

TR-0847

モデルに基づく運転操作プランの
生成機構を組み込んだ
プラント運転制御用エキスパートシステム

鈴木 淳三、田岡 直樹、小沼 千穂、
岩政 幹人、神谷 昭基、末田 直道、
河野 毅（東芝）

© Copyright 1993-06-10 ICOT, JAPAN ALL RIGHTS RESERVED

ICOT

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

(03)3456-3191~5

Institute for New Generation Computer Technology

モデルに基づく運転操作プランの生成機構を組み込んだプラント運転制御用エキスパートシステム

A Plant Control Expert System with Model-Based
Plan Generation Mechanism of Plant Operations

鈴木淳三*1、田岡直樹*2、小沼千穂*1、 岩政幹人*1、

Junzo Suzuki, Naoki Taoka, Chiho Konuma, Mikito Iwamasa,

神谷昭基*2、末田直道*1、河野毅*1

Akimoto Kamiya, Naomichi Sueda, Takeshi Kohno

Summary :

Conventional knowledge-based plant control systems control a plant according to heuristics stored in a knowledge base. So, it will fail if the plant falls in the situation not considered a priori by the designer of the plant control system. We call it an unforeseen situation. This paper proposes a new architecture that can dynamically generate a plan of plant operations against the unforeseen situation. This proposed architecture is based on the thinking process of a skilled human operator. It consists of three functions as follows:

- (a) the diagnosis of the unforeseen situation by using qualitative causal relations among plant process parameters ;
- (b) the plan generation of plant operations to recover the plant from the unforeseen situation by using the constraints satisfaction method ;
- (c) the plan verification by predicting a plant behavior when a plant is operated according to the generated plan.

To realize these functions, the proposed architecture uses the multiple models, namely, a qualitative causal model, a device model, an operation principle model and a dynamics model. We have implemented a model-based plant control expert system on the basis of this proposed architecture. This paper focuses on the plan generation and verification of plant operations and discusses the experimental results of this expert system.

*1 (株) 東芝 システム・ソフトウェア技術研究所

Systems&Software Engineering Lab. , Toshiba Corp.70, Yanagi-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-city, Japan.

*2 (株) 東芝 府中工場

Fuchu Works , Toshiba Corp.1, Toshiba-cho, Fuchu-city, Japan.

Keywords : model, plan generation, plant control, knowledge compilation.

1 はじめに

現在の火力発電プラントでは種々の高機能化が計られ、そのための運転制御知識も膨大になる状況にある[鈴木 83]。一般的な火力発電プラント運転制御システムにおいては、運転制御に関する経験則はIF-THENに記述されるものが多い。ところが、火力発電プラントの運転制御に限らず、このような経験則に基づいた従来のシステムでは予め想定していない不測の事態に対処することができないという問題点がある[溝口 87]。一方、経験則のように直接推論に利用する言わゆる浅い知識ではなく、浅い知識の正当性を証明しこれを生成できるような深い知識（以下ではモデルと呼ぶ）を利用した推論技術（以下ではモデルベース推論と呼ぶ）が診断分野を中心に研究されている[山口 87]。

筆者らはプラント運転制御タスクにおける上記の問題点を解決するために、モデルベース推論の適用について検討してきた。文献[Iwamasa 92]では定性因果モデルを用いて不測の事態の原因を診断する機構を提案しその有効性を示した。文献[小沼 90][鈴木 90]では機器モデルと運転原則モデルを用いた運転操作プランの生成、および動特性モデルを用いた運転操作プランの検証の機構を提案した。また文献[Suzuki 90]では運転操作プランの検証における定性推論技術の適用の限界について考察した。文献[Suzuki 92]では試作システムを用いた実験結果を示し、プラント運転制御タスクへのモデルベース推論の適用の有効性を示した。本論文は、不測の事態に対処するためのプラント運転操作プランの生成と検証についてまとめたものである。本論文では、不測の事態に対処できる柔軟かつ強力なプラント運転制御システムを実現するために、機器モデル、運転原則モデル、動特性モデルを用いたモデルベース推論機構について提案し、実験結果に基づいてその有効性を示す。

2 火力発電プラントの運転制御タスク

近年の火力発電プラントの制御システムは、ユニットレベル、グループレベル、ドライブレベルという階層型機能分散に基づく構成になっている[宮根 86]。この中で最上位に位置するユニットレベルは、運転操作員が操作する運転モードやプラント各部の状態を読み込み、それらの状態によりプラント全体から見た最適操作時期を判断し、グループレベ

ルの装置に起動停止や制御目標値などの制御指令を出力する。したがって、不測の事態の発生時に自動的に制御状態を変更し不測の事態に対処するためには、ユニットレベルの高機能化が必要である。一方、従来のプラント運転制御システムでは、ユニットレベルのタスク実行に必要な手順や知識をプラントテーブルと呼ばれるIF-THENに記述される浅い知識として表現し利用している[鈴木 83]。したがって、ユニットレベルの高機能化のためには膨大な数の浅い知識を予め知識ベースに蓄積する必要があるが、先に述べた不測の事態の発生に対しては依然として無力であり人間系に委ねられているのが現状である。本論文で提案するモデルベース推論機構はユニットレベルを対象タスクとし、不測の事態が発生しても必要な運転操作プランをモデルから自動的に生成して対処することが可能であり、柔軟かつ強力なプラント運転制御システムを実現するものである。

3 システム構成

プラント運転制御用エキスパートシステムの構成を図1に示す。本システムは浅い推論機構と深い推論機構から構成される。

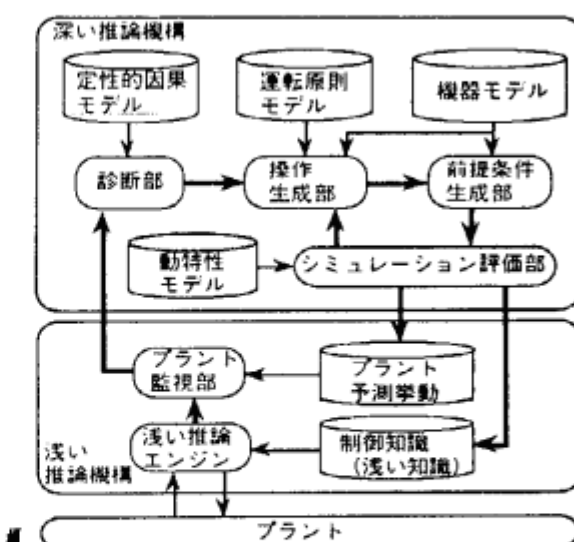


図1 プラント運転制御用エキスパートシステムの構成

浅い推論機構は経験則に基づいてプラント運転操作に関する推論を行う。プラント監視部は不測の事態の発生を検知し深い推論機構を起動する。

深い推論機構では、まず診断部が定性的因果モデルを利用して不測の事態の原因を推論する[Iwamasa 92]。操作生成部[Suzuki 92]と前提条件生成部[小沼 90]は、診断結果から不測の事態の対処に必要な運転操作プランを生成する。シミュレーション評価部は、生成された運転操作プランを検証するために、これが実行された時のプラント挙動を予測する[Suzuki 90]。予測結果から、運転操作プランの修正が必要な場合は再び操作生成部を起動する[鈴木 90]。

以上の生成・検査手順を繰り返すことにより生成された運転操作プランは、浅い推論機構に送られ実行される。

本論文では、この生成・検査過程に焦点を当て議論する。

4 モデルに基づく運転操作プランの生成

本章では、操作生成部と前提条件生成部に関して、モデル表現と推論メカニズムを説明する。

4.1 モデル表現

図2に火力発電プラントの給水系統の一部を示す。

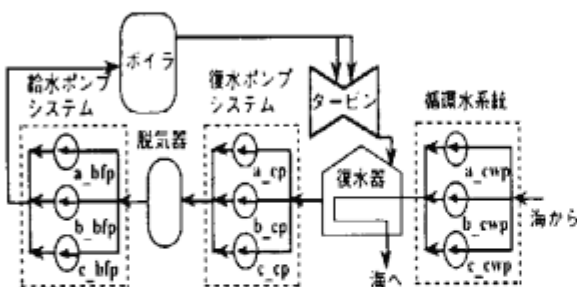


図2 火力発電プラントの給水系統

復水器はタービンからの蒸気を水に還元する装置

である。還元された水は復水ポンプシステムと給水ポンプシステムにより脱気器を経由してボイラに送られ蒸気となる。プラントはこの他に、循環水系、燃料系統、各種コントローラから構成されている。このプラントに対して以下のモデルを実現した。

(1)機器モデル：プラント構成機器毎に定義され、構造や機能上の制約条件を記述している。図3は給水ポンプの機器モデルを示し、「属性：値」の組で記述される。同図を例として以下に説明する。

name :	a_bfp
demand :	a_bff = 360 [ton/hr]
goal :	a_bff <= capacity(a_bff)
states :	on ; capacity(a_bff) = 615 [ton/hr] off ; capacity(a_bff) = 0 [ton/hr]
operation :	off → on ; time-lag = 0.1 [hr], d/dt(a_bff) = + on → off ; time-lag = 0.1 [hr], d/dt(a_bff) = -
quality :	d/dt(a_bff) = d/dt(a_bff)
quantity :	a_bff = a_bff
flow_in :	(defined at system)
flow_out :	(defined at system)
system :	bfp_system(a_bff , a_bff)

図3 給水ポンプの機器モデル

プラント運転制御において重要である各機器に対する要求に関して、demandにパラメータa_bffに対する要求値が、またgoalにその充足条件が定量的に定義されている。

要求達成に必要な各機器の機能については、statesに各機器の取り得る状態および各状態におけるパラメータ間の定量的な関係式が定義される。

各機器に対する操作はこの状態の変更により定義され、操作によるプロセスへの直接的または間接的な影響は、operationとqualityに定性的に定義される。

さらに各機器の状態に依存しないパラメータ間の定量的な関係式がquantityに定義される。

またプラントの構造に関しては、flow_inとflow_outに入出力側の機器の接続関係が、また図4に示した機器の階層関係がsystemに定義される。

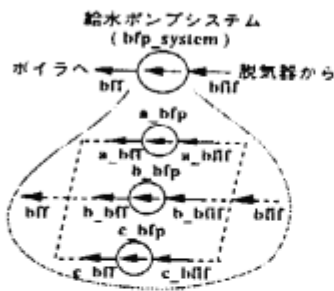


図4 機器モデルの階層的表現

さらに各機器毎のローカルな属性値も定量的な関係式などとして定義できる。

機器モデルには、各機器が満足すべき制約条件が定義される。これらは対象プラントの設計情報から得ることができ、機器毎にローカルに決定できる。

(2) 運転原則モデル：プラントの運転制御において守るべき制約条件を記述したものであり、絶対条件と機器選択条件からなる。前者は安全上絶対に守るべき条件であり、「故障機器の使用禁止」、「制限値範囲内での機器使用」からなり、後者は効率上守るべき条件であり、「機器の最小台数運転」、「機器の均等使用」、「先行機（先に運転状態にある機器）優先」からなる。

4.2 運転操作の導出

操作生成部は、機器モデルと運転原則モデルにより規定される全ての制約を満たしたプラント状態（以下では目標状態と呼ぶ）を決定することを基本とする。この時、機器モデルの評価は定量的情報に基づいて行なわれる。一般的に、不測の事態によるプラント状態変化は、目標状態における制約違反を引き起こす。したがって操作生成部には以下に示す2つの機能が必要である。

(1) 制約条件の検証機能：機器の状態変化や関連パラメータ値の変化に対して、その機器に関する制約条件、さらに接続関係を介して関連付けられる他の機器の制約条件が満たされているか否かを機器モデルを利用して検証する。この時、厳密な検証を行なうために、機器モデルに定義された制約条件を定量的に評価する。

(2) 目標状態の更新機能：機器に新しい要求値が与えられると、この要求値を達成しかつこの機器の他の制約条件をすべて満足した状態を機器モデルを利用して推論する。この時、運転原則モデルにより状態候補の枝刈りや要求値の下位階層機器への展開方法などが決められる。これらの制約充足処理も、機器モデルに定義された要求値、要求充足条件、機能などの情報を定量的に評価することにより行なわれる。

上記の各機能は、ある機器の処理結果を接続する他の機器に局所的に伝播することにより行なわれる。

不測の事態によるプラント状態変化に対して、まず関連する機器の制約条件を再度定量的に検証することにより推論が起動される。制約を充足できない機器が発見されると、この機器に対して目標状態の更新処理が起動される。最終的に得られた目標状態と現在の状態の差分を取ることで、運転操作が導出される。

4.3 運転操作プランの生成

前提条件生成部は、導出された運転操作のプランを生成する。このプラン生成は、運転操作の順序付け、各運転操作の実行前にチェックすべき条件の生成からなる。

(1) 運転操作の順序付け：プラントの設計方針に基づいた次の原則に従う。

- ・機器の起動操作は、プロセスフロー（例えば水の流れ）に従って入力側から出力側の機器に向かって行なう。
- ・機器の停止操作は、上記と逆の向きに行なう。

(2) 操作条件の生成：順序付けされた各運転操作に対して、以下に示す5種類の条件を生成する。これらは火力発電プラントの運転制御に関して一般的に成り立つ。

- ・操作前状態を規定する条件：操作の対象機器およびこれと並列に接続された機器が操作前の状態であることを規定する。
- ・操作順序を規定する条件：1つ前の運転操作の完了を規定する。
- ・プラントの安全性を保证する条件：操作によるプロセス変化の隣接機器への影響が安全範囲内に収まることを保証する。
- ・操作タイミングを規定する条件：運転効率上、操作はそれが本当に必要になるまで遅らされる。

またプラントの安全上、操作はそれを本当に実行してもよい状態になるまで遅らされる。本条件はこのような操作タイミングを規定する。

- ・操作の完了を確認する条件：操作の実行後の状態を規定し操作の完了を確認する。

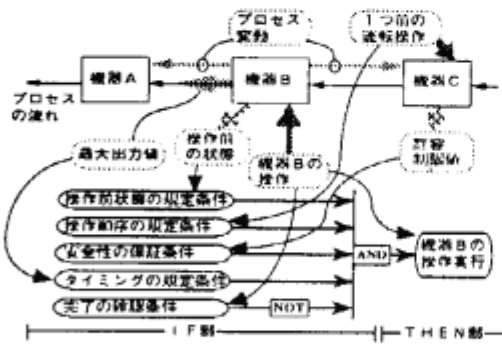


図5 運転操作プランの生成過程

運転操作プランの生成は、図5に示すように目標状態を機器モデルを利用して解析することにより可能である。例えば、条件として規定する機器状態は、プラント構造に関する属性記述から必要な機器名を取り出し、その各機器に対して、状態に関する属性記述から状態名を取り出すことにより決定できる。また操作の影響として規定する安全範囲は、操作による隣接機器のプロセスへの影響を、プラント構造に関する属性記述に従ってプロセスへの影響に関する属性記述を定性的に評価することにより決定し、その定性評価値に基づいて隣接機器のプロセスの制限値の上限値または下限値に関する属性記述を取り出すことにより決定できる。さらに操作タイミングについては、操作による出力側機器のプロセスへの影響を先と同様にして定性的に評価し、その定性評価値に基づいて操作対象機器の操作前または操作後の最大出力値に関する属性記述を取り出すことにより決定できる。

生成された運転操作プランは、浅い推論機構において直接利用できるように、IF-THEN型のルールの集合として出力される。

5 モデルに基づく運転操作プランの検証

第4章で述べた操作プランの生成は、ある時間点における目標状態の更新と解析に基づいていた。したがって、プロセスの時間特性を考慮したプラン検証が必要となる。本章では、これを行なうシミュレーション評価部に関して述べる。

5.1 動特性モデル表現

プラントにおける動特性は、プラント制御装置の制御特性、プラント内の物理現象に関するダイナミクスモデルから構成される。前者としては給水ポンプシステムにおける流量制御モデル、後者としては復水器内の温度・圧力特性などが一例として挙げられる。本モデルは、プロセスパラメータと時間項からなる関係式により記述される。

5.2 運転操作プランの修正

運転操作プランの検証時に特に重要なのは、操作によりプロセスのパラメータ値が過渡的に許容最大値や許容最小値を越えて変動する場合である。シミュレーション評価部ではこのような制限値制約に関して制約違反の発生を検出する。この制約違反に対しては、プランに含まれる各操作のタイミングを変える、制約違反の対策操作を新たにプランに加える、等の対応策がある。本システムでは後者を採用した。この基本的な手順を図6に沿って説明する。

```

procedure Generate&Test ( M or D0, S0 )
begin
  [ Se, Op ] <= Operation_Generate ( M or D0, S0 );
  K1 <= Precondition_Generate ( S0, Se, Op );
  PS <= Simulate ( S0, K1 );
  [ NG, D1, S1 ] <= Verify ( PS );
  if NG <= constraint_violation
  then return( K1, Se );
  else
    [ K2, S3 ] <= Generate&Test ( D1, S1 );
    [ K3, Se ] <= Generate&Test ( M, S3 );
    K4 <= FIX( K1 ) + K2 + K3;
    return( K4, Se );
  endif
end.

```

記法上の注意

Sl, Se: プラント状態	M: 診断結果
Dl: 機器への要求値	Op: 運転操作
PS: プラント挙動	NG: 制約違反発生
Kl: 操作プラン	のフラグ
[]: リスト表現	<=: 代入操作表現

図6 運転操作プランの生成・検査アルゴリズム

プラントの初期状態S0と不測事象Mに対して、目標状態Scと操作プランK1を生成しプラント挙動PSを動特性モデルに基づくシミュレーションにより予測する[Suzuki 90]。この時、ある機器のプロセス量D1が状態S1以降に制約違反になると予測されると、D1をこの機器に対する新たな要求値とみなして操作生成部を起動し目標状態S3を生成する。このように、S1からS3およびS3からScへの遷移に必要な操作プランK2とK3を本手順の再帰実行により生成し、完全な操作プランを生成する。

6 実験結果と評価検討

本システムはマルチPSI[Taki 88]上にKL1言語により構築されている。本格的な実験環境を実現するために、プラントシミュレータをミニコンピュータG8050上に構築し両計算機をGPIB伝送路で結合した。

6.1 実験結果

本システムには表1に示すように合計78個のモデルを実装した。

表1：実験におけるモデル化規模

	個数	モデル数
補機	43	63
制御装置	7	15
操作端機器合計	50	78

不測の事象に関するシステムの機能評価は以下の手順で行なった。

- (1)広範囲な実験評価を行なうため、ミル故障（燃料系統）、給水ポンプ故障（給水系）、復水ポンプ故障（復水系）、循環水流量調節弁故障（循環水系）、給水ヒータ故障（給水系）の各状況を設定した。また多重故障についても設定できるようにした。
- (2)各機器故障に対して、浅い推論機構の知識ベースからこの対応に必要な制御知識を取り除くことにより、不測の事象を模擬的に設定する。
- (3)プラントシミュレータにより発電機の負荷上昇中に故障を発生させる。この時、深い推論機構が対策操作プランを正しく生成できること、浅い

推論機構が対策操作プランを実行し不測の事象に対処できることを確認する。

単一故障に対する実験結果を表2に示す。各故障に対してシステムが生成する操作プランの質を評価するために、以下の点に着目する：知識ベースから取り除いた制御知識の条件数(N1)、N1の中で対策操作の実行時に必要な条件数(N2)、N2の中でシステムが正しく生成した条件数(NS)、N2の中でシステムが生成できなかった条件数(NM)。NSはモデルの詳細化などの改良を行なった時、システムが正しく生成する条件数予測である（詳細は6.2節で後述する）。

N1とN2の違いは、知識ベースに予め格納される知識は条件記述を一般化しているが、本システムでは発生した不測事象に特化したものを生成すればよいことによる。このような観点からN1の中で不要な項目を削除してN2を決めた。例えば、図7は表2の操作11に対応する制御知識であるが、図中の条件(a)に示した制御フェーズに関する条件はN1から削除した。

また、N2の中でシステムが誤って生成した条件数(NF)は次式で容易に得られる。

$$NF = N2 - (NS + NM)$$

さらに、NSについて以下の点を考慮した。

- ・システムはプラント状態に関する条件を機器の状態の枚举により規定するが、比較対象の制御知識はこれを一般化した記述になっている。例えば図7で、システムは条件(b)を条件(c)の形式で生成する。

- ・システムは図7の条件(d)のように、比較対象の制御知識に規定されない余分なAND条件を生成する場合がある。

- ・比較対象の制御知識には、図7の条件(e)のような操作対象機器の選択条件が規定されているが、これは運転原則モデルの適用時に既に評価されているためシステムは生成しない。

これらは、発生した不測の事象に特化した運転操作プランを生成するという観点では、いずれもプランの質に影響を与えるものではない。したがって、これらに該当する条件はNSに計上した。

多重故障については、多重故障は同時に一度だけ発生させる、診断部は正しい結果を推論するという設定の下で実験した。実験の結果、単一故障の場合と同等の性能を示すことを確認した。この時、給水ポンプの起動操作を含むプランに対しては、プラン

表2：実験において生成された操作プランの質

不測の事態	前提条件 操作	前提条件の数				
		知識ベース内 制御知識 (N1)	知識ベース内 制御知識 (N2)	正しく生成 された条件 (NS)	生成でき (NM) なかった条件	洗脳化後の 予測NS (NS')
石炭ミル 故障	1. 石炭ミルB 起動	12	6	6	0	6
	2. 石炭ミルA 停止	8	7	7	0	7
給水ポンプ 故障	3. 給水ポンプC 起動	42	18	14	4	18
	4. 給水流量 調節弁C 開	26	10	4	5	9
	5. 給水流量 調節弁C 自動	32	8	3	3	6
	6. 給水流量 調節弁A 手動	12	4	3	1	4
	7. 給水流量 調節弁A 開	14	6	5	1	6
	8. 給水ポンプA 停止	23	8	5	3	8
	9. 復水ポンプC 起動	17	7	4	3	7
復水ポンプ 故障	10. 復水ポンプA 停止	13	7	4	3	7
	11. 循環水ポンプC 起動	8	7	4	3	7
循環水流量 調節弁故障	12. 循環水流量 調節弁C 開	4	3	2	1	3
	13. 循環水流量 調節弁A 開	4	3	1	1	3
	14. 循環水ポンプA 停止	8	7	5	2	7
給水ヒータ 故障	15. 給水ヒータ バイパス弁 開	4	3	操作生成失敗	操作生成失敗	操作生成失敗
	16. 給水ヒータ弁 閉	4	3	操作生成失敗	操作生成失敗	操作生成失敗

検証時に過渡的な復水流量変動が予測され、これに対応するために復水ポンプの起動操作がプランに追加されることを確認した。

システムが生成した操作プランは全て浅い推論機構により実行され、不測の事態に対処できたことをプラントシミュレータで確認した。

6.2 評価検討

システム性能を、対策に必要な運転操作が生成できること（操作生成部の性能）、各運転操作に関する条件が正しく生成できること（前提条件生成部の性能）から評価する。また、その他の総合的なシステム評価と今後の展望についても述べる。

- (1) 運転操作に関する評価：給水ヒータ故障以外は必要な操作を全て生成できた。ボイラ出口の蒸気圧力P、燃料流量F、給水ヒータの出口温度Tと給水流量Gに関しては以下の関係式がある。

$$P = \int (c_1 F + c_2 G(T - \alpha_1) + \alpha_2) dt \quad (1)$$

ただし、 c_1, c_2 は正定数、 α_1, α_2 は他のプロセス量に関する補正項である。したがって、給水ヒータ故障によるTの低下に対して期待した対策操作は、Fを増加するための燃料流量調節弁の開操作であったが導出に失敗した。操作生成部では、ボイラに対する要求値Pとボイラの機器モデルに記述された式(1)から、燃料系に対する要求値Fと給水ヒータに対する要求値GとTを計算して伝播する。この時、式(1)を逆向きに評価する必要があるが、Pに対して計算できるFとGとTの組み合わせは原理的にはほぼ無限に存在し伝播する値を決定できない。この問題に関して現在の操作生成部では、運転原則モデルや近似関数の導入により値が一意に決定できる機構になっている。今回の失敗はこの機構に起因するものであり、プロセスバランスの評価について新たな原則の定式化などが必要と考えられる。

- (2) 操作条件に関する評価：表2から、操作の導出に

成功した事例において大部分の条件生成が不完全 ($NS < N2$) であった。その原因を以下に示す。

- ・電気系統などモデル化されていない部分に関する条件の生成に失敗した。これはモデルの拡張により容易に対処できる。
- ・4.3節で述べた5種類の条件でカバーできない条件の生成に失敗した。いずれも機器の状態に関する条件であるので、発生した不測の事態に特化すれば、条件として規定する範囲を広げることにより対処できる。
- ・操作タイミングを規定する条件を一部誤って生成した ($NF \neq 0$)。現在この条件は、各機器の最大出力プロセス量によって一律に規定できるというコンセプトに基づいている。そのため、コントローラ本体やコントローラの支配下にはない機器など、このコンセプトに合致しない機器操作の条件を誤って生成した。

上述したモデル拡張および条件規定範囲の拡張は機器単位にローカルに行なうことができるため、プラント構成機器全体の状態の組合せを考慮しないとならない浅い知識の拡張とは根本的に異なる。したがって、モデル化範囲に関する問題は容易に解決可能である。ただし、プラン生成コンセプトに関連する問題については、その洗練化を行なう必要があり今後の課題である。表2のNS'は、容易に解決可能な部分に対処した後システムが正しく生成すると予測されるN2の中の条件数である。

- (3)総合的評価と展望：表2に示した5つの事例以外に、プラントシミュレータで発生させる故障の組合せを変更することでさらに15事例、合計20事例の実験を行なった。その結果、15事例において本システムは対策操作プランを正しく生成し、これを実行することで不測の事態に対処できた。この性能は、提案した推論機構が、厳しい性能が要求される実用レベルのオンライン制御システムとしては更なる性能向上の余地があることを示しているが、人間系の介入を前提にできる運転支援システムとしては十分利用可能であることを示していると考えられる。

本システムに関する残された課題と展望は以下の通りである。

- ・プランの実行監視の問題：実験ではプラントシ

ミュレータで発生させたマルファンクションは診断部により原因が正しく診断されるという前提の下で、その対策プラン生成について検討してきた。ところが、診断結果が正しくない場合もあり得る。この問題に対してはプラント監視と評価の機構が必要である。関連研究として[Dvorak 89]があるが、故障モデルを予め学習させる必要があるため、不測の事態に対しては限界がある。

- ・推論のリアルタイム性の問題：ユニットレベルの制御は、さほど厳しいリアルタイム性は要求されないが、不測の事態に対して有効に機能するには少なくとも数十秒オーダーの性能が必要と思われる。これに関しては並列計算機マルチPSIによる高速化を検討中である[鈴木 91]。現在までに10台の要素プロセッサを用いて6倍の高速化を確認しているが、必要性能を得るにはさらに2倍程度の高速化が必要である。

またモデルベース推論に関して共通の課題である以下の点についても今後検討していく必要がある。

- ・モデルの構築容易性の問題：システムの各モデルは構築容易で互いに無矛盾である必要がある。しかし、現在各モデルは独立に実装されており、この観点からの検討が不十分である。モデルの構築容易性については山口が診断タスクを対象に分析しており[山口 87]、モデル構築環境については、CrawfordのQPT[Forbus 84]による定性モデリング環境に関する研究[Crawford 90]、Engelmoreのモデル共有に関する研究[Engelmore 90]が参考になるとと思われる。
- ・プランの検証の問題：プラン生成で用いるモデルにはプロセスの時間特性が記述されていないため、生成されたプランの検証が不可避である。現在このプラン検証では制限値制約条件の優先度を考慮していない。そのために、実質的に問題にならない僅かな制約違反量でも評価される。これに対しては、制限値の許容範囲を柔軟に取り扱える機構を検討中である。

7 おわりに

本論文では、モデルベース推論によりプラント運転操作プランをダイナミックに生成できる機構を提案した。これは操作プランの生成・検査に基づいている。操作プランの生成は、機器モデルと運転原則モデルを利用した制約充足と解析に基づいている。操作プランの検証は、動特性モデルによるプラント

挙動の予測、制限値制約条件を利用した検証に基づいている。さらに、プラント運転制御用エキスパートシステムを試作し、プラントシミュレータを用いた実験により有効性を示した。

謝辞

本研究はICOTからの再委託テーマとして行なわれた。日頃ご助言を頂いたICOT第7研究室の新田室長、ならびに研究開発の機会を与えて頂いた当社システム・ソフトウェア技術研究所の西島所長に感謝します。また本論文の内容について適切なご指摘を頂いた査読者の方に感謝します。

参考文献

- [Crawford 90] Crawford,J., Farquhar,A. and Kuipers,B.: QPC: A Compiler from Physical Models into Qualitative Differential Equations, Proc. of AAAI90, AAAI, pp.365-372 (1990).
- [Dvorak 89] Dvorak,D. and Kuipers,B.: Model-Based Monitoring of Dynamics Systems, Proc. of IJCAI89, AAAI, pp.1238-1243 (1989).
- [Engelmore 90] Engelmore,R.S. and Tenenbaum,J.M.: Toward the Engineer's Associate: A National Computational Infrastructure for Engineering, KSL Working Paper, KSL 90-64, Stanford University (1990).
- [Forbus 84] Forbus,K.D.: Qualitative Process Theory, Artificial Intelligence, 24, pp.85-168 (1984).
- [Iwamasa 92] Iwamasa,M., Suzuki,J., Mochiji,S. and Sueda,N.: Plant Diagnosis with Set Covering and Qualitative Causal Model, Proc. of CAIA92, IEEE, pp.60-66 (1992).
- [小沼 90] 小沼千穂, 鈴木淳三, 岩政幹人, 神谷昭基: 深い知識に基づく制御用エキスパートシステムー操作条件生成機構の開発ー, 第12回知能システムシンポジウム, 計測自動制御学会, pp.13-18 (1990).
- [溝口 87] 溝口理一郎, 角所収: AIの新しい展開ー知識獲得・深い知識・定性的推論ー, 第3回人工知能セミナー, 人工知能学会, pp.28-54 (1987).
- [曾根 86] 曾根英雄, 四郎丸功, 横山勲, 小田正彦, 足立真, 加納泰宏, 楠純一: 新小野田発電所階層機能分散型デジタル制御システム, 火力原子力発電, vol.37, no.2, pp.177-195 (1986).
- [鈴木 83] 鈴木寛, 阿部正夫, 木暮洋一郎: 最近の火力発電所の全自動化, 計測と制御, vol.22, no.12, pp.1021-1028 (1983).
- [Suzuki 92] Suzuki,J., Konuma,C., Iwamasa,M., Sueda,N., Mochiji,S. and Kamiya,A.: A Diagnostic and Control Expert System Based on a Plant Model, Proc. of

FGCS92, ICOT, pp.1099-1106 (1992).

[Suzuki 90] Suzuki,J., Sueda,N., Gotoh,Y. and Kamiya,A.: Plant Control Expert System Coping with Unforeseen Events - Model-based Reasoning Using Fuzzy Qualitative Reasoning -, Proc. of IEA/AIE-90, ACM, pp.431-439 (1990).

[鈴木 90] 鈴木淳三, 小沼千穂, 山本久志, 五嶋安生: 深い知識に基づく制御用エキスパートシステムー深い推論機構と詳細検証機構との融合ー, 第11回知識・知能システムシンポジウム, 計測自動制御学会, pp.7-12 (1990).

[鈴木 91] 鈴木淳三, 小沼千穂, 岩政幹人, 市川哲彦, 末田直道: 制御用エキスパートシステムのマルチPSI上での実現, KLIプログラミングワークショップ91, ICOT, pp.101-108 (1991).

[Taki 88] Taki,K.: The parallel software research and development tool: Multi-PSI system, Programming of Future Generation Computers, North-Holland, pp.411-426 (1988).

[山口 87] 山口高平, 溝口理一郎, 田岡直樹, 小高浩, 野村康雄, 角所収: 深い知識に基づく知識コンパイラの基本設計, 人工知能学会誌, vol.2, no.3, pp.333-340 (1987).