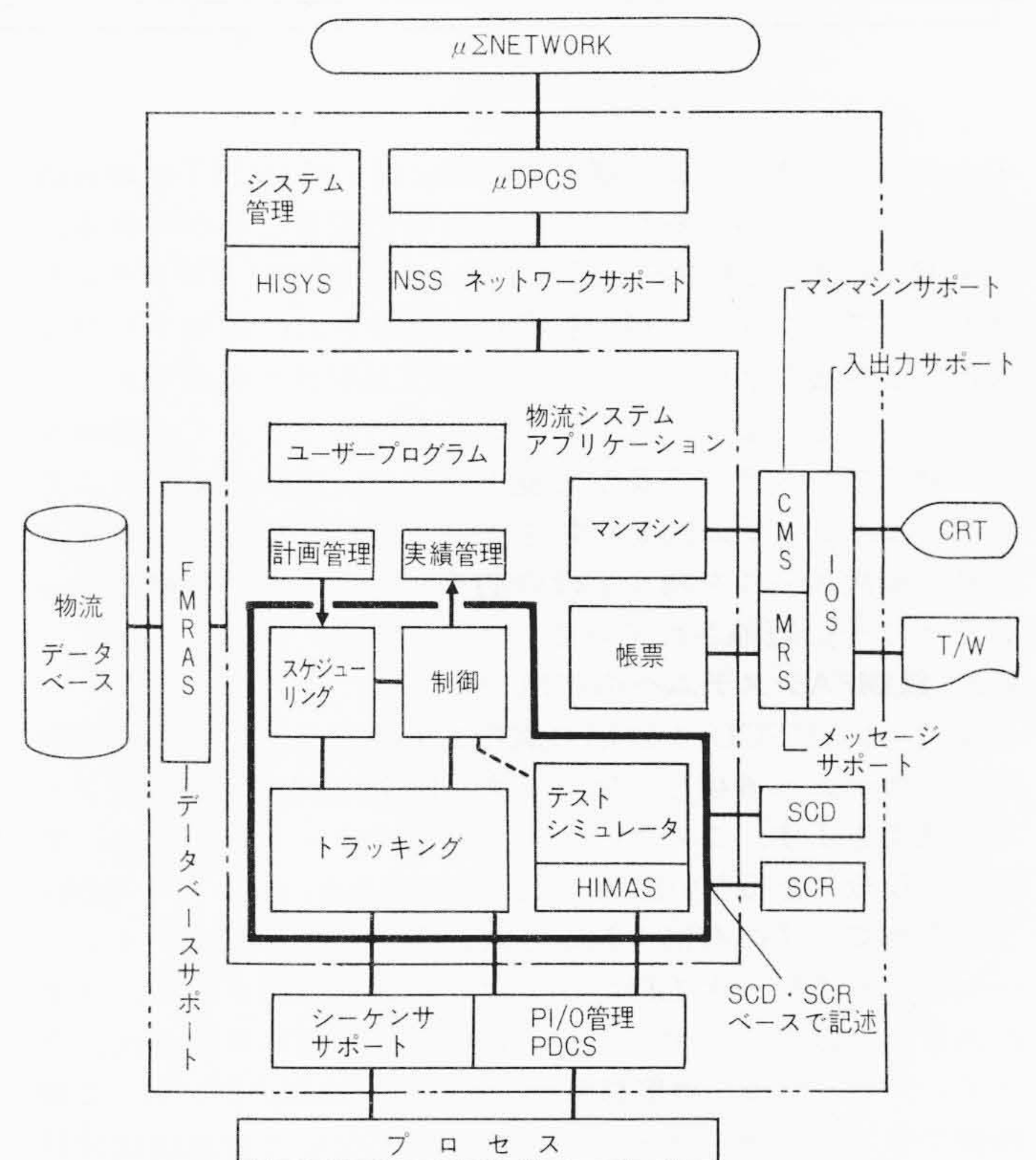
4 適用事例

4.1 物流FAシステムへの適用

SCR/SCDの代表的適用例として自動倉庫、無人搬送車から構成される工場内物流システムの例が挙げられる。このプロセスは自動倉庫のスタッククレーン、台車、コンベヤ、各ワークステーションへの物の搬送を行なう無人搬送車、トランスファマシンなどが制御対象となっている。製品の生産事情によりラインがしばしば変わることがあり、システム化に当

たっては柔軟性、拡張性を考慮した設計とする必要がある。図5は物流FAシステムのソフト構成を示したものであるが、設備、機械の制御、物の位置と情報を対応づけるトラッキング、設備・機械の効率的運用を行なわせるスケジューリング、テスト用シミュレータといった制御にかかわる中心機能(全体の約40%)はSCR/SCDの適用対象である。その他のマンマシン、帳票などの情報処理部分(全体の約60%)はソフトパッケージ化により対応しており、SCR/SCDの対象外としている。

具体的なSCR/SCDベースの設計については図6にその例を示す。従来、物流制御システムの設計手順は、まず設備フローを明確にし、次に物の移動と情報を結びつけるトラッキングゾーンを設定し、その上で物の移動に従い制御プログラムを作成する。SCR/SCDを用いると同図に示すように、トラッキングフローを作成した後、物の移動に対応してそのときの制御内容を動作フローの形でCRT(Cathode Ray Tube)からの会話形で作成することができる。各ボックスはトップダウンで階層的に表現できる。最終段の処理ボックス内の制御指令コマンドは、標準のサブルーチンとしてあらかじめライブラリ登録しておくことができる。一連の動作フローの中での最適移動先決定論理などのアルゴリズムが必要となる部分(例えば搬送台車からのコンベヤに物を移動すべきか?)については、過去の経験をベースにした運用ルールをIF、THENの



注：略語説明 FMRAS(File Management system by Realtime Advanced Software) NSS(Network Support Subsystem) HISYS(HIDIC System manager) μDPCS(Distributed Process Control System for μΣNetwork) CMS(CRT Man Machine Support Subsystem) MRS(Message and Report Support subsystem) IOS(Input Output Support subsystem) PI/O(Process Input/Output) PDCS(Process Data Control System)

図5 物流FAシステムのソフト構成 物流FAシステムの中核は制御、スケジューリング、トラッキングであり、この部分(全体の40%)はSCR/SCDベースで記述する。他は物流パッケージソフトでサポートする。

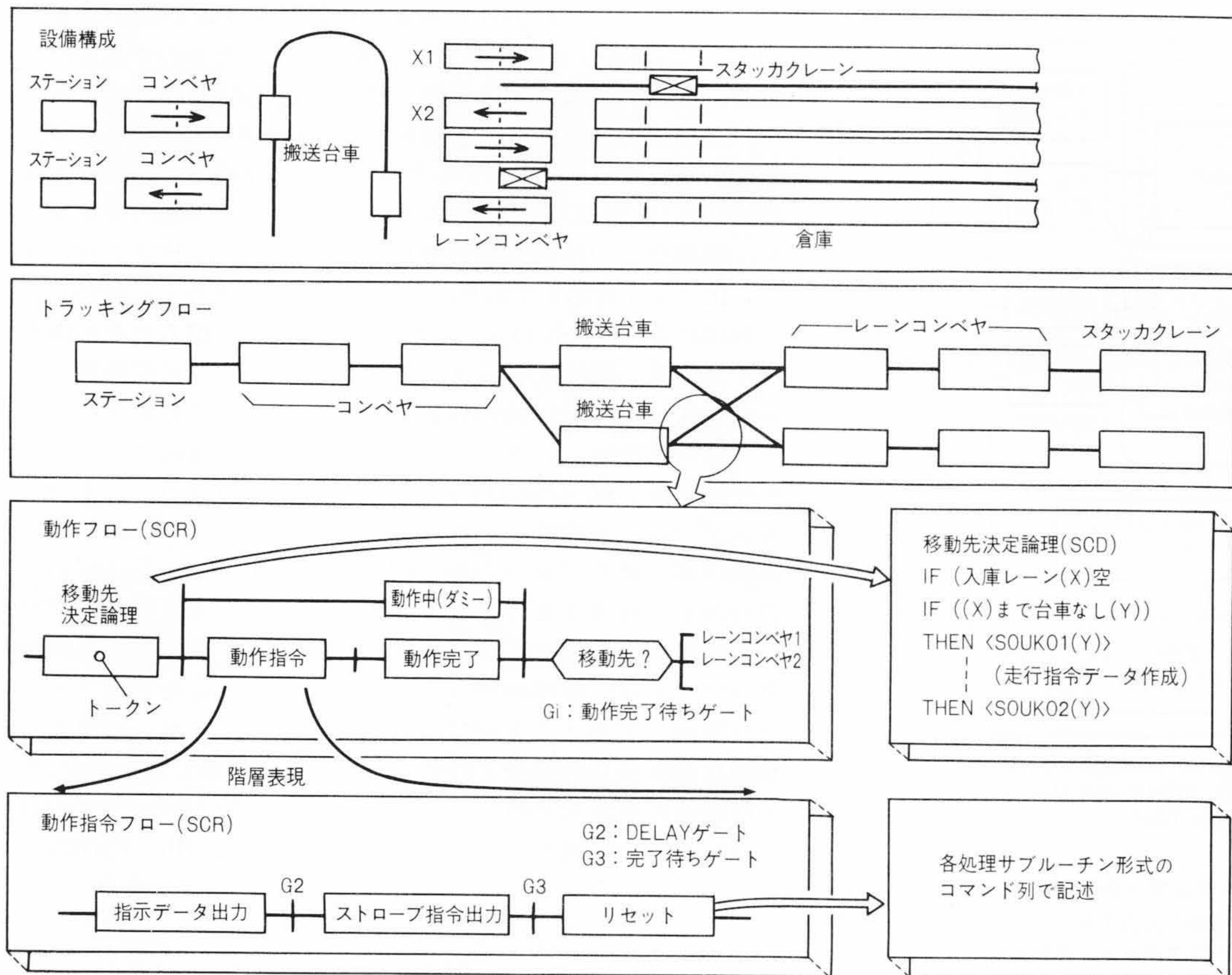


図6 物流FAシステムのSCR/SCD適用例 設備構成に対し、トラッキングフローを明確にし、個々の制御はSCRで記述、経験則適用の論理はSCDで記述可能である。最終段の処理はサブルーチンライブラリに接続される。

ルール形で記述できる。運用の変更に対してもCRTから会話形でルールを変更するだけで柔軟に対応することができる。

SCR/SCDを使用すると従来手続き形言語ではプログラムを複雑化していた同期・排他制御から解放され、運用アルゴリズムなど複雑なプログラムもIF、THEN形式の簡単なルールでできることにより、プログラムの専門家でなくても簡単かつ短時間でシステム構築が可能となった。実際のシステムでの例では、システム開発工数を $\frac{1}{2}$ に、現地調整工数も変更が容易で順次ルールを増やす段階的チューニングが可能となったことで $\frac{1}{2}$ に短縮されている。

4.2 鉄鋼FAシステムへの適用^{11),12)}

ルール制御(SCD)を鉄鋼の鋼片工場精整ラインの設備自動運転システムへ適用した例を示す。図7に鋼片工場精整ラインの概要を示す。このラインは圧延後のビレットの検査、手入れ、仕分けを行ない出荷するラインである。ビレットはNo.1探傷機できずの有無を判定され、きずがなければラインテーブルを直進し、次工程の仕分けラインへ搬送される。きずがある場合はラインテーブルから移載機で台車に移され、グラインダ手入れ後、再度移載機でテーブルに戻され、No.2探傷機できずの有無をチェックされ、きずなしとなれば仕分けラインへ、きず削り残しあればNo.4グラインダへ戻され再手入れされる。このように移載機、台車、グラインダなどの複数の設備を有効に活用し、効率的な手入れ業務を行なう必要がある。手入れライン自動運転のアルゴリズムを従来の手続き形プログラムで作成すると、経験、ノウハウのプログラム化のため、条件も多く、複雑であり、通常3,000~4,000ステップの大きなプログラムとなる。更に運用ルールがプログラムの中に埋没するために保守性の点でも難点が多く、後の設備や運用ルール変更時に苦労することが多い。これに対し、SCDを適用した例を、図8に、ルール群の全体構成を

9に示す。全体ルール数は260ルールであり、記述量は手続き形言語の場合と比較し約 $\frac{1}{10}$ となっており、しかも日本語であり、可視性が優れ、設備、運用の変更時にも簡単に対処できる極めて保守性の高いソフトウェアとなっている。

SCDをリアルタイムシステムで使う上で問題となる応答性についても、本システムの例はV90/50のハードウェアの下で動作しているが、1.2ms/ルールであり、最大ルール数/回も図9で分かるように約50ルール程度に抑えこむことにより、1回のイベント発生時の処理時間も60msで応答しており、制御

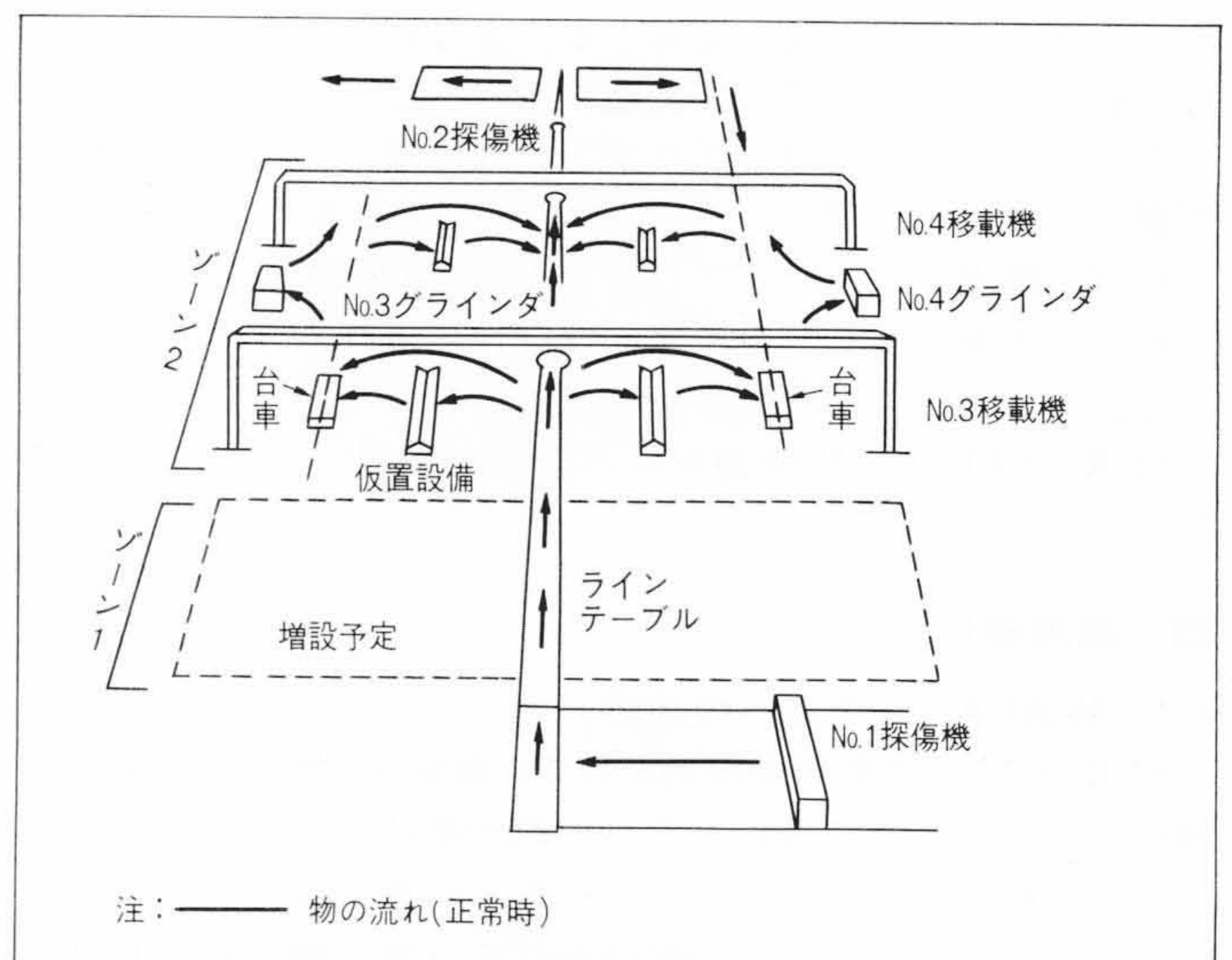


図7 鋼片工場精整ラインの概要 No.1探傷機で探傷した後、きずの有無によりグラインダ、移載機を用い、効率的な手入れを行なう必要がある。



図8 手入れラインに適用したルールの例 ルールは日本語で記述が可能である。

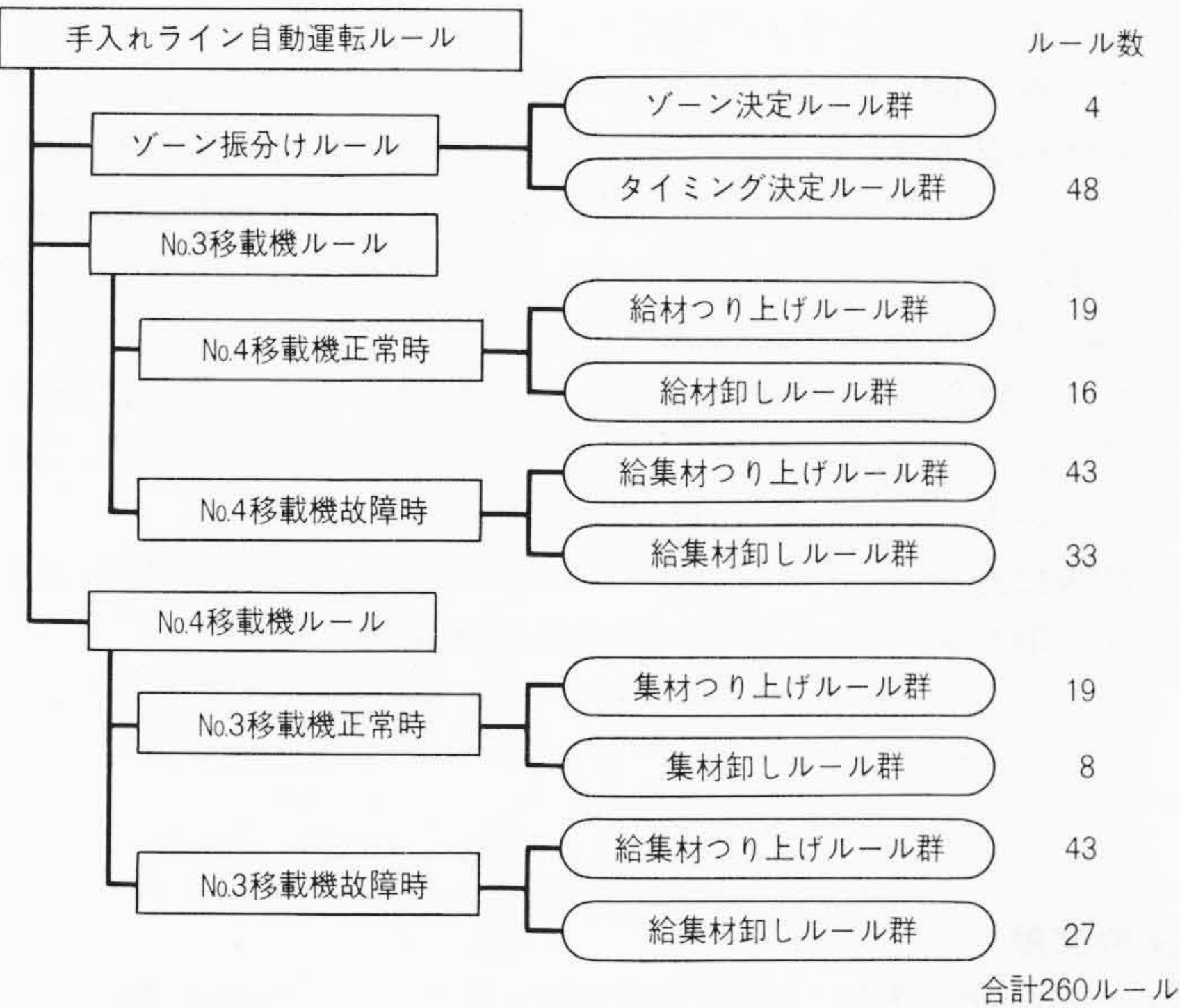


図9 手入れラインに適用したルール群の構成 合計260ルールであるが、ルールは10のグループに分割し、それぞれ最大でも50ルール程度に抑えた。これにより1回の処理時間60ms/回となり、リアルタイム処理性を十分満足している。

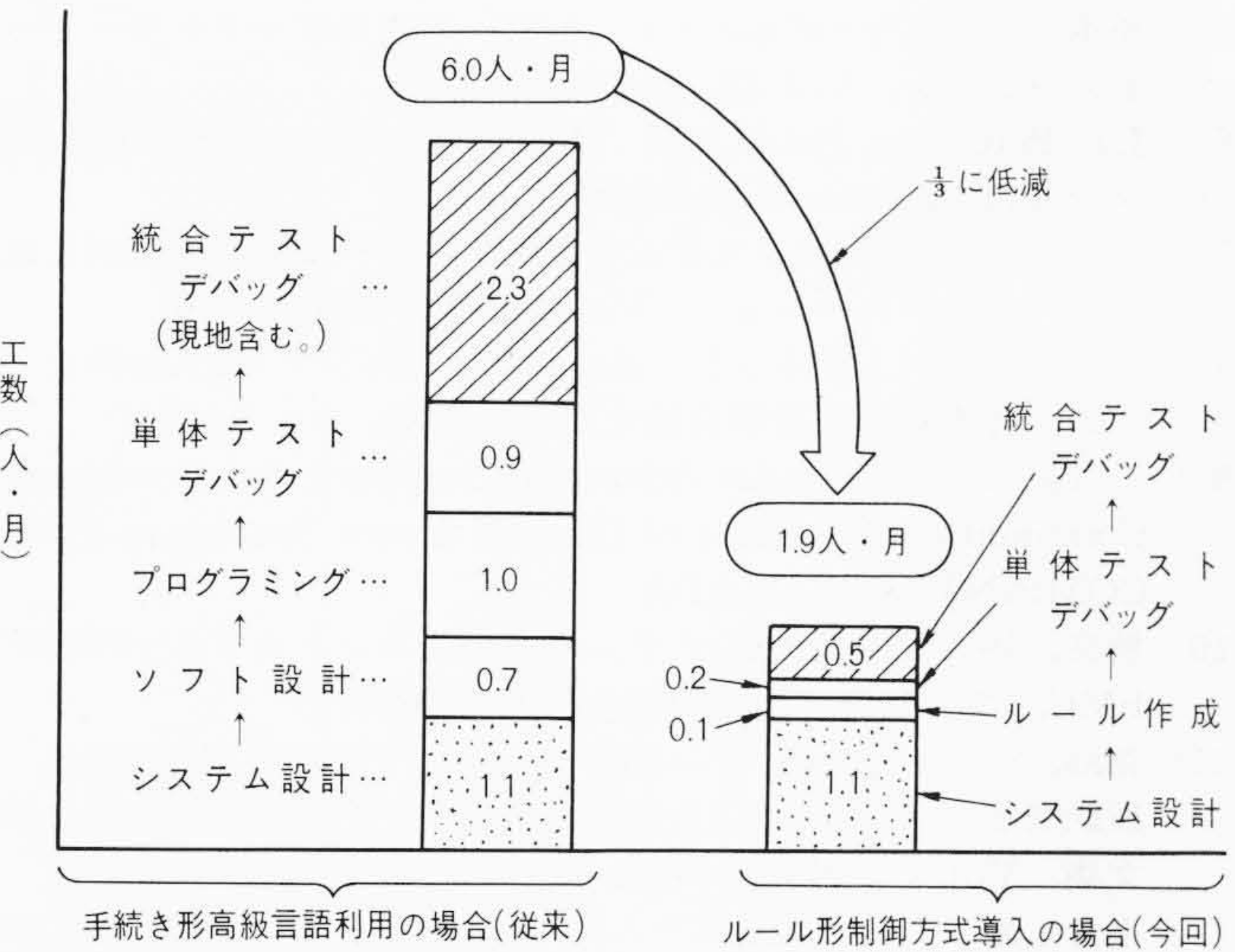


図10 ソフト開発工数低減効果 従来の手続き形言語の場合と比較し、システム設計は不変であるがプログラム製作テストで差があり、全体としては工数は1/3に低減された。

実行上問題とならない。V90/5システムでも別の例で10ms/ルールとなっており、搬送系など500ms～1s程度の応答時間を確保すればよい分野では十分実用に耐えることが証明された。ソフトウェアの生産性については図10にソフト開発工数低減効果を示す。システム設計は従来方式と変わらないが、ソフト設計から総合テストに対しては圧倒的な効果があり、本システムの例では約1/3(従来比)となっている。

以上述べたデータは本プラント建設当初のものであるが、その後図7に示すゾーン1の増設が完了し、現状総ルール数はユーザーの手で528ルールまで拡張されている。この過程でシステム拡張時での本制御方式の柔軟性が、エンドユーザーにより立証された。

4.3 パッケージ組立FAへの適用¹³⁾

プリント板にICなどの各種素子を挿入し、製品パッケージを作成するプロセスの自動化では、各種インサータを無人搬送車で結ぶシステムが採用されることが多い。これらのシステムは、多様な種類のパッケージを混在して流す典型的な多種少量生産システムである。

専用マガジンに入れられたプリント板は、作成すべきパッケージごとに決められたインサータに順次無人搬送車で運ばれ、所定の素子を装着し、製品となる。インサータは同時に装着できる素子の種類は100前後に限られているため、一つのインサータが処理できる作業の種類は限定され、生産計画に合わせて変更される。このため、パッケージごとの搬送経路は頻繁に変更される。また、製品の切替、作業量に応じたインサータの追加、休止なども行なわれる。更に、特急処理、優先処理、点検時運転などの特別な要求も多い。

このようなシステムの制御では先に述べたような頻繁な変更に伴って搬送制御論理を容易に追従できるようにするため、ルール形制御SCDが有効に利用される。この場合、SCDは搬送車コントローラからのホームポジション到着報告、インサータからのマガジン有無などの作業状況、及び生産要求をベースに、図11のようなルールを動かし、結論として無人搬送車に行先指示を送るとともにインサータ側に作業種類指示を行なう。

同様の搬送車のルール形制御は、ロボットを中心としたワークステーションを無人搬送車で結ぶようなFA組立ショップ

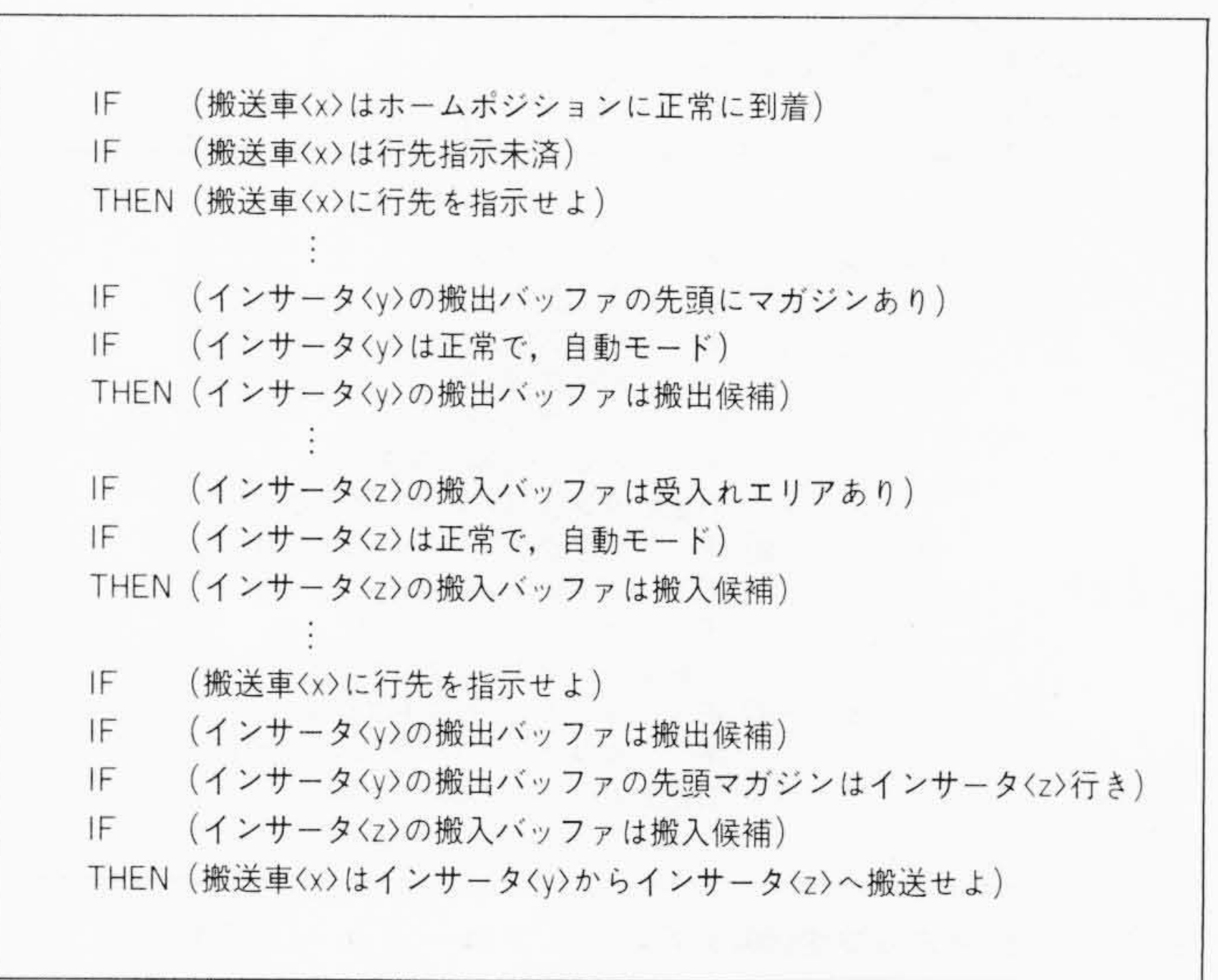


図11 パッケージ組立てFAラインのルール適用例 ルールは「IF(条件) THEN(結果)」形式で記述する。

の制御にも有効に適用できる。

4.4 その他の応用事例

ルール形制御方式は、ソフトの変更が容易でしかも論理の適用過程を専門家に提示できるので、専門家が容易に論理の不備を見つけることができる。この特徴を生かすことにより、上記のような適用分野以外にも、次のような応用が考えられる。

(1) ラインアップ制御

化学プロセスの後工程である製品の輸送シーケンスでは、輸送元から輸送先へのルートを選択し制御する必要があるが、輸送元タンク、輸送先タンクが多くなるとルートの組合せは数百～数千にも及ぶこと、ルートの競合、機器の故障、タンクの状態をそのつど判断し最適なルートを選定しなければならないことなどから、その制御ソフトは非常に複雑なものとなる。また、このようなプロセスではタンクの追加、ラインの変更などプロセスの改造は容易にできるため制御ソフトの実現を更に難しくしている。これに対し本制御ソフトをSCDで作成した場合、入力と出力の関係が一義的に定まる単一制御モジュール単位にIF～THENルールで入力、出力の関係を記述しておくだけでよく、単一モジュール間の組合せはSCDが自動的に行ない、結果として所望のルートが確立するため作成量が少なくて済む。更には、プロセスの変更があった場合でも、変更となったプロセスに関する部分だけの制御モジュールに対するルールを追加、変更するだけで容易に制御ソフトの改造に対応できることになる。輸送工程にSCDを適用した簡単な例を図12に示す。

(2) プロセス特性の未解明なプラントの制御

このようなプロセスの制御は現在あまり自動化されておらず、熟練したオペレータにより運転されている場合が多い。

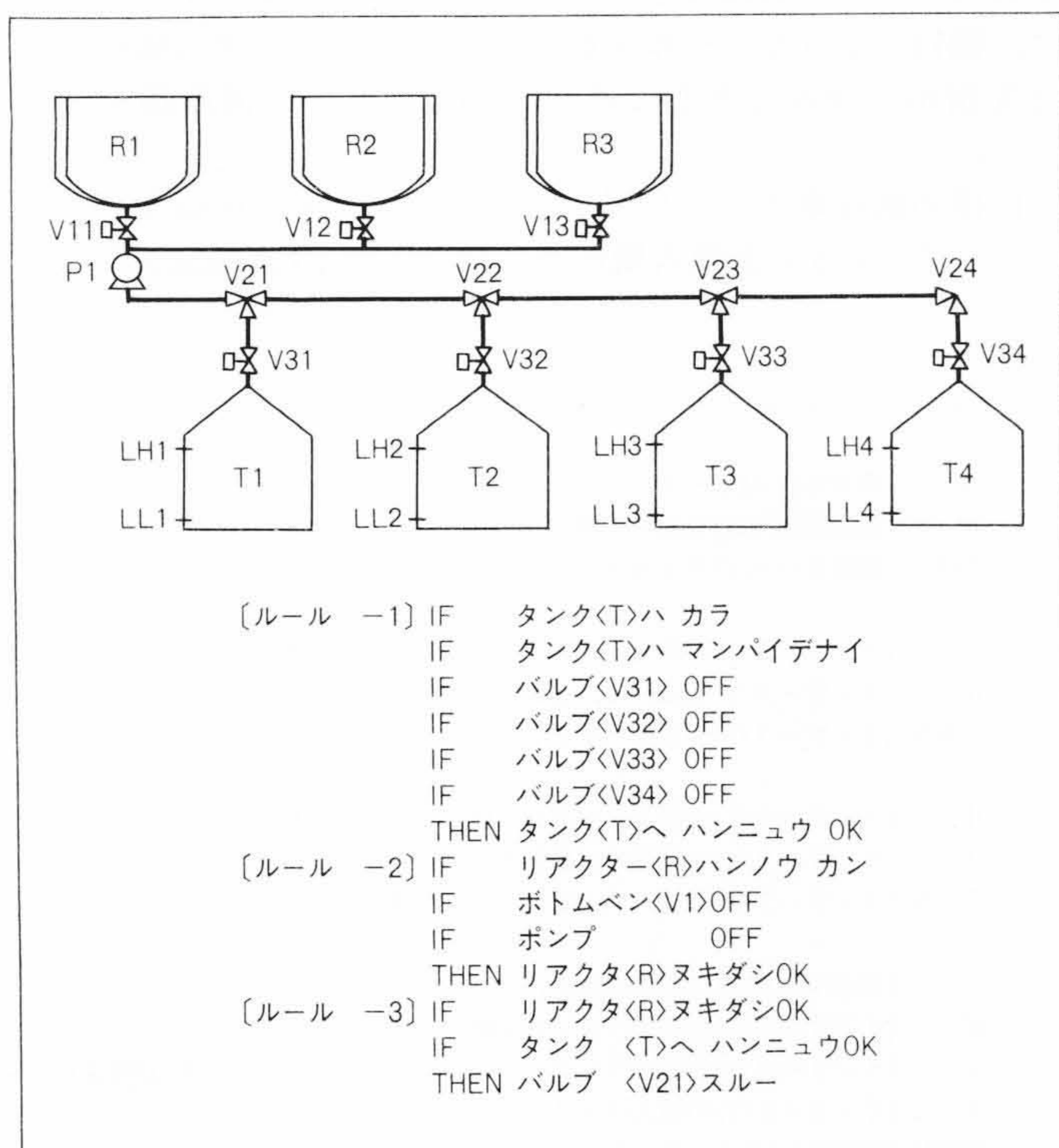


図12 ラインアップ制御のプロセスフローとルール適用例 化学プロセスの後工程である製品の輸送シーケンスでは、輸送元～輸送先のルートが多く、この組合せは膨大な数値となるが、ここにSCDを適用するとシンプルな設計が可能となる。

このオペレータのもつ運転ノウハウは、オペレータ自身でも整理されていないので、一度に完全な仕様として完成させることは非常に難しい。

また、パイロットプラントのような場合、運転方案自体の開発が目的であるので、制御ソフトに対する仕様は本質的に事前に決めることはできない。従来のソフト開発方式は、このような試行錯誤的なアプローチが要求される場合、抽出されているノウハウの何が問題なのか分からない、頻繁なソフト改造が必要、などのためうまくいかない。これに対し、ルール形制御方式は先に記したように、このような試行錯誤的なアプローチに適している。

5 結 言

FAでの知識工学応用についてルール形制御方式としてのSCR/SCDベースの知識処理形アーキテクチャ、及びその適用事例について述べた。事例では主に物流、搬送系の運用アルゴリズムのソフトウェア化について、ルール形制御方式が可視性、保守性に優れる極めて柔軟なソフトウェアとしてその有効性が実証された。物流系、搬送系以外でもFAでの未解明プロセスのモデル化などへ適用可能である。知識工学についてはまだ緒についたばかりであるが、その有効性からFAでの新しいソフト体系として適用拡大が期待される。

なお、鉄鋼FAシステムへのルール形制御方式の適用に当たっては、その適用及び評価について川崎製鉄株式会社殿に御協力をいただいた。ここに厚く御礼を申し上げる。

最後に今後共ユーザーニーズに合ったFAシステム開発に積極的に取り組んでいきたいと考える次第である。

参考文献

- 1) 松本, 外: FAにおける自律分散システム, 日立評論, 65, 12, 823～828(昭58-12)
- 2) N. Komoda, et al.: An Autonomous Decentralized Control System for Factory Automation IEEE COMPUTER (December, 1984)
- 3) 増位, 外: 知識処理のための推論ソフトウェア, 日立評論, 67, 12, 939～944(昭60-12)
- 4) 井原: 知識工学の産業への応用, 電気学会, 昭和58年3月号
- 5) 松本: 知識工学のFAシステム制御への適用ファクトリーオートメーション, Vol. 12, No. 7(昭59-7)
- 6) J. L. Peterson: Petri Net Theory and the Modeling of Systems, Prentice Hall(1983)
- 7) 薦田, 外: 分散FAシステムを実現するルール型制御技術と適用例, オートメーション, Vol. 29, No. 10(昭59-10)
- 8) 村田, 外: ペトリネットに基づく高フレキシブルFA制御システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 9(1984)
- 9) T. Tashiro, et al.: An Advanced Software for Constraint Combinational Control of Discrete Event System in Proc. COMPINT '85, CANADA
- 10) 解良, 外: 分散型FAシステム用高機能コントローラーHIDIC FMC, 情報処理学会第30回全国大会(昭60-3)
- 11) 都島, 外: 流れ作業ライン制御へのルール型制御方式の適用ー製鉄所ビレット精整ライン制御への適用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No. 10(昭60-10)
- 12) 高倉, 外: 自動運転システム, オートメーション, 第30巻, 第5号(昭60-5)
- 13) 都島, 外: FA搬送制御方式の提案とそのルール記述の試み, 電気学会東京支部大会(昭58-11)