

原子力発電プラント保守支援エキスパートシステム

Expert System for Maintenance of Nuclear Power Plants

原子力発電プラントの診断および保守作業計画作成の保守業務を支援するエキスパートシステムの基本機能を開発した。原子力発電のような大規模プラントの保守には、多くのマンパワーが必要である。このため、熟練技術者の専門的知識と経験的知識を利用し、保守性向上を図るシステムの開発が望まれていた。

このシステムは、プラント診断と保守作業計画支援のサブシステムから成る。前者は、知識ベースに基づく不具合内容の診断後、シミュレータを用いて処置方法をガイドする。後者は、保守作業が互いに干渉したり、運転に影響しないように、分枝限定法を併用して計画を作成する。今後、実用化に向けて、マンマシン性の向上および知識の拡充を図る予定である。

伊藤哲男* Tetsuo Itô
笠原孝保** Takayasu Kasahara
渡辺孝雄*** Takao Watanabe
松木 勉**** Tsutomu Matsuki

1 緒 言

わが国の原子力発電所では、これまで安全性の確保および信頼性の向上を最重要課題として取り組んできた成果が実り、ここ数年70%を超える高い設備利用率を示している。今後の総発電電力量に占める原子力の比率の増大を考慮すると、この高い設備利用率を維持し、電力の安定供給を継続していくために、発電所の保守技術の高度化が重要課題となってくる。

原子力発電プラントは、多数の系統・機器・部品から成る大規模システムであり、この保守には、電力会社やメーカーなどの熟練技術者の専門的知識と経験に基づく判断が必要である。

このため、保守面での熟練技術者の専門的知識や経験的知識を知識ベースに格納し、迅速に判断を支援するエキスパートシステムの開発が望まれている。

エキスパートシステムとしては、すでに運転支援用のシステムを開発している^{1),2)}が、今回、系統・機器の不具合検出から、不具合個所の修理を含む保守作業の計画・管理に至る保守業務を支援する保守支援エキスパートシステムの基本機能を開発したので、これについて述べる。

2 システムの概要

保守支援エキスパートシステムの基本構成を図1に示す。本システムは、プラント診断サブシステムと保守作業計画支援サブシステムから成る。プラント診断サブシステムでは、プラントからのプロセス信号をもとに、プラントの不具合を検出し、不具合個所および原因を同定して、同定内容と処置

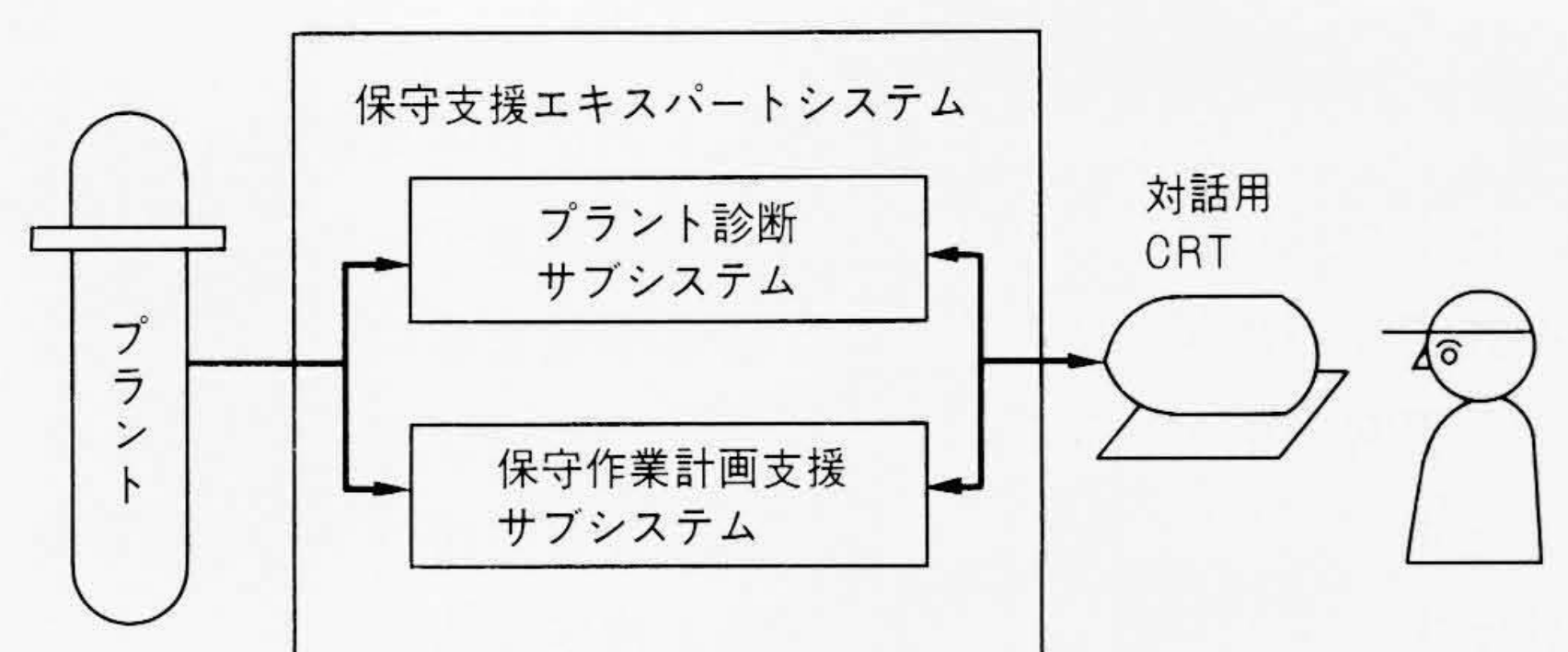


図1 保守支援エキスパートシステムの基本構成 本システムは、プラント状態を監視し、診断から保守作業計画作成までをガイダンスする。

方法を対話用CRTによりガイドする。保守作業計画支援サブシステムでは、この不具合個所の修理作業を含めて、保守作業全般の計画を作成し、係員にガイドする。本システムは、このように不具合検出から保守作業計画までの保守業務を一貫して支援する。

3 プラント診断サブシステム

プラント診断サブシステムは、原子力プラントに不具合が発生したときに、観測された異常事象から不具合個所と原因を同定する機能を持つ。

3.1 サブシステムの構成

プラント診断サブシステムの構成を図2に示す。サブシステムは、異常検出、診断および処置ガイダンスの三つの機能から成り、図示の知識ベースを持つ構成とした³⁾。この知識ベ

* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場

表1 プラント診断用知識ベースの構成 プラント診断に使用する知識ベースの内容を示す。

No.	データベース	内 容
1	プロセス情報関連データ	プロセスデータ名称，計測器データや警報設定値など。
2	事象波及データ	事象名称，原因事象および結果事象
3	不具合原因データ	不具合の原因，確認方法や事象発生時の処置方法など
4	運転方法データ	運転制限条件，操作目標や具体的な運転手順など

ースの内容構成を表1に示す。以下，各処理機能の概要を述べる。

3.1.1 異常検出

異常検出機能は，異常発生監視と計測器健全性検定の処理から成る。

異常発生監視処理では，プラントのプロセスデータの値や変化率を，知識ベースのプロセス情報関連データに格納したそれぞれのしきい値と比較し，異常事象発生の有無を判定する。異常事象が観測された場合には，それが実際にプラントで発生した事象か，計測器の故障による見掛け上の事象かを判定するために，計測器の健全性を検定する。

計測器健全性検定の処理では，観測データ間の関係を調べることにより，観測事象が計測器の故障や誤動作による見掛

け上の事象ではないかどうかを検定する。すなわち，異常事象を観測したデータから上流，下流および並列位置で観測しているデータに変化が現れていないかどうかを調べる。もし，関連データに変化が現れていなければ，観測に用いた計器が故障していることになる。この場合には，その計測器が故障しているものとして，故障確認のためのチェック項目を対話用CRTに表示し，運転員に確認を依頼する。観測した事象が計測器故障によるものでない場合には，実際に異常事象が発生したと判断して，図3に示すような観測事象データを作成する。

3.1.2 診 断

診断機能は観測事象データに基づき，観測された異常事象の原因となりうる候補を事象波及に関する知識ベースを使用して推定し，候補の中から実際のプラント状態を説明できる原因を特定する。これは仮説検定による処理で行う。

仮説検定による処理を図4の例を用いて説明する。この図は，異常事象の波及と観測の過程を模式化したものである。いま同図のように，不具合原因Aによって事象Bが発生し，それに起因して事象CおよびEが発生し，警報Dにより観測されたものとする。実線は実際に発生した事象とその波及を，また破線は発生した事象の候補となりうる仮想的な事象とその波及を示す。これらの事象波及の関係は，知識ベースの事象波及データに格納されている。また，△印を付けた事象は計測器によって事象発生の有無を確認できるものとする。

警報Dが発生した場合の原因同定の処理プロセスは次のようである。まず，警報Dの原因候補の事象は，知識ベースの事象波及データに基づきIとCの二つであることがわかる。ここで

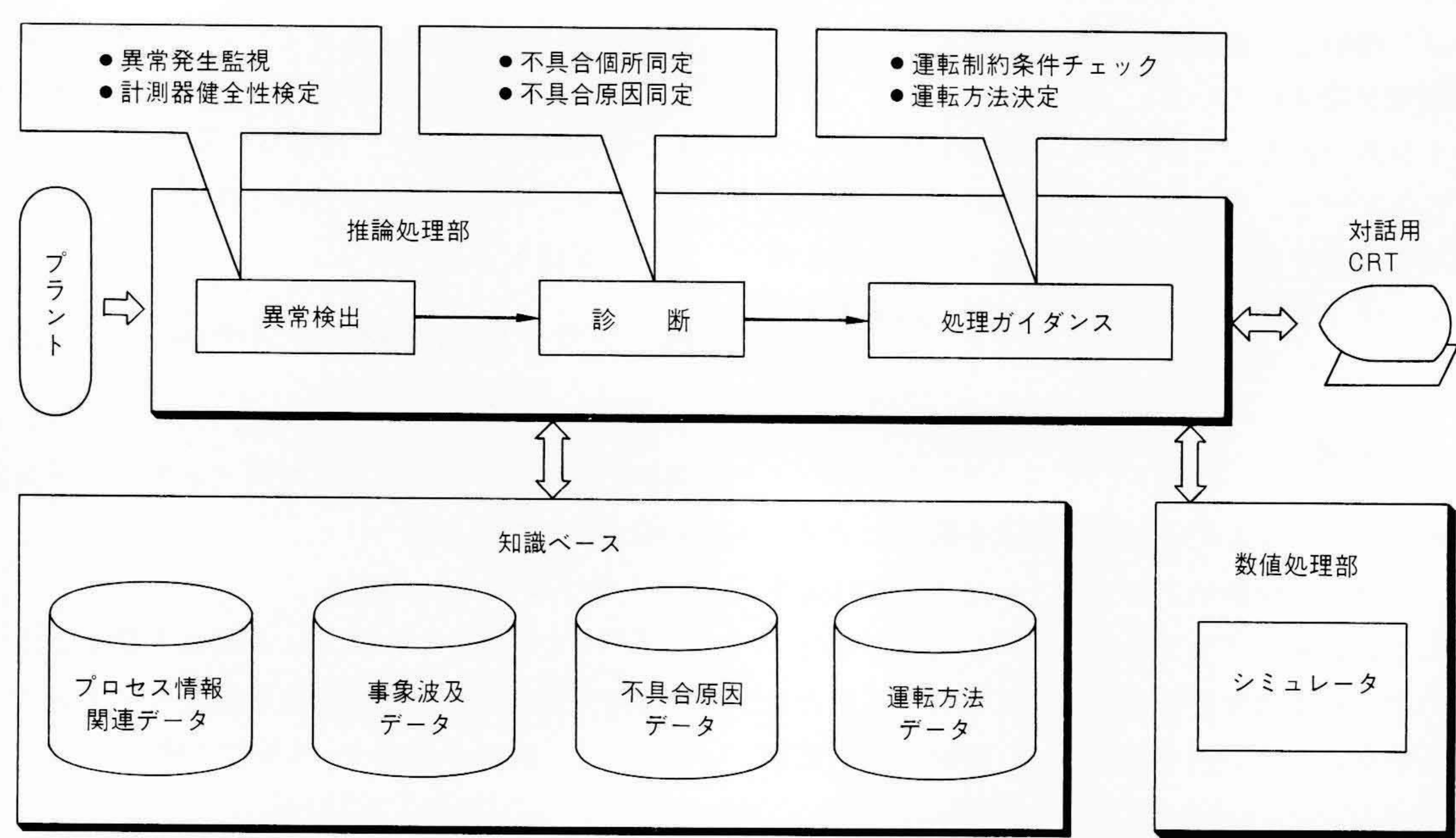


図2 プラント診断サブシステムの構成 本サブシステムは，知識ベースに格納した各種データを用いて異常検出，診断の後，シミュレータを併用して処置のガイダンスをする。

EVENT	名称	Value	観測事象
	Ako	Value	事象
1	事象		主蒸気流量— 給水流量ミスマッチ
	時刻	0325121820	
2	事象		SRV排気管 出口温度上昇
	時刻	0325121821	
3	事象		タービン蒸気 流量減少
	時刻	0325121822	
4	事象		ドライウエル 圧力上昇
	時刻	0325121824	
5	事象		サプレッション プール水位上昇
	時刻	0325121835	

注：略語説明など

SRV (Safety Relief Valve), 「0325121820」(3月25日12時18分20秒)

図3 観測事象データの例 プラントデータは、計測器健全性の検定後、事象名と発生時刻を対にした観測事象データとしてまとめられる。

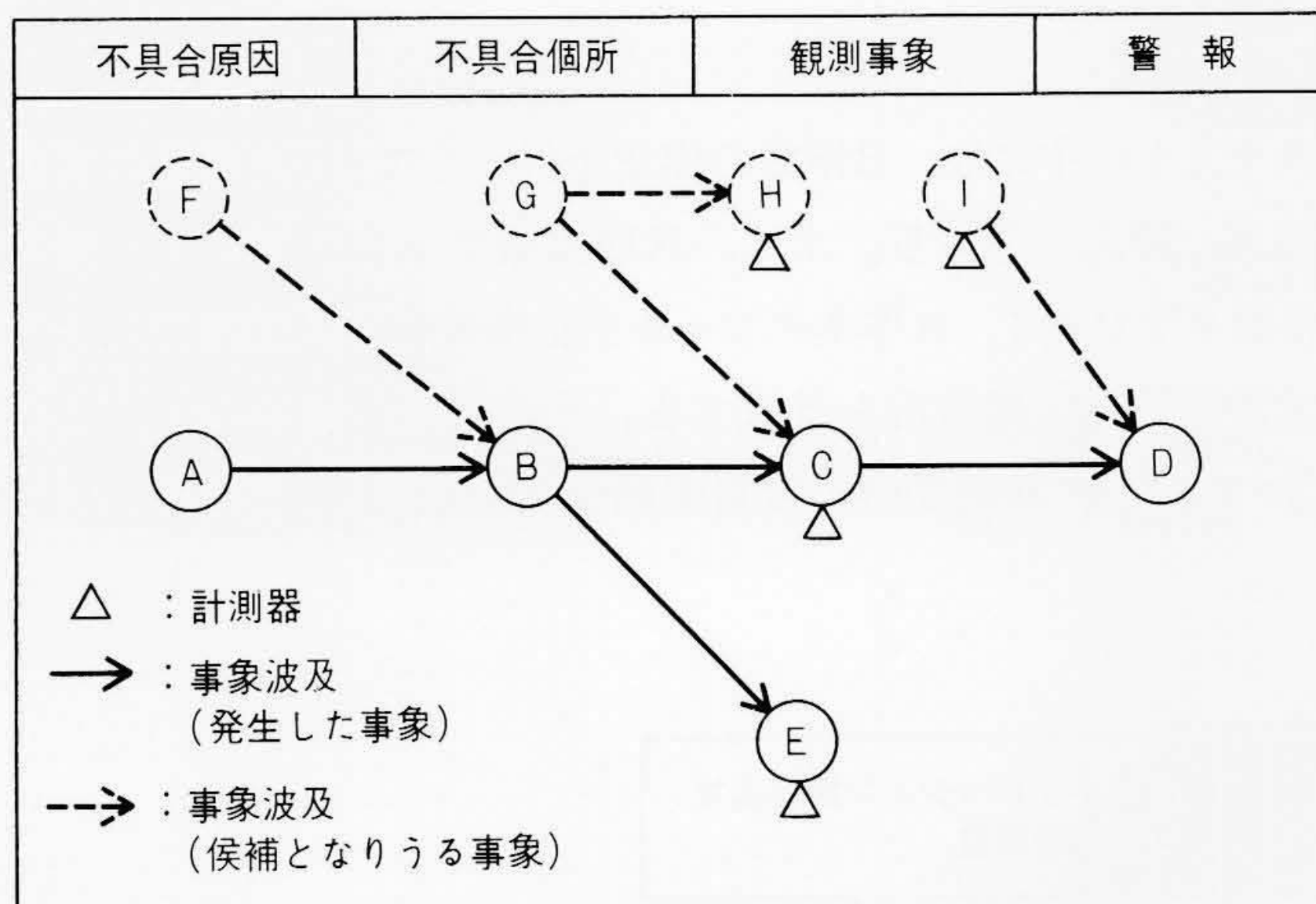


図4 仮説検定処理の例 不具合箇所や原因を仮定し、その波及事象の有無を観測によって確認し、仮説の正しさを検定する。

は、観測データからIは発生しておらず、Cが発生していることを確認できる。次に、Cの原因となりうる候補は、同様に事象波及データに基づくとGとBのいずれかであるが、GもBも計測器がなく、直接観測できない。しかし、Gの波及事象に相当するHが発生していないことを観測データから確認できれば、Gが発生していないことを間接的に確認できる。同様に、Eの観測データを確認すれば不具合箇所として、Bが発生していることを間接的に確認できる。さらに、Bの原因候補としてはAとFが挙げられるが、観測による特定ができない。この場合には、確認項目をCRTに表示し、運転員による目視や切り

替え操作をガイダンスして、対話によって不具合原因を同定できる。ここで使用する知識ベースは、不具合原因データで、不具合原因と確認方法を対応づけて整理したものである。

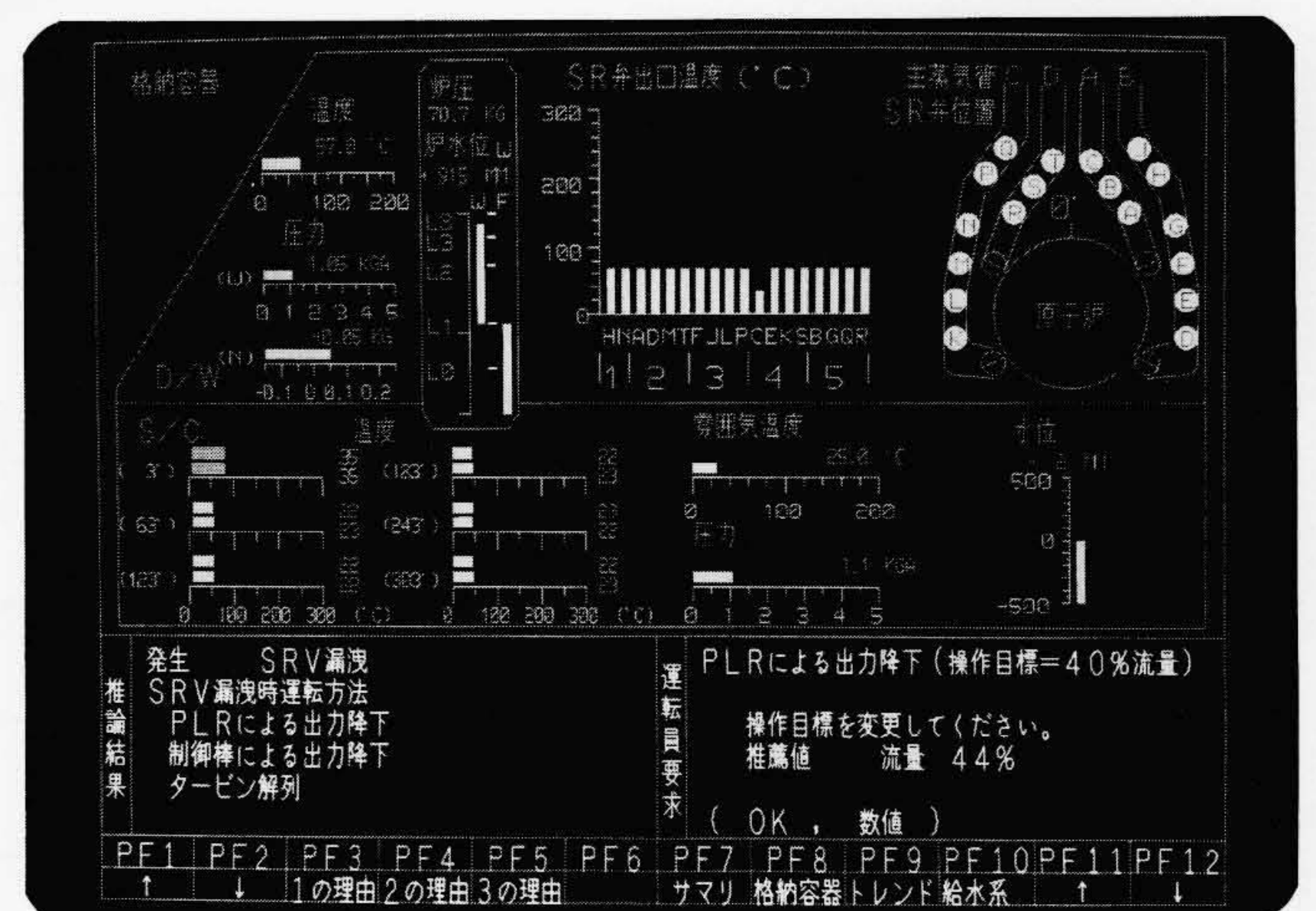
3.1.3 処置ガイダンス

運転方法データを用いて、処置方法の候補を選択する。この運転方法データは、運転マニュアルに基づいて作成するものであり、不具合箇所や原因に応じて、制限条件、操作目標および可能な運転方法を整理したものである。運転方法の候補が複数個存在する場合には、CRTに表示して運転員の判断を求める。

3.2 プラント診断例

本サブシステムの機能試験時のCRT画面例を図5に示す。画面上側は系統図やプロセスデータの表示エリアである。画面下側はメッセージのエリアであり、推論結果と運転員への要求を表示する。この例では、沸騰水型原子炉の逃がし安全弁SRV (Safety Relief Valve)の漏れが同定され、推論結果に表示されている。SRVは通常閉じており、原子炉圧力が規定値以上になったときに開いて、蒸気を圧力抑制室S/C (Suppression Chamber)に導き、過圧を防止する。SRV漏れの場合でも、漏れ蒸気は閉じた系統内にあるので、安全上問題はない。ここでは、SRV漏れのほかにも不具合箇所の候補があったが、前述の仮説検定の方法によって、各候補の結果事象の発生の有無をチェックし、S/Cの一部の温度上昇などの観測事象に基づき、不具合箇所がSRV漏れであると判定している。

さらに、推論結果にはSRV漏れ時の運転方法として、再循環系PLR (Primary Loop Recirculation)による出力降下に始まる原子炉の停止手順を表示している。また、運転員への要



注：略語説明

PLR (Primary Loop Recirculation)
S/C (Suppression Chamber)
D/W (Dry Well)

図5 プラント診断サブシステムのCRT画面例 関連するプロセス量の表示とともに、診断や運転方法についての診断結果、および運転員への要求事項をガイドしている。

求欄には、シミュレータによる予測結果に基づき、再循環流量を44%に変更して下げるようにガイドしており、不具合発生時の迅速な処置が可能である。

4 プラント保守作業計画支援

プラント診断サブシステムで同定された不具合個所に対する修理作業を含む各種保守作業の計画では、プラント全体の作業に悪影響を与えないように、全体の作業計画を作成することが必要である。保守作業計画支援サブシステムは、このような保守作業の計画および管理を支援する。

4.1 サブシステムの構成

本サブシステムの構成を図6に示す。知識ベースのうち、系統構成、運転基準および作業内容の各データはフレーム表現であり、状態伝搬データはルール表現である。図7に、一例として、系統構成と作業内容のフレーム表現データを示す。本サブシステムでは、まず作業計画担当者によって、保守作業名、時間帯および必要作業人員から成る初期計画が入力された後、本サブシステムは以下の処理をする⁴⁾。

4.1.1 干渉判定

干渉判定処理では、初期計画で同時刻に実施する予定の作業の相互の干渉を判定する。干渉判定の処理過程の内容を図8に具体例で示す。ここでは、原子炉の制御棒駆動水系のフィルタの交換作業(A作業)と再循環ポンプシール水の流量計の点検作業(B作業)とを計画する場合である。まず、両方の作業に関係する機器および配管系の接続状況を表現した機器接続グラフを、系統構成データに基づいて作成する。また、作業内容データから、各作業の作業条件のリストを作成する。こ

	フレーム名	スロット	ファセット	バリュー	
系統構成データ	機器名	上位概念	VALUE	上位概念	
		出力ポート	1	接続端子名	
			2	接続端子名	
		入力ポート	1	接続端子名	
	動作条件		VALUE	ルール名	
	接続端子名	種類	VALUE	接続端子種類	
作業内容データ	作業名	サブタスク	1	サブタスク名	
			2	サブタスク名	
		継続関係	(1, 2)	逐次処理	
			(2, 3)	並列処理可	
		作業周期		VALUE	数値
		サブタスク名	操作手順	1	操作内容 作業条件
	2				
	作業時間		VALUE	数値	

注：用語説明 サブタスク(作業を細かい作業単位に分割したもの)
図7 フレーム表現データ 系統構成と作業内容に関する、それぞれのフレーム表現のデータ形式を示す。

のリストの中には、B作業の作業条件として、「流量計の変動量0」が入っている。次に、状態伝搬データを用いて、機器接続グラフ上で、A作業のフィルタ交換時の弁開閉操作による流量変動の伝搬状況を計算する。その結果、図示の①、②、③のように、弁開閉時の流量変動が順に伝搬し、B作業の作業

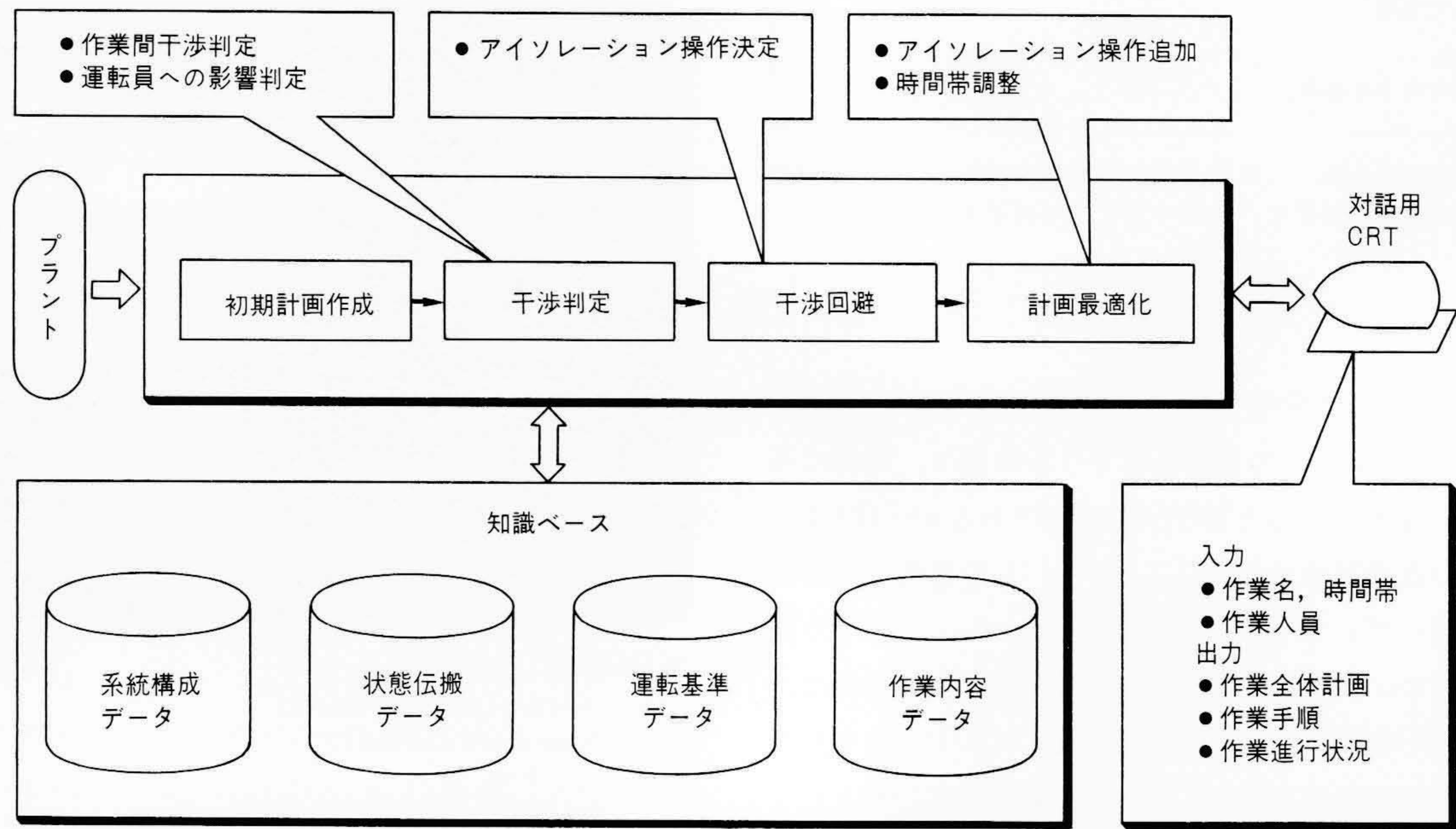


図6 保守作業計画支援サブシステムの構成 本サブシステムは、知識ベースに格納された各種データを用いて、作業間の干渉などを回避した最適な計画を作成する。

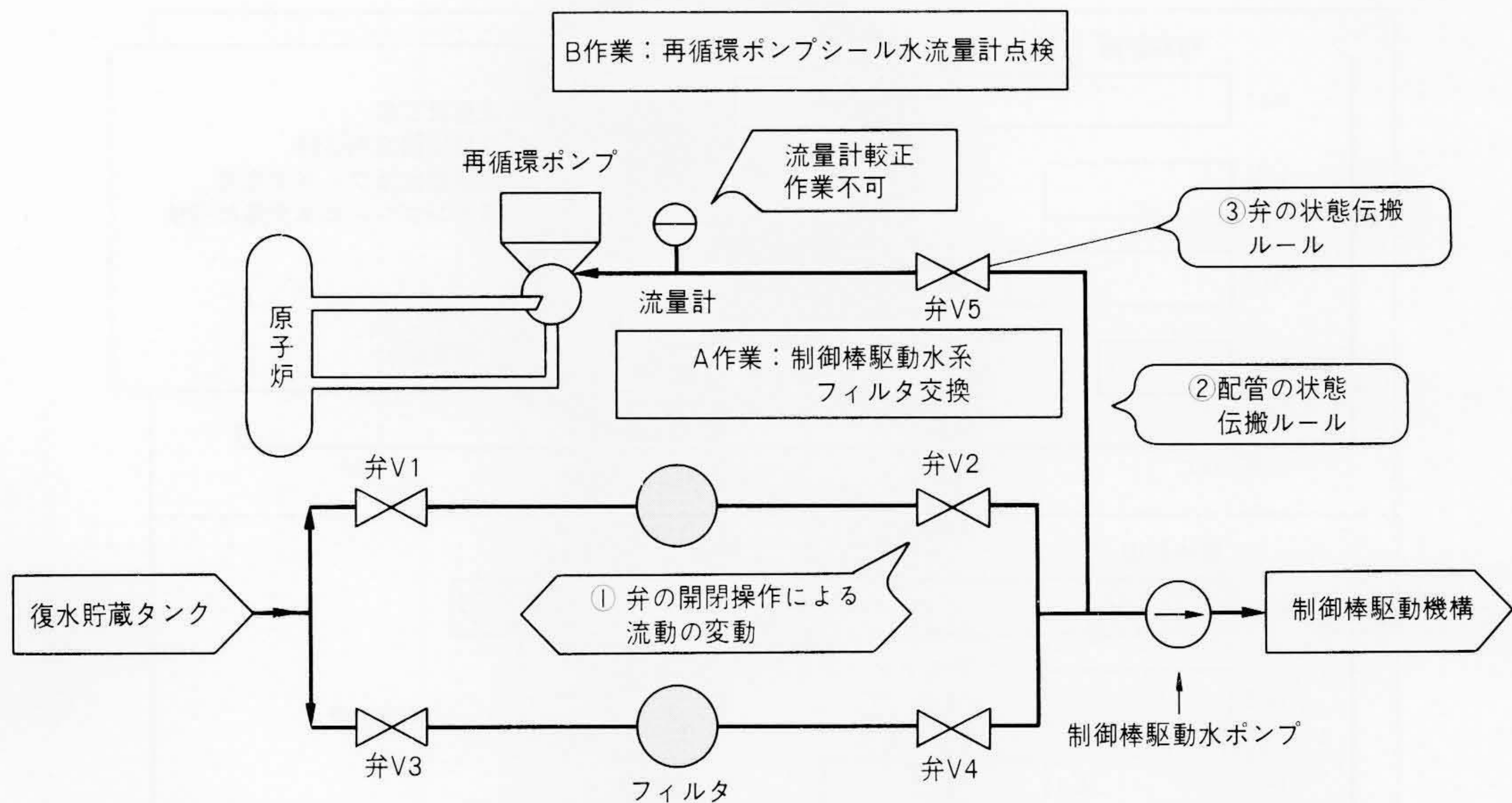


図8 作業間干渉の判定処理の例 A作業のプロセス量変動がB作業の対象機器に伝搬するという推論結果から、両作業間に干渉ありと判定できる。

条件である流量変動量0を満たさないで、干渉ありと判定する。

4.1.2 干渉回避

干渉回避とは、前述の干渉がある場合に、(1)それぞれの系統を隔離する、すなわちアイソレーション操作をする。(2)アイソレーション操作ができない場合に、作業の実施時間帯を変更することである。配管系については、あらかじめアイソレーション可能な系統構成のパターンを基準パターンとして用意しておき、パターン照合を行う。もし、基準パターンとの照合が成功すれば、その基準パターンに対応して作業内容データに格納してあるアイソレーション操作手法を用いて干渉から隔離する方法を決定する。電気計装系では、アイソレーション可能なパターンは複雑になるので、個別にアイソレーション手順を用意している。以上のアイソレーションが不可能な場合には、計画最適化部で作業時間帯を調整する。

4.1.3 計画最適化

本サブシステムでは、計画最適化のために分枝限定法⁵⁾を用いている。この方法は、最適な作業計画を階層ツリー状に探索する。分枝限定法による処理例を図9に示す。作業ネットワークは、作業A, Bをそれぞれ構成する細分化したサブタスクA1, A2およびB1, B2, B3の順序関係と干渉関係を表現している。システムは各時間帯で、干渉や作業人員などの制約条件を判定する。もし、制約条件が満足されなければ、実施時間帯の変更やアイソレーションの追加をする。その際、制約条件を満足させる方法が複数とありあれば、同図の分枝ダイアグラムに示すように分枝を生成する。各分枝について目標関数に対する評価値を推定し、より良い分枝を順次選択する。図示の例は、目標関数が作業時間最短の場合である。

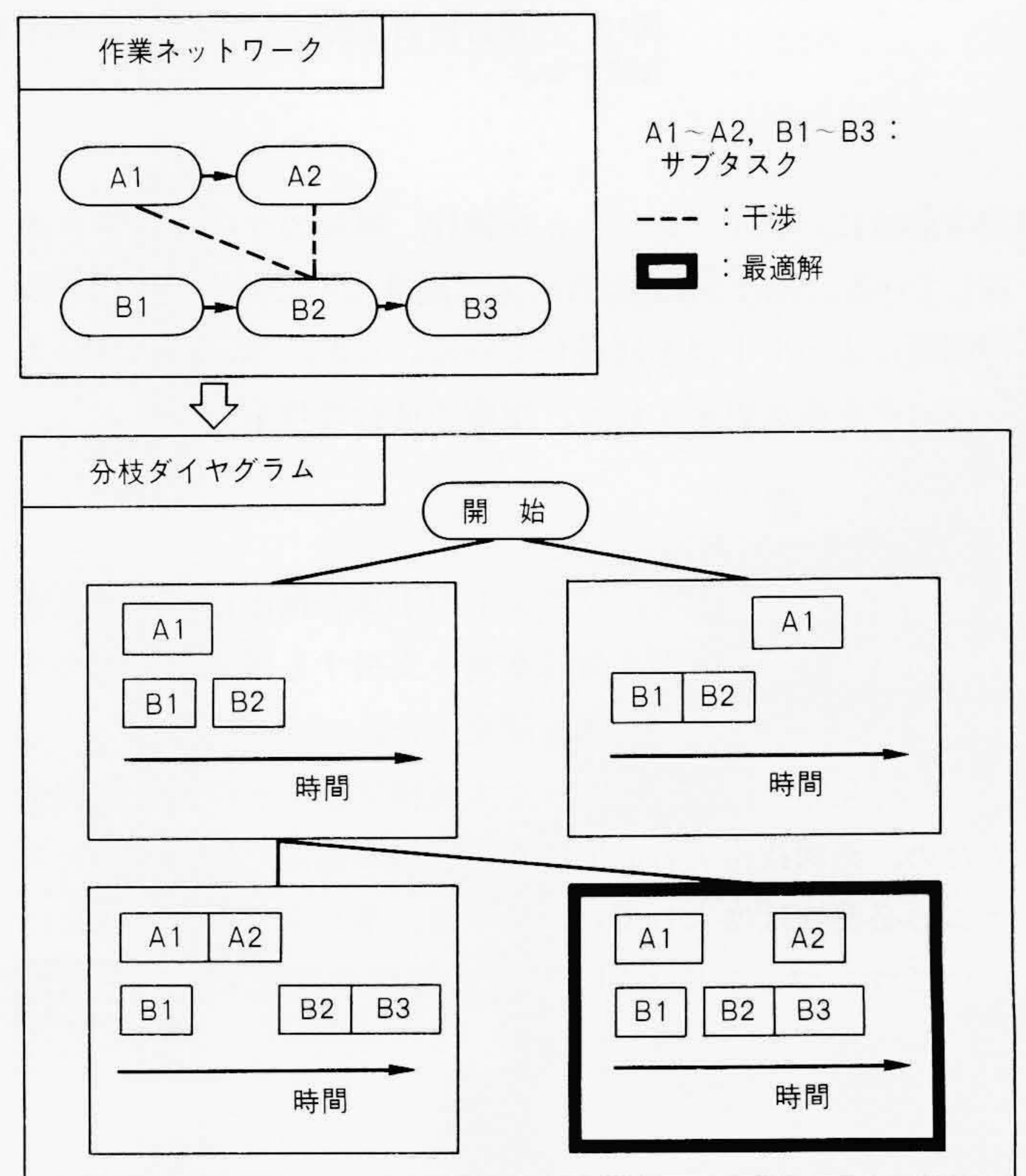


図9 分枝限定法による計画最適化処理の例 A, B両作業のサブタスク間の干渉を回避する計画の中から、最短時間を達成する計画を階層ツリー状に探索する。

4.2 保守作業計画作成例

4種類の保守作業についての計画作成例を図10に示す。干渉のある初期計画に対し、最終計画は作業人員の制約を考慮に入れて干渉を回避し、作業時間最短を達成している。No. 1の給水流量計交換作業では、運転との干渉を避けるために作

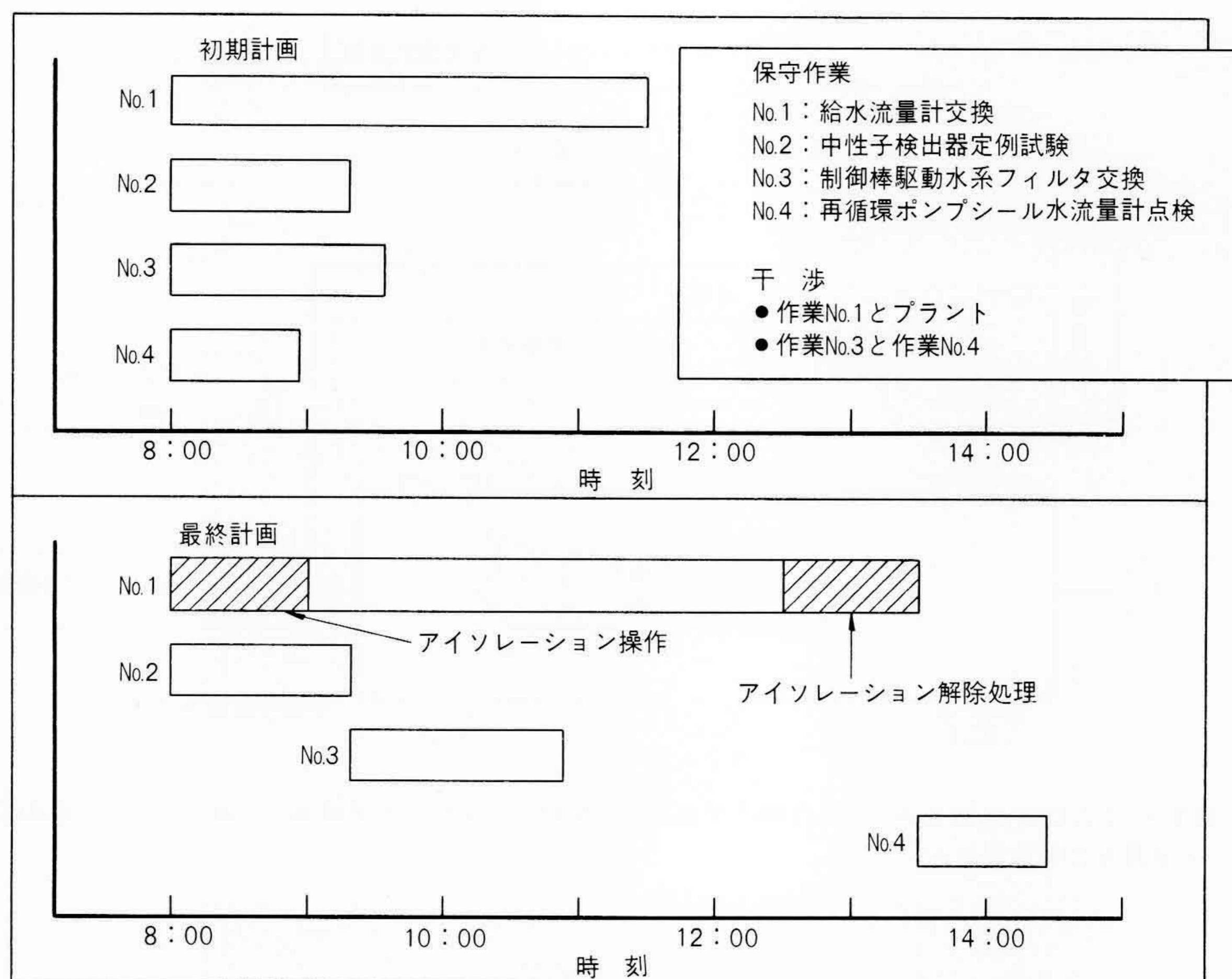


図10 作業計画の作成例 4種類の保守作業を対象として、初期計画を最適化して最終計画を作成する。

業の前後に、アイソレーション操作、解除のサブタスクを追加している。No. 3およびNo. 4は図8に示した作業で、時間帯調整によって干渉を回避している。なお、本システムは入力データを逐次更新すれば、作業の進行管理もできる。

5 結 言

知識工学を応用して、プラントの不具合検出に始まり保守作業の計画・管理に至る保守業務を支援する保守支援エキスパートシステムの基本機能を開発した。

原子力発電プラントのような大規模プラントの保全性向上のため、熟練技術者の高度な知識を組み込んだ保守支援システムの必要性は増大している。今後、本システムの実用化に向けてマンマシン性の向上および知識の拡充を図る予定である。

なお、本報告の内容は、通商産業省補助事業として実施中の「原子力発電プラントマンマシンシステムの開発」に関する研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 木口, 外: 知識工学を適用したプラント運転ガイダンス方式の開発, 日本原子力学会誌, 25, 298~305(1983-4)
- 2) 佐藤, 外: 総合ディジタル監視制御システム“NUCAMM-90”, 日立評論, 70, 4, 395~402(昭63-4)
- 3) 西沢, 外: 知識工学を応用したプラント診断・ガイダンス手法の開発, 第2回ヒューマンインタフェース・シンポジウム, 179~184(1986-10)
- 4) 笠原, 外: プラント保守作業における作業間の干渉判定と干渉回避手段決定手法の開発, 日本原子力学会誌, 30, 11, 1030~1037(1988-11)
- 5) 茨木: 組合せ最適化, 産業図書(1983)