

TM-0871他

第11回知識知能システム
シンポジウム論文集

March, 1990

©1990, ICOT

ICOT

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

(03) 456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

TM-0871	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	鈴木 淳三, 小沼 千穂, 山本 久志, 五嶋 安生 (東京)
TM-0872	知識獲得支援のためのグループウェア GRAPEにおける仮説構造化	上田 晴康, 國藤 進, 井深 克憲, 須永 知之, 岩内 雅直 (富士通)
TM-0873	知識獲得支援のためのグループウェア GRAPEにおける属性構造化	國藤 進, 上田 晴康, 須永 知之, 井深 克憲, 岩内 雅直 (富士通)

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—

鈴木 淳三[†] 小沼 千穂[†] 山本 久志^{††} 五嶋安生^{†††}

株式会社東芝 システム・ソフトウェア技術研究所[†] 府中工場^{††} 重電技術研究所^{†††}

1 はじめに

火力発電プラントの制御において、経験則に基づいた従来の制御用エキスパートシステムでは予め想定していない不測異常に対して無力である。この問題に対して筆者らは深い知識に基づいた推論機構について検討を行ってきた[1][2]。そしてプラント機器の機能や構造に関する知識(対象モデル)、プラントの運転上の制約条件に関する知識(運転原則)などの深い知識から不測異常が解消されたプラント状態(目標状態)を決定し、現在状態から目標状態への遷移に必要な操作を導出する機構を明らかにした。そこでは目標状態をある時間点における状態または整定状態であると捉え、時間概念は直接取り扱っていない。一般に制御問題を取り扱う時、目標状態の決定は重要であるが、初期状態から目標状態への遷移を厳密に取り扱うためには時間概念を導入し動特性を考慮する必要がある。

本報告では、生成された操作による目標状態への遷移を動特性に基づいて検証し評価する枠組みについて述べる。

2 動特性に基づく検証・評価系

図1に動特性に基づいた検証・評価系の構成を示す。この系はさらに二種類の系に分割される。

(1) 詳細検証・評価系

故障仮説生成部により得られた故障仮説に対して、操作同定部において上述した深い知識に基づいて目標状態と操作を推論し、操作条件生成部において操作に対する条件を決定し制御知識を生成する。この制御知識に基づいて操作を実行した時のプロセス変化を動特性に基づいてSIM部で得る。SIM評価部においてシミュレーション結果を評価し、過渡状態において問題が発生する場合は操作同定部や操作条件生成部にフィードバックし対策操作を導出する。また実際のプラント制御において必要な時間情報を予測する。

(2) 対策検証・評価系

故障仮説生成部において生成された故障仮説が適切でない場合には、詳細検証・評価系において検証された制御知識に基づき浅い推論機構において実際にプラント操作を実行した時、不測異常が解消されない場合が起こり得る。これに対策監視部で監視し、適切なフィードバックを行うのが対策検証・評価系である。

本報告は(1)の詳細検証・評価系について述べる。以下では、操作同定部と操作条件生成部について簡単に述べた後、シミュレーションによる検証・評価の方法について説明する。

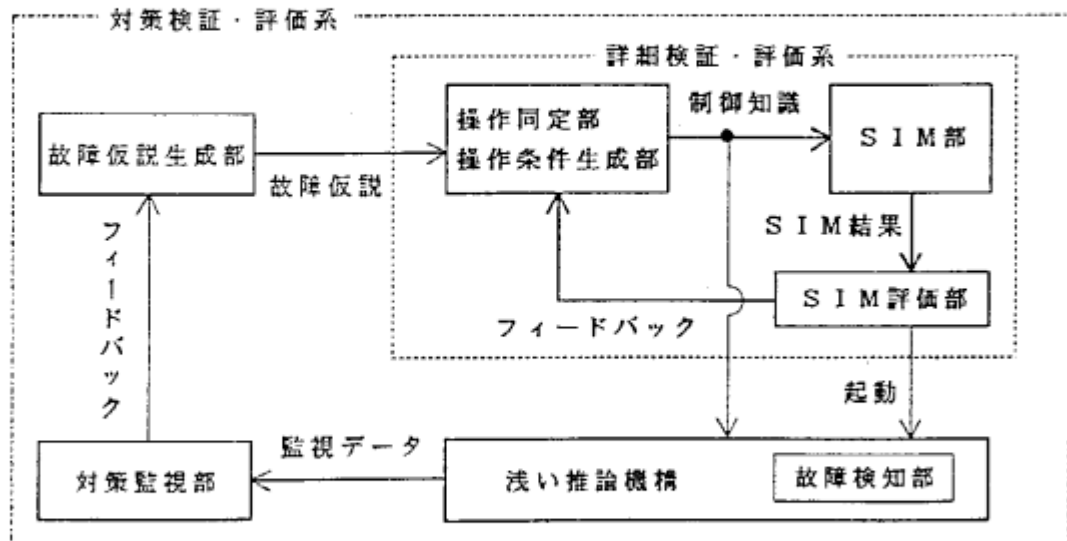


図1 動特性に基づく検証・評価系

3 操作同定部と操作条件生成部

本節では詳細検証・評価系においてSIM評価部からのフィードバック先である操作同定部と操作条件生成部の機能に関して簡単に説明する。

3.1 操作同定部

図2に操作同定部のシステム構成を示す。操作同定部は故障仮説生成部から故障仮説として故障機器名と故障モード（不測異常に対する初期操作）を入力として受け取り、与えられた出力要求（制御目標に相当）を満足するために必要な全ての故障対策操作を推論する。そのために全ての出力要求を満足し不測異常が解消された状態（目標状態）を導出し、故障対策操作は目標状態と初期状態との差分として得られる。推論に必要な知識として以下の二種類の深い知識を利用する。

(1) 対象モデル

プラント機器の機能や構造や種々の属性を記述する。各機器が取り得る状態も対象モデルにて定義する。特にプロセスに関する関係式は静特性をベースにしており、整定状態において成り立つ関係を対象としている。

(2) 運転原則

プラントの運転において安全上守るべき原則や効率上守るべき原則など、運転上の制約条件を記述する。

また、これらの深い知識に基づいて以下の二つの推論機構により目標状態を生成する。

(1) 操作検証推論機構

機器に対する操作（機器の状態の変更）により、与えられた出力要求を満足しない状態が発生しないかを

かを検証する。不測異常の発生に対しては、まず最初に故障モードに対する操作検証推論が実行される。

(2) 操作導出推論機構

与えられた出力要求を満足するために必要な操作を推論し、目標状態を生成する。この時、導出された操作に関して操作検証推論を行い、検証を行いながら全ての操作すなわち目標状態を生成する。

操作同定部により生成される目標状態は静特性に基づいて得られる整定状態である。

3.2 操作条件生成部

操作同定部により生成された操作に対して、その条件を生成する。条件生成に必要な深い知識は、プラント機器の状態や構造の他に操作に関する主要プロセスの定性的変化とプロセス間の定性的関係が必要である。生成される条件は、プロセスフロー（例えば水の流れ）に対して操作対象機器の入力側機器の状態に関する条件、出力側機器へのプロセス量（例えば吐出流量）に関する条件、操作対象機器の操作前状態と操作後状態に関する条件からなる。

4 詳細検証・評価系

操作同定部と操作条件生成部により生成された制御知識を動特性に基づいたシミュレーションを行うことで検証する。この時、検証結果に基づくフィードバックの方法が問題となる。以下では、操作同定部へのフィードバックによる動特性に基づく検証評価系の実現法について述べる。

4.1 SIM部

一般にシミュレーションには対象プロセスに関する関係式を動特性モデルとして与えておく必要がある。この時、定量的モデルは厳密な対象の挙動を推論することができるが、そのための厳密なモデルの構築が困難な場合がある。一方、定性的モデルは厳密な関係式が無くとも定性的な挙動の推論が可能である利点を持つが、定性的なあいまい性により推論結果が一意に定まらない可能性がある。このような問題点に対して、構築がより容易なモデルからより厳密な挙動を得るために筆者らはファジー化定性推論の適用について検討してきた[3][4]。詳細検証・評価系におけるSIM部の動特性モデルは熟練オペレータの持つプロセス変化に関する深い知識に相当する。したがって、やや厳密性に欠けるものの定性的なモデルを用いたファジー推論によるあいまい推論は、熟練オペレータによる検証過程を実現する有効な手段になると考えられる。

一方、不測異常に対する操作を検証するという意味で、厳密な挙動予測を行うためにはプラントの故障モデルが必要となる。ただし、先に述べたように

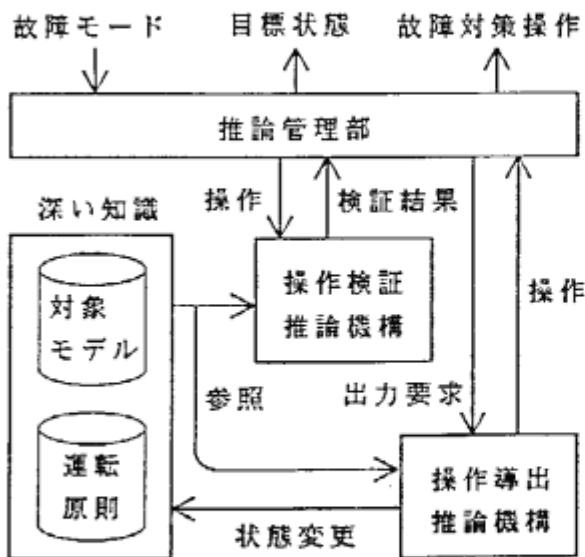


図2 操作同定部のシステム構成

SIM部は熟練オペレータの深い知識に基づくこと、操作同定部により生成される操作を行うことでプラントは正常な状態に復帰するものと考えることなどの点から、必ずしも故障モデルがなくとも正常状態のモデルで対処できると考えられる。正常なモデルを利用するとプラント制御装置が良好に機能している状況が模擬され、シミュレーション結果は必ず制御目標値付近で整定する。したがってこの時点においてシミュレーションを停止させればよい。

4.2 SIM評価部

シミュレーション結果に基づき時間情報の予測と検証評価を行う。以下に各々について述べる。

4.2.1 時間情報の予測

時間情報の予測項目は以下の三種類であり、対策検証・評価系において利用される。それぞれシミュレーション結果から容易に得られるので本報告では詳しく述べない。

(1) 不測異常解消時刻の予測

最初の不測異常対策操作を実行してから不測異常に関するプロセス量が正常な値に復帰するまでの時間 T_s を求める。これは対策監視部で利用される。

(2) 操作完了時間の予測

操作条件生成部において生成される条件は、タイミング条件、操作前条件、完了条件の三種類に大別できる。操作はタイミング条件と操作前条件が成立した時実行され、その結果完了条件が成立する。この時、操作開始から完了条件成立までの時間 T_c は制御の監視に利用される。この時間 T_c をシミュレーションにより求める。

(3) 操作タイミング時刻の予測

一般に火力発電プラントの運転操作は、その時のプラント運転状況に応じて、決められた順序で実行される。この時、タイミング条件が成立しなければ該当操作が実行できない。したがって、前の操作が完了して次の操作のタイミング条件が成立するまでの時間 T_t に基づいて制御の監視をする必要がある。この時間 T_t をシミュレーションにより求める。

4.2.2 シミュレーション結果の検証評価

SIM評価部のもう一つの目的は検証評価である。本報告ではプロセス量の制約違反に関する問題について詳しく述べる。ここで詳細検証・評価系で取り扱う制約とはプロセス量の制限値すなわち最大値と最小値に関するものである。この制約は初期状態から目標状態に至る過渡状態においてチェックすべき重要な項目である。

制限値制約： $\exists P(t), \forall t:$

$$\text{最小制限値}(P) \leq P(t) \leq \text{最大制限値}(P)$$

以下では制約違反に関する一般的な解消法を説明し、制御用エキスパート・システムにおける制約違反解消手順を明らかにする。

4.2.2.1 制約違反の一般的解消法

制約違反の発生に対して、以下の三種類の解消法が挙げられる。

(1) 制御目標値の変更

プラント制御装置の制御目標値を一時的に変更することにより、制約違反を解消する方法である。これは制御目標値がローカルに決められているような場合に有効である。

図3は火力発電プラントの構成機器である脱気器において、ローカル制御の対象である水面レベルに関する制約違反の解消法を示している。すなわち、制約違反量に対応したバイアス量を制御目標値に加味することによりプロセス変動を制限値の許容範囲内に抑えようとする方法である。

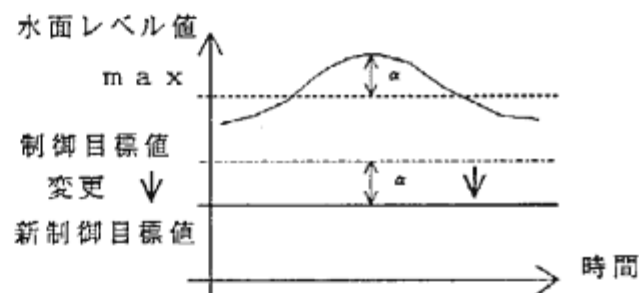


図3 制御目標値の変更による制約解消

(2) 制限値の変更

プロセス量に関する制限値そのものを変更することにより制約違反を解消する方法である。具体的には制約違反が発生したプロセスに関連する機器の状態を変更することにより行う。これは制御目標値がプラント全体の運転状況に基づいてグローバルに決定されており、制御目標値の変更が困難な場合に有効である。

図4は復水ポンプの吐出流量に関する制約違反の解消法を示している。復水ポンプの出力側機器の操作により復水ポンプに対する出力要求値(吐出流量)が復水ポンプ一台の容量を越える制約違反が発生した場合、復水ポンプの状態を二台運転している状態に変更し復水ポンプ全体の容量を増加させることにより制約違反を解消する。

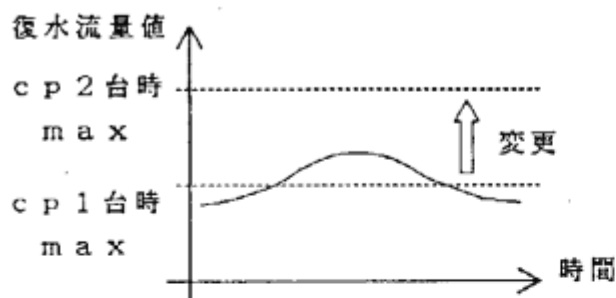


図4 制限値の変更による制約解消

(3) 別の操作を行う

制約違反が発生した機器では対応できない時、別の機器の状態を変更して制約違反を解消する方法である。これは推論をバックトラックして別の操作を考えることに相当する。

プラント制御装置における制御目標値の生成機構はモデル化がまだ実現していないが、制御目標値そのものは静特性に基づいたプロセスの入出力関係によりモデル化されている。したがって、本報告では制約解消法(2)および(3)に関して述べる。

4.2.2.2 制約違反解消手順

プラント制御装置の制御目標値が与えられているプロセス量は、深い知識の一つである対象モデルの出力要求値としてモデル化されており、制限値制約はこのようなプロセス量に対して与えられる。したがって、制限値制約のあるプロセス量と対象モデルで出力要求値の存在するプロセス量とは同一のものと考えることができる。このような観点から、SIM評価部から操作同定部へのフィードバックによる制約違反解消が以下のように実現できる。

図5に制約違反解消手順を示した。S0は不測異常発生時の初期状態、Seは操作同定部で生成された目

標状態であるとする。SeとS0との状態差分により得られる操作を実行した時のシミュレーション結果を図6に示す。時刻t0からシミュレーションを行い、時刻teに整定してSeに到達したとする。この時、機器Aの出力プロセスであるp4において時刻t1からt2にかけて制約違反が発生したとする。p4は時刻tmにおいて制約を最も大きく違反し、最大値val1を取る。時刻t1の直前の状態をS1、時刻t2の直後の状態をS2とする。

この時、制約違反を解消するためには時刻tmのシミュレーション結果のプロセス量が存在することが可能である状態を生成すればよい。このような状態をS3とすれば、S3における問題点は機器Aの出力プロセスp4の制約違反だけで、他のプロセスp1からp3までは問題がない。上述したように制約のあるプロセス量と対象モデルの出力要求値は同一であるので、機器Aに対して出力要求値val1を与えて操作導出推論を実行することにより、目標状態としてS3を生成できる。この時、先のシミュレーション結果で、時刻tmにおけるp1からp4のプロセス量が目標状態S3のプロセス量であり、制約違反があった機器A以外はこのプロセス量を問題なく確保できる。したがって、操作導出推論の対象は制約違反が発生した機器Aのみでよく、操作同定部における通常の推論のように他の機器に対する影響を考慮する必要がない。機器Aに対して導出された操作をS1において実行し、状態をS1の直後にS3に遷移させることで制約違反を解消できる。

また新しい状態S3を経由して操作を行うことで制約違反の発生を回避できる可能性が示したが、最初に操作同定部において生成した目標状態SeはS0を初

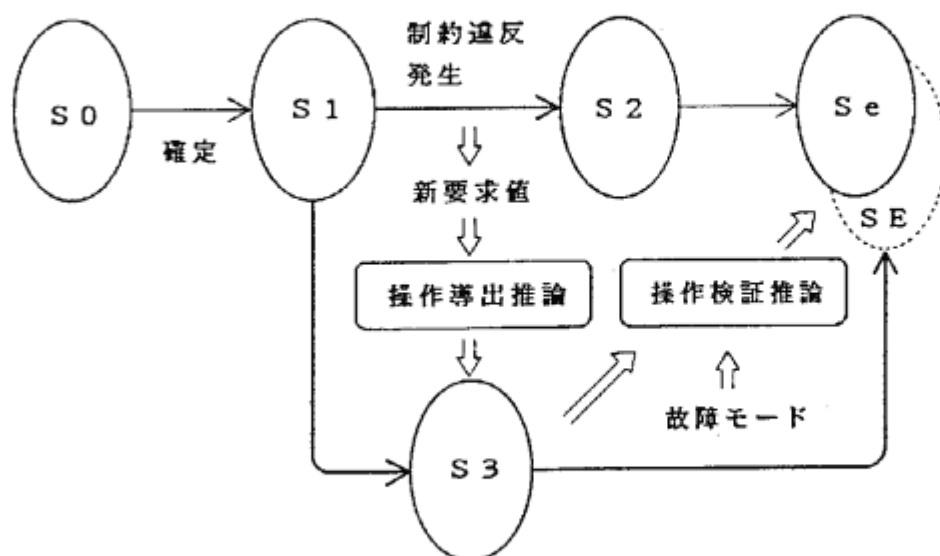


図5 制約違反解消手順

期状態として生成したものである。したがって、S3を初期状態とした新たな目標状態SEを生成する必要がある。これは故障仮説生成部において生成された故障モードに基づいた操作検証推論をS3を初期状態として再度実行することにより得られる。

以上の手順により状態S0、S1、S3、SEが決定される。状態S0からS1まではシミュレーションの結果制約違反が発生し

なかったことにより、その間に実行した制御知識は確定される。状態S1からS3までの状態遷移と状態S3からSEまでの状態遷移に対してはそれぞれ、操作条件生成部による制御知識の生成とSIM部とSIM評価部による検証・評価が繰り返し実行される。

上述した制約違反解消手順を図7にまとめる。

```

procedure 詳細検証評価 (MまたはD0, S0)
begin
  [Se, Op] <= 操作同定 (MまたはD0, S0);
  K1 <= 操作条件生成 (S0, Se, Op);
  PS <= SIM (S0, K1);
  [NG, D1, S1] <= SIM評価 (PS);
  if NG = \ = 制約違反発生
  then return (K1, Se);
  else
    [K2, S3] <= 詳細検証評価 (D1, S1);
    [K3, SE] <= 詳細検証評価 (M, S3);
    K4 <= 確定分 (K1) + K2 + K3;
    return (K4, SE);
  end;

```

NOTATION:
 Si, Se, SE: 状態, M: 故障モード, Di: 出力要求値
 Op: 操作, PS: プロセストレンド, NG: 制約違反フラグ
 Ki: 制御知識, [...]: リスト, <=: 代入規則

図7 制約違反解消アルゴリズム

5 詳細検証・評価の例

図8に示す火力発電プラントの給水系統において次のような初期状態S0を考える。ボイラに水を供給する二台の給水ポンプの内a-bfpはapc（自動プラント制御装置）下で運転中でありb-bfpは停止状態である。また脱気器に水を供給する二台の復水ポンプの内a-cpは運転中でありb-cpは停止状態である。出力要求値として390 [T/H]が要求されており、各ポンプの容量は400 [T/H]である。

S0:

a-bfp (apc), b-bfp (off)
 a-cp (on), b-cp (off)

この時、a-bfpの停止故障という不測異常が発生すると、操作同定部において目標状態Seを生成する。

Se:

a-bfp (off), b-bfp (apc)
 a-cp (on), b-cp (off)

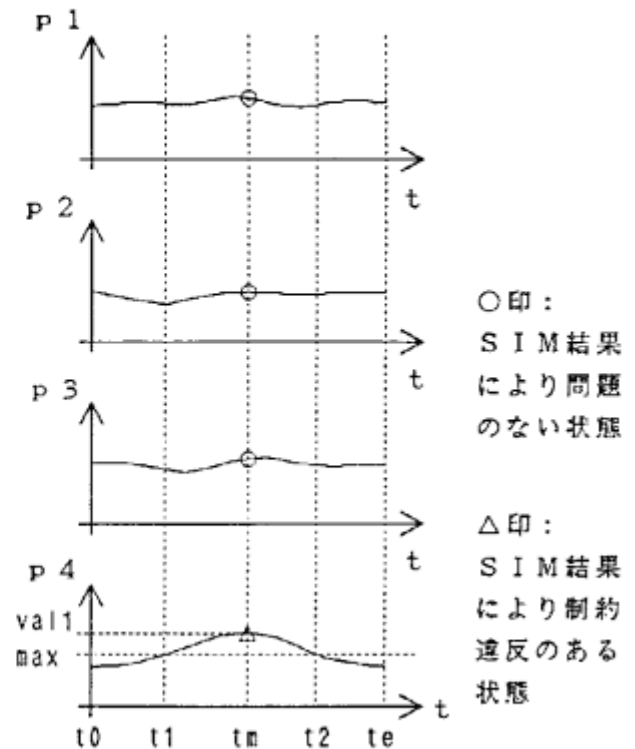


図6 シミュレーション結果例

この結果、b-bfpを起動する操作が導出され、a-bfpの停止操作と併せて制御知識が生成される。これをSIM部とSIM評価部において検証すると図9に示すように、給水流量の変動により、復水ポンプの吐出流量Qcに関して一台分の容量400 [T/H]を越える流量が時刻t1からt2にかけて必要となり、制約違反が発生する。

そこでQcの最大値を出力要求値として復水ポンプに対して操作導出推論を実行することにより、b-cpを（一時的に）追加した状態S3が生成される。

S3:

a-bfp (apc), b-bfp (apc)
 a-cp (on), b-cp (on)

このS3に対して故障モードに基づく操作検証推論を再度実行することにより再び目標状態Seが生成される。以上の結果、図10に示す操作手順が生成され、これらをさらに検証評価し制約違反が発生しないことを確認する。

6 おわりに

静特性ベースの深い推論機構と動特性ベースの詳細検証機構との融合法を提案し、詳細検証・評価系の枠組みを示した。

今後は操作の順序やタイミングの厳密な解析法、操作条件生成部へのフィードバック法、プラント制御装置のモデル化など詳細検証・評価系の洗練化が検討課題として残されている。

謝辞

本報告はICOT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。研究の機会を与えて頂いたICOT第5研究室生駒室長に感謝致します。

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, pp. 153-158 (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 (1989)
- [3] 小沼千穂, 他, “不測事態に対応するプラント制御エキスパートシステム—定性推論を組み込んだ推論機構の開発—”, 第40回情全大 (1990)
- [4] 鷲尾隆, 他, “定性推論のファジー化の試み”, 第5回知識工学シンポジウム, pp. 147-152 (1987)

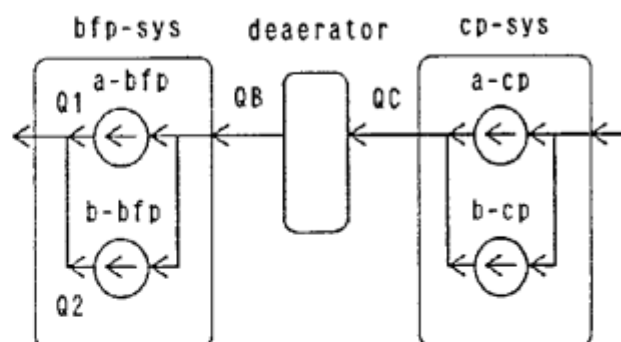


図8 火力発電プラント給水系統

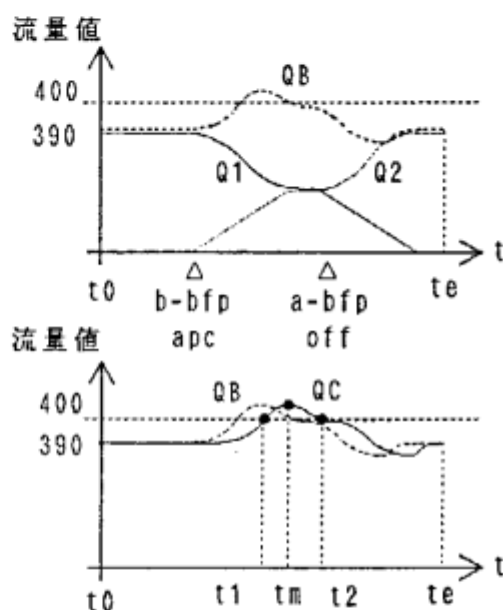


図9 流量のシミュレーション結果

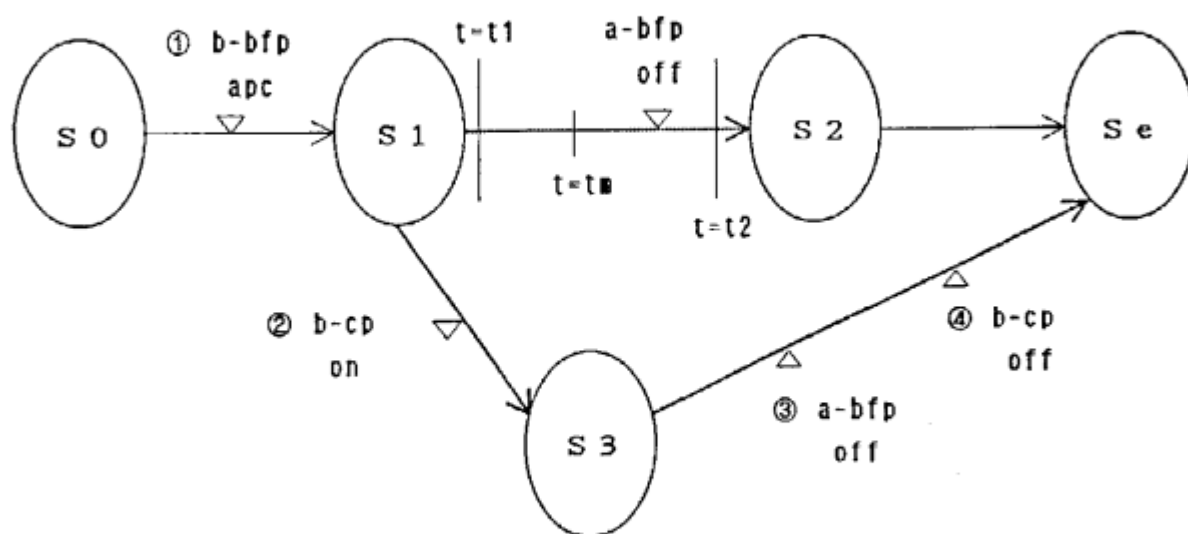


図10 検証評価結果