

TM-0959

深い知識に基づく制御用エキスパート
システム —操作条件生成機構の開発—

小沼 千穂、鈴木 惇三、岩政 幹人、
神谷 昭基 (東芝)

October, 1990

© 1990, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

深い知識に基づく制御用エキスパートシステム — 操作条件生成機構の開発 —

※小沼千穂・鈴木淳三・岩政幹人・神谷昭基**
(株) 東芝 システム・ソフトウェア技術研究所・府中工場**

1. はじめに

火力発電プラントの制御を対象とした、経験的知識に基づく従来のエキスパートシステムでは、予期できない不測の異常に対して無力であるという問題点が指摘されている。このような問題点に対して、我々は深い知識に基づく制御用エキスパートシステムについての検討を行ってきた [1,2,3]。

図1に、本システムの全体構成図を示す。不測異常が発生すると、異常時推論機構の起動により、プラント構成機器の機能、構造、プラント動特性に関する知識（対象モデル）と運転上の制約条件に関する知識（運転原則）からなる深い知識を基に、不測異常を回避するために必要な制御知識がダイナミックに生成される。各部の概要については[3]で述べられている。

本報告では、斜線で示した操作条件生成機構について述べる。

2. 操作条件生成機構の概要

操作条件生成機構は、操作同定機構により生成された不測異常を回避するプラント操作列に対して、プラントの現在の状態（初期状態）を基にして、操作を実行するために必要な全ての条件を生成し、経験的知識に相当するIF-THEN型の制御知識を生成する機構である。

図2に操作条件生成機構のシステム構成を示す。本機構は、4つの機能モジュールと、それらの推論を制御する推論管理モジュール、及び深い知識である対象モデルが

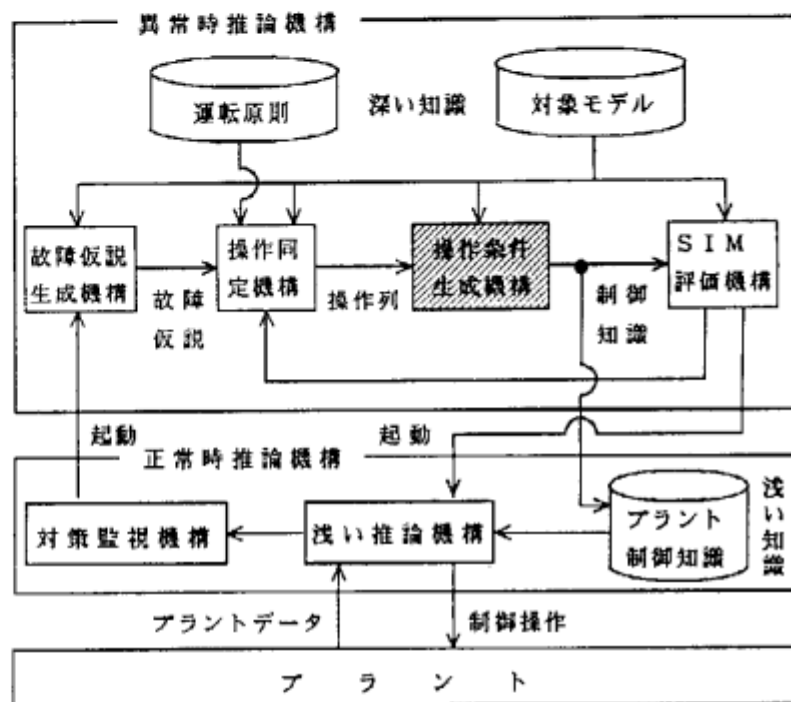


図1 制御用エキスパートシステム全体構成図

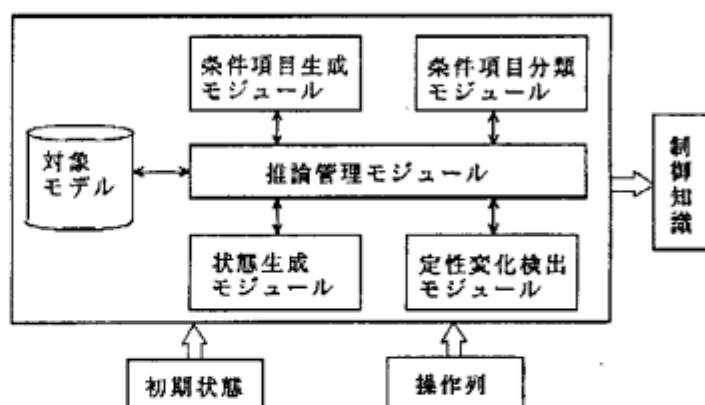


図2 操作条件生成機構システム構成図

ら構成されている。各機能モジュールは、対象モデルに記述されたプラント機器の接続関係、パラメータ間の定性関係式、プラント操作情報などを利用して推論を行う。対象モデル、及び各モジュールの機能については4章、5章において詳説する。

3. プラント操作の一般的条件

我々は、火力発電プラント操作に関する条件を、5種類の一般的条件として整理した。以下では、各条件の意味について説明する。

条件1：操作対象機器の状態を確認する条件

操作実行前に、対象機器の状態が操作前の状態にあることを確認する条件である。本条件は操作の重複による無駄を回避するとともに、何らかの影響により機器に生じた状態変化に対して、操作を実行不可能にする条件である。

条件2：操作順序を保証する条件

プラント制御においては、設計指針に基づくヒューリスティックから、操作はプロセスフロー（例えば水の流れ）に基づいて順序づけされており、本条件はこのような操作順序を保証する条件である。

条件3：安全を保証する条件

操作の実行によるプロセス変化は、機器間の接続関係を通して伝播する。本条件はプラントの安全性を考慮して、機器の構造や機能等から制約される、内部のプロセスパラメータに関して、許容量をオーバーしないように規定する条件である。

条件4：操作タイミングを決定する条件

操作は、各機器に与えられた出力要求量を満足する状態への遷移として導出される[1,2]。本条件はプラントの運転効率を考慮し、最小限必要な要求量のみを確保できるように、操作を実行する最適なタイミングを決定する条件である。

条件5：操作の完了を確認する条件

操作の実行後、操作が正しく実行されたか否かを確認する条件である。

4. 深い知識

本章では、操作条件を生成するために必要な深い知識である対象モデルについて述べる。対

象モデルは、各プラント構成機器ごとに定義され、スロットと値の組で表現されている。

図3に冷却水ポンプに関する対象モデルを示す。

```
[c_cwp,  
[status,off],  
[parameter,[[c_cwvif,5]]],  
[flow_in,[[[c_cwpif],c_cwp_screen],  
[[c_cwpsif],c_cwp_ps]]],  
[flow_out,[[[c_cwvif],c_cwp_valve]]],  
[system,[[[]],c_cwp_unit]]],  
[comp, []],  
[capa,[[c_cwvif,situation]]],  
[operation,[[[off,on],5,[[δ c_cwvif,+]]],  
[[on,off],5,[[δ c_cwvif,-]]]]],  
[situation,[[on,[[c_cwvif,615]]],  
[off,[[c_cwvif,0 ]]]]],  
[maximum,[[[]]]],  
[minimum,[[[]]]],  
[quantity,[[c_cwpif,[equ,c_cwvif]]]],  
[quality,[[δ c_cwpif,[equ,δ c_cwvif]]]]]
```

図3 冷却水ポンプの対象モデル

機能に関する知識としては、機器の状態 (status)、制約プロセスパラメータの許容量、及び操作による変動量 (maximum、minimum)、最大容量 (capa、situation)、プロセス間の定量関係 (quantity) 等がある。構造に関する知識としては、プロセスフローの入出力に関する接続関係 (flow_in、flow_out)、階層機器関係 (comp、system) 等がある。プラント動特性に関する知識としては、操作時間及び操作による主要プロセスパラメータの定性変化 (operation)、プロセスパラメータの最大変化率 (parameter)、プロセス変化に関する定性関係 (quality) 等がある。

5. 条件生成メカニズム

本章では、図2に示した各モジュールにおける条件生成処理メカニズムについて説明する。

(1) 状態生成モジュール

状態生成モジュールは、各プラント操作に対して、その操作を実行する直前のプラント状態を生成する。前述した通り、操作はプロセスフロー順で実行される。よって図4に示す通り、

機器2に対する操作直前のプラント状態は、プロセスフローに対する入力側の機器3の状態が操作実行後の状態で、出力側の機器1が未操作の状態である。

状態は、対象モデルのstatusスロットに記述された初期状態と概略操作列の順序に基づいて生成する。

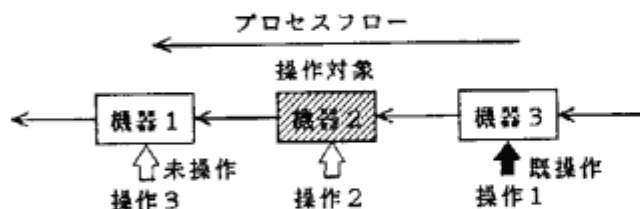


図4

(2) 定性変化検出モジュール

定性変化検出モジュールは、プロセスパラメータに関する条件の記述形式（不等号の向き）や、条件値を決定するために利用される各操作によるプロセスパラメータの定性変化を決定する。

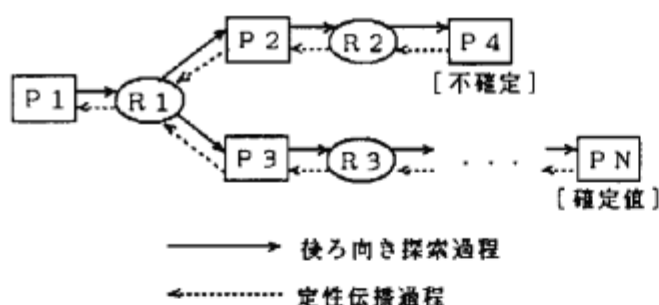


図5 定性検出処理

定性変化は、図5に示すように、条件となるプロセスパラメータ（P1）に関して定性関係式（R1、R2・・・）をたどることによって関連パラメータの定性変化を後ろ向きに探索し、操作に直接依存する主要なプロセスパラメータ（PN）の確定値（operationスロットに記述）を、前向きに伝播することにより決定する。パラメータ間の定性関係は、機器の接続関係（system、comp、flow_in、flow_out）と各モデルに定義された定性関係式（quality）によって推論する。探索のリーフにおいて定性変化が不確定なプロセスパラメータ（P4）については、

主要なプロセスパラメータとの依存関係がない、すなわち操作による影響がないことから定性変化を[0]と仮定して、条件となるプロセスパラメータの定性変化値を計算する。

(3) 条件項目生成モジュール

条件項目生成モジュールは、上記（1）（2）のモジュールから得られる結果に基づいて、3章で述べた5種類の項目に対応する条件を生成する。

生成される条件は、満足すべきプラント状態を規定するものであり、マクロなレベルで機器の状態（ON/OFF等）を規定する条件と、プロセスパラメータに関する制限を規定する条件がある。この時本モジュールは、操作対象機器を中心とする局所的なプラント状態、つまり操作対象機器自身とそれに隣接する機器（並列機器を含む）の状態から条件を生成する。

図6に条件項目生成処理フローを示す。

3章の条件5は、操作知識に基づいて容易に生成できる。

条件1、条件2については、状態生成モジュールにおいて生成された操作直前の状態を基に容易に生成できる。並列機器は、対象モデルに記述された階層関係（system、comp）から決定でき、入力側機器は接続関係（flow_in）から決定できる。

また、条件3は、特に入力側機器に関連した制約プロセスパラメータに関して生成される。これは、操作による出力側機器への影響の評価が、既に操作同定部において行われているためである[1,2]。条件形式は、定性変化検出モジュールにおいて決定された定性変化を基に決定され、許容量と変動量（maximum、minimum）から条件値が算出される。例えば、制約パラメータの値が操作により増加する場合は、その増加分を考慮して操作により許容最大量を越えることがないように条件が生成される。すなわち条件は以下の通り生成される。

定性変化 = [+] の場合

$$\text{パラメータ} \leq \text{許容最大量} - \alpha$$

α : 操作によるプロセス増加量

定性変化 = [-] の場合

$$\text{パラメータ} \geq \text{許容最小量} + \alpha$$

α : 操作によるプロセス減少量

最後に、条件4は操作対象機器の出力プロセ

スパラメータに関して生成される。図7に示すように、出力プロセス量を増加させる効果を持つ操作を実行する場合は、プラント運転の効率上、操作前の状態における最大容量 (V1) では対応できなくなった時点 (図中③点) で、操作を実行するべきである。この時、実際の操作時間を考慮して、④点において操作を開始するように条件を生成するのが最も効率的である。条件形式は、条件3と同様にプロセスパラメータの定性変化を基に決定できる。条件値は最大容量 (capa、situation、quality)、操作時間 (operation)、最大変化率 (parameter) から算出する。条件は以下の通り生成される。

定性変化 = [+] の場合

$$\text{出力パラメータ} \geq V1 - \beta$$

$$(\beta = \Delta * T)$$

V1 : 操作前の最大容量

β : 操作時間に増加するプロセス量

Δ : プロセスパラメータの最大変化率

T : 操作時間

定性変化 = [-] の場合

$$\text{出力パラメータ} \leq V2 + \beta$$

V2 : 操作後の最大容量

以上の処理によって生成された全条件を集集し、条件項目分類モジュールにおいて分類することにより、操作条件が生成される。

出力プロセス量

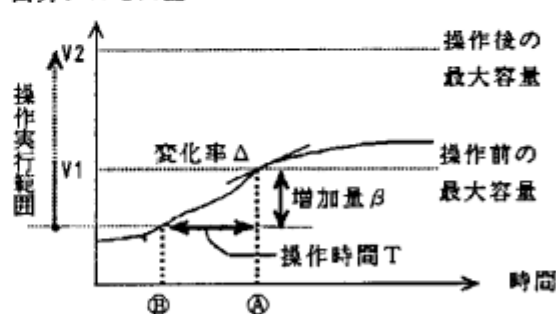


図7

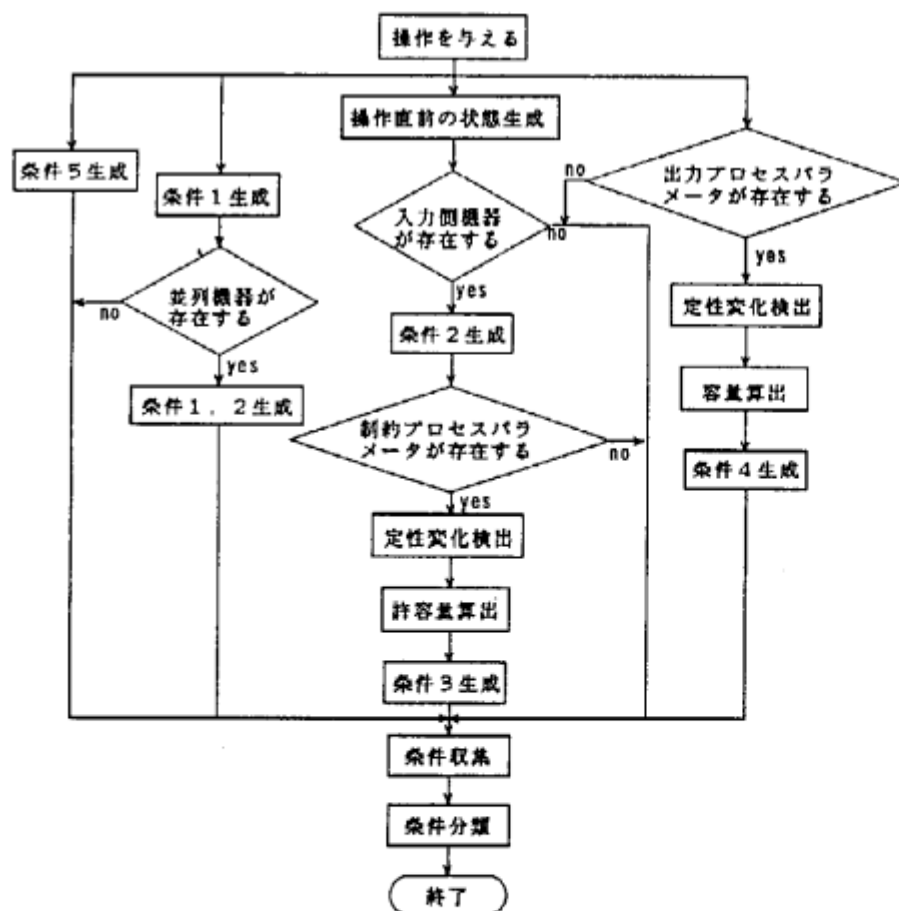


図6 条件項目生成処理フロー

(4) 条件項目分類モジュール

条件項目分類モジュールでは、生成された条件項目を操作のタイミングを決定する条件、本条件生成時には既に満足されているべき条件、プラント操作の完了を確認する条件の3つのカテゴリに分類する。この分類は、正常時推論機構における制御知識の実行評価に利用される[4]。

(5) 推論管理モジュール

推論管理モジュールでは、上記4つの機能モジュールの推論を管理する。条件項目生成モジュールでは、この推論管理モジュールを介して、適時必要な機能モジュール (状態生成モジュール、定性

変化検出モジュール、条件項目分類モジュール)を呼出し処理を行う。

6. 操作条件機構の適用例

本章では、操作条件生成機構の火力発電プラントへの適用について、具体例を用いて説明する。

火力発電プラントの給水系統では、図8に示すような冷却水ポンプシステムcwp_sysによって、蒸気を水に還元するための冷却水（海水）を、復水器condenserへ供給している。cwp_sysは、3個のユニットが並列に接続されており、各ユニットは、スクリーン、ポンプ、バルブから構成されている。初期状態は、a_cwp_unitのみが運転中である。ここでcondenserの真空度低下という不測異常が発生すると、異常時推論機構が起動され、操作同定機構によって以下の対策操作が導出される。

- ① c_cwp off → on
- ② c_cwp_valve close → 80.0%

以下では、操作①についての条件を、深い知識に基づいて生成するメカニズムについて、具体的に説明する。

まず、操作知識に基づいて、操作完了を確認する以下の条件を生成する。

条件5 : c_cwp on

初期状態、操作順序(①→②)から、状態生成モジュールにおいて操作①の直前の状態を生成する。条件項目生成モジュールではこの情報を基にして、操作対象機器、並列機器、入力側機器についての以下の条件を生成する。

条件1 : a_cwp on
条件1 : a_cwp_screen off
条件1 : a_cwp_valve 80.0 %
条件1 : b_cwp off
条件1 : b_cwp_screen off
条件1 : b_cwp_valve close
条件1 : c_cwp off
条件2 : c_cwp_screen off
条件1 : c_cwp_valve close

入力側機器の制約パラメータについては、定性変化モジュールにおいて、本操作による定性変化を検出する(operation, parameter)。

冷却水レベルc_w_level = [-]

電圧c_ps_volt = [-]

この定性変化を基に各プロセスパラメータについて、許容最小量と減少量(minimum)から以下の条件を生成する。

条件3 : c_w_level ≥ 510.0
条件3 : c_ps_volt ≥ 6.5

出力プロセスパラメータについては、同様に定性変化を検出し、

c_cwvif = [+]

この結果を基に操作前の状態における最大容量(capacity)、操作時間(operation)、最大変化率(parameter)から以下の条件を生成する。

条件4 : c_cwvif ≥ -25.0

以上の全条件を収集し、条件項目分類モジュールにおいて分類した結果を操作条件として生成する。

図9に生成された制御知識をロジックチャート形式に表現したものを示す。

7. 評価結果

5種類の操作に関する条件について、本システムから生成された条件と、熟練オペレーターから抽出した条件とを比較検討することにより、本条件生成メカニズムに関する評価を行った。

生成された操作条件の中にはやや余分な条件も含まれており、知識の冗長という問題はあげられるが、全般的にみて、本メカニズムはヒューリスティックな制御知識を生成する有効な方法であるという評価が得られた。また、この問題については、対象モデルに定義した機器の階層関係を詳細化することにより対応できると思われる。

8. おわりに

我々は、制御用エキスパートシステムの操作条件生成機構に関する検討、試作を行ってきた。

本報告では、操作条件生成機構の深い知識の表現、深い知識に基づく条件生成メカニズムについて詳述した。また、火力発電プラントへの適用結果を示し、提案した条件生成機構の有効性を示した。

今後は、条件項目の簡潔化、操作順序や操作タイミングの決定方法の洗練化、操作条件の分類方法の解析、並列化による推論の高速化等の

検討課題が残されている。

謝辞

本報告は、I C O Tからの委託テーマである「制御用エキスパートシステム」の研究成果の一部である。本研究の機会を与えて頂いたI C O T研究部の生駒部長代理、及びI C O T第7研究室の新田室長に感謝の意を表します。

参考文献

- [1]鈴木淳三、他、"深い知識に基づく制御用エキスパートシステム"、第9回知識工学シンポジウム(1989)
- [2]田岡直樹、他、"深い知識に基づく制御用エキスパートシステムの開発 - 制御操作の生成 -"、第38回情全大
- [3]鈴木淳三、他、"深い知識に基づく制御用エキスパートシステム - 深い推論機構と詳細検証機構との融合 -"、第11回知識・知能システムシンポジウム(1990)
- [4]M.Naohmichi: Foasil fired power plant full automation by computer control, IEEE 1973 Conference, pp142-149

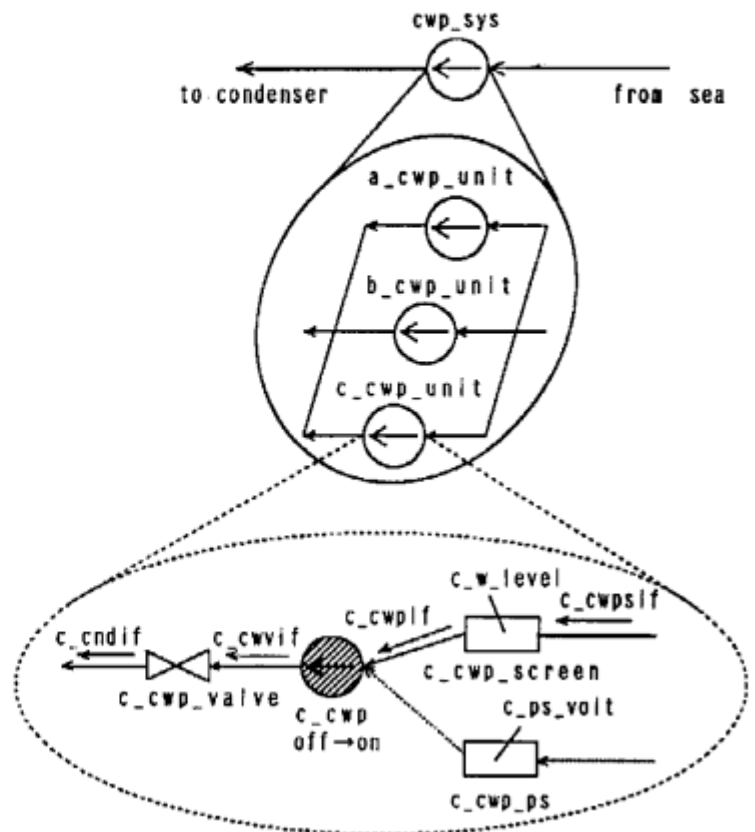


図8 火力発電プラント給水系統

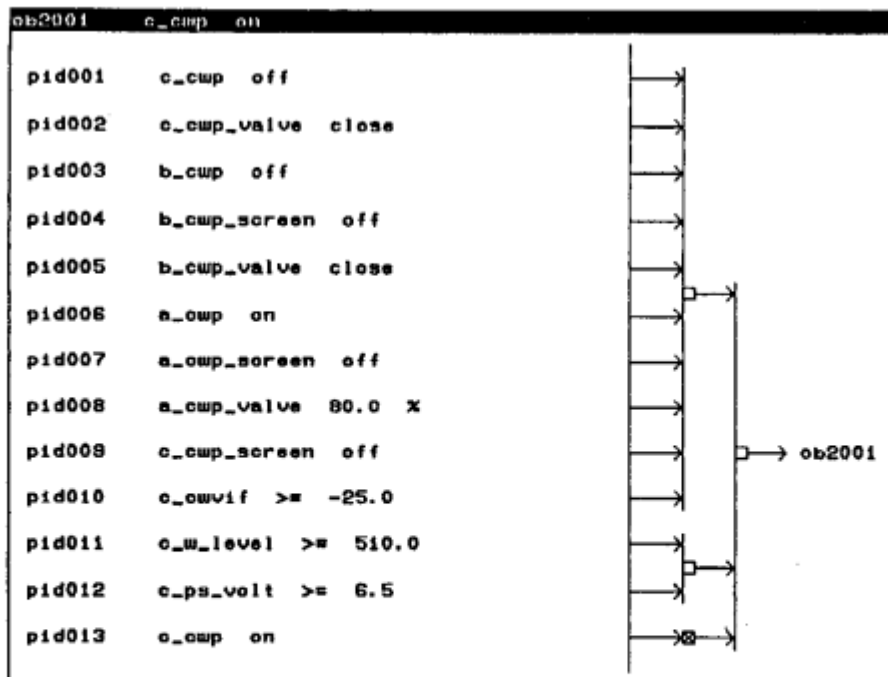


図9 生成された制御知識例