

自律型プラント用知識ベース構築のための知識獲得手法の開発(I)

(その1：知識コンパイラの原子力プラント用知識獲得に対する適用性評価)

1991年6月

大阪大学
産業科学研究所

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

自律型プラント用知識ベース構築のための知識獲得手法の開発 (I)

(その1: 知識コンパイラの原子力プラント用知識獲得に対する適用性評価)

平井賢仁*、来村徳信**、溝口理一郎**
吉川信治***、遠藤昭***

要旨

将来の原子力プラントの信頼性、安全性の向上のためには、異常診断を運転員に依存せずに行う情報処理技術が有効と考えられるが、これに必要な異常診断知識を従来のインタビューによって獲得しようとする限り、矛盾の排除、欠落の防止、知識の完備性に問題がある。これらの問題を解決するために、「深い」知識、即ち設計情報や一般的な物理知識に基づいて異常診断知識を獲得する、「知識コンパイラ」という手法が提唱されている。

本研究の目的は、この手法の、原子力プラントの異常診断獲得への適用性を評価し、現段階での能力限界、及び実用化のために必要な技術課題を明確にする事である。

本研究では、大阪大学で開発された、機械系の故障診断用知識コンパイラに、「深い知識」として原子炉主冷却簡易モデルの各機器におけるプラント変数間の変化伝播関係を定性的に表現して与えた。その上で、観測された異常兆候から、その原因となり得る事象を遡行推論によって列挙し、その各々が発生した場合に他に観測される兆候を順行推論によって導き、異常診断知識を生成する事を試みた。

この結果得られた結論は以下の通りである。

- ① 知識コンパイラで用いている対象システムの記述方法は、原子炉主冷却系の記述に対して、基本的には適用性を有している。
- ② 個々の機器におけるパラメータ間の定性的変化伝播は容易に知識コンパイラの知識ベース内に記述できる。
- ③ 原子炉の主冷却系が、熱媒体が循環するループが熱交換器を介して多段結合されている構造を有している事に起因して、遡行推論、順行推論のいずれにおいても同一パラメータに互いに矛盾する定性値が割り当てられる現象が観察された。
- ④ 順行推論においては、矛盾の発生に応じて、推論を制御する機構を付加する必要がある。
- ⑤ 現状では、各機器の性能を表すパラメータが定められた範囲を逸脱して増大するような事象が出現した場合でも、正常とみなしているが、これを異常と解釈して故障仮説を生成する機能の付加が必要である。

今後最優先に明確にすべき事は、③の問題点が、定性推論という手法の範囲では解決可能なものか、あるいは定量的な情報処理によってのみ解決可能なものかという事であると結論された。

* 関西大学工学部

** 大阪大学 産業科学研究所

*** 動燃事業団大洗工学センター技術開発部フロンティア技術開発室

June, 1991

K. Hirai*, Y. Kitamura**, R. Mizoguchi**
S. Yoshikawa***, A. Endou***

Abstract

Plant diagnosis is desired to be performed without human operators, to make future nuclear power plants more reliable and safer than the existing nuclear plants. However, knowledge acquired by conventional interview method can hardly get rid of contradictions and defaults, and can not be thorough. In order to overcome these problems, a new knowledge acquisition method has been proposed: each knowledge is accumulated based upon "deeper" knowledge, i.e. plant design description, generally-known physics, etc. This kind of knowledge acquisition method is called "knowledge compiler".

The purpose of this study is to evaluate the applicability of this method to knowledge acquisition for nuclear plant diagnosis, to clarify limitation of this method at the present stage and to identify problems to be solved for practical applications.

Propagation of changes in process parameters through each component was qualitatively described for a nuclear plant and given as the "deeper knowledge" a knowledge compiler, which has been developed in Osaka University for diagnosis of mechanical system. For an assumed anomalous symptom, all possible cause events were listed up by backward reasoning. And then, other symptoms to be activated by each of the above deducted possible cause events were derived by forward reasoning.

Thus an automated knowledge acquisition was tried for nuclear plant diagnosis.

The following are revealed through the trial:

- ① Data representation used in the compiler is basically suitable for describing the heat transport system of the nuclear plant .
- ② The propagation of qualitative change in process parameter for each component can be easily expressed as the knowledge base of the compiler.
- ③ It has been observed that two qualitative values contradicting each other are assigned to a parameter, both in backward and forward reasonings because the heat transport system of the nuclear plant has thermally connected fluid circulating loops.
- ④ In the forward reasonings, the reasoning engine should be equipped with a control mechanism to change the reasoning process when above-mentioned contradiction is detected.
- ⑤ In case that a component is assumed to be functioning excessively, the current version compiler generates no failure hypothesis. The compiler should be modified to generate a failure hypothesis in such a case.

It is the most important subject hereafter to study whether the above item ③ can be solved by qualitative method, or can only be solved by some quantitative approach.

*Faculty of Engineering, Kansai Univ.

**The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.

***Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,

O-arai Engineering Center, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation

目次

1章 緒言	1
2章 知識コンパイラの概要	2
2-1 知識コンパイラの動作原理	2
2-2 ドメイン特化型知識コンパイラKCⅡ-DSTの概要	3
3章 高速実験炉「常陽」主冷却系への知識コンパイラの試験的適用	12
3-1 高速実験炉「常陽」の概要	12
(1) 知識コンパイラの対象とした「常陽」主冷却系モデル	12
(2) 知識コンパイラ適用のための「常陽」主冷却系のデータ表現	13
(3) 導出された異常診断知識の例	18
3-2 知識コンパイラの「常陽」主冷却系への適用性評価	19
(1) 知識コンパイラデータ構造の原子炉、プラント構成機器に対する記述力	19
(2) プラント状態変数に関する定性的知識に対する記述力	20
(3) 導出された異常診断知識の妥当性	21
4章 知識コンパイラの問題点とその改良	27
4-1 機能の方向への逸脱	27
4-2 推論矛盾	28
5章 結論	33
参考文献	35
執筆分担	36

1章 緒言

資源に乏しく、かつ多くの人口と高度に発達した産業を有する我が国にとって、原子力は今後共欠く事のできないエネルギー源と考えられている。大量の核物質と潜在的なエネルギーを内包しているという特殊性を考え合わせると、原子力プラントの安全性、信頼性の確保・向上に対する社会的要求は種々の産業分野の中でも最も高いものの一つである。現在までに報告されている原子力プラントの異常故障等を分析すると、それらの大半が人的因子に起因するもので、その安全性、信頼性は工学的に改善し得る余地を残している。

原子力プラントの、人的因子を可能な限り排除してその安全性・信頼性を確保・向上するためには、現在、訓練を受け、経験を積んだ熟練運転員が行なっている運転、制御を工学的に代替する情報処理システムを構築することが必要である。このために、原子力プラントの運転・制御に際して運転員が活用している膨大な知識を、整合性を保ちながら欠落なく獲得、蓄積する事が不可欠となる。

この作業は、従来、ノレッジエンジニア (K. E.) と称するエキスパート・システム構築の専門家が、インタビューにより知識を上述の運転員から獲得し、逐一、ルールという形に変換、蓄積していたのであるが、効率の低さ、及び、整合性の確保、欠落、重複又は矛盾の存在の確認の困難さから、知識処理システム構築上の最大のボトルネックと認識されている。

また、運転員の経験のみを搭載した知識処理システムには、未経験な事象に対して適切な対応を期待する事はできない。現在、実際のプラントにおいて、このような未経験事象が観測された場合には、運転員は、自らが有する、プラントの機能、構造知識と一般的な工学上の知識等を活用して、遭遇している事象に関して推論を行ない、最も適切であると結論した対応操作を行なう。従って、上述した運転・制御のための知識処理システムにも、このような推論の機能が要求される。

このように、原子力プラントの運転制御を行なう知識処理システムに関しては、構築の効率、矛盾、欠落及び重複の排除、そして未経験事象への対応等が大きな問題となる。

これらの問題点を克服するために、「深い知識」を利用した知識獲得手法が提唱されている。「深い知識」とは、例えば観測された事象に対する対応操作のような運転員が経験として持っている「浅い知識」の根拠ないしは妥当性の説明に用いられるプラントの機能、構造、動的振るまいを記述した知識である。

一般的な工学知識と当該原子力プラントの機能、構造、動的振るまい等の設計情報を「深い知識」として具備しておき、これから、原子力プラントの運転制御に必要な知識をシステムティックに導く事により、必要と思われる知識をプラント稼働以前に全て網羅的に整備するという実質上不可能な作業を回避し、必要に応じて、互いに整合性が確保された知識を自動的に獲得していく事が可能となる。これを実現するのが「知識コンパイラ」である。

本研究は、原子力プラントの異常診断知識獲得への知識コンパイラの適用性を評価する事を目的とする。そのための第1段階として、ここでは、プラントを構成するコンポーネントの機能を、そのコンポーネント内に留る物理量、あるいはそれに流入する物理量、またはそれから流出する物理量との相互作用で表現し、プラントの構造をコンポーネントの接続関係で表現し、プラントの動的振るまいを物理量の正常値からの逸脱の方向 (+、-)、即ち定性値で表現して、定性値の伝播に基づく定性推論を用いた知識コンパイラを対象として異常診断知識の生成を行う際の基本的な問題点、今後の開発課題を抽出する。

2章. 知識コンパイラの概要

一般にエキスパートシステムで用いられているプロダクションルールは、特定のタスクドメインにおいて用いられる場合に最適な形で記述されているために高い推論効率を発揮するが、一方で未知の状況に対処できない、その正当性を提示できないなどの問題点が指摘されており、その解決策として深い知識が提唱されている。深い知識の確立された定義はいまだ得られていないが、特定のタスクドメインでの使用を意識した形式で記述が行われている知識が浅い知識より一般的な形で基本的な原理原則を表したものが深い知識であると捉えられている。浅い知識の具体的な例としてはプロダクションルールがあり、深い知識の事例としては対象モデルや意味ネットワーク、数学的シミュレーションモデルなどが挙げられる。

我々は知識の浅い深いは相対的なものであり、ある知識の正当性を説明しうる能力を持つ知識がその知識に対するより深い知識であると考え、その深い知識を用いることにより浅い知識であるプロダクションルールを自動生成する知識生成機構KCⅡの開発を行ってきた。以下では、知識コンパイラKCⅡの概要について述べる。

2.1 知識コンパイラの動作原理

2.1.1 知識生成過程

KCⅡは、タスクドメインを機械系の故障診断に限定し、あらかじめ準備されている深い知識を用いることによりプロダクションルールを自動生成する知識生成機構である。KCⅡの概要を図1に示す。

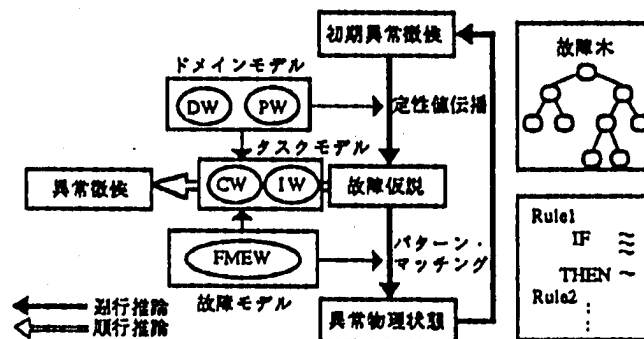


図1 : KCⅡの概要

KCⅡにおいては、部品名、物理パラメータ、パラメータの定性値という3つの値を用いてドメインモデルの状態が表現され、物質の相状態とその環境の組によって故障モデルの状態が表現される。推論は、ドメインモデルにおいては状態間の制約伝播、故障モデルにおいてはパターンマッチングを行うことによって進められる。ユーザが診断対象から検出された異常徴候を入力すると、それを初期状態として因果の流れを逆に辿ってゆくことにより、その初期異常徴候を引き起こすと考えられる故障仮説群を推論する(逆行推論)。故障仮説を生成し終ると、それぞれの故障によって現れるべきその他の異常徴候を因果関係を順方向に辿ることによって推論し(順行推論)、診断対象の状況と比較することにより仮説の検証を行う。これらの推論は、それぞれの状態に深い知識を適用してゆくことによって進められ、推論過程を故障木とし

て表示するとともに、得られた故障仮説と異常徴候を結び付けることにより故障診断用プログラクショナルルールが生成される。

2. 1. 2 K C IIにおける深い知識

K C IIは深い知識を用いて逆行推論，順行推論を行い，機械系における故障診断ルールを自動生成する。K C IIで用いられる深い知識は，汎用性，構築容易性に留意して分類整理されており，D W（対象知識），P W（物理知識），I W（解釈知識），C W（制御知識），F M E W（故障メカニズム用汎化知識）の5種類が用意されている。推論時における，それぞれの深い知識の役割を以下に示す。

・ D W（対象知識）

診断対象の部品の機能や接続関係，および動作環境などに関する知識が記述されている。故障解釈時に推論状態とD Wが表す診断対象の部品の機能を比較することにより，その部品が正常に動作しているかどうかを判別する。また，他の部品との接続情報を用いて推論状態の伝播先を決定する。

・ P W（物理知識）

一般的な物理原理が記述されている。P Wが表す物理パラメータ間の制約関係を適用することにより，ある推論状態から物理的因果関係を持つ他の推論状態へと推論を進める。

・ I W（解釈知識）

物理パラメータの定性値を用いた表現形式と，人間が理解可能な故障仮説や異常徴候を表す表現形式および，物理パラメータでは表現できない故障シーケンス中の状態を表す表現形式との対応関係を記述している。この知識の適用により，故障仮説や異常徴候などのユーザに提示すべき形式での状態表現の生成や，ドメインモデルと故障モデル間の相互移行などが行われる。

・ C W（制御知識）

深い推論の制御を行うために必要な情報が記述されている。各部品の耐久性やパラメータの変動容易性，観測容易性などがあり，可能性の低い推論状態への移行の抑止や，プログラクショナルルール生成時の確信度の付加に利用される。

・ F M E W（故障メカニズム用汎化知識）

物理パラメータの定性値伝播では表現できない故障プロセスの追跡に必要な情報が記述されている。この知識の適用により，物質の相変化やそれを引き起こす状態の推論が行われる。

D W，P Wはドメインモデル，F M E Wは故障モデル，I W，C Wは故障診断というタスクモデルに相当する。深い知識を用いた推論では，ドメインモデルと故障モデルが相互に作用しあうことにより，専門家の予測が及びにくい故障シーケンスをも推論することができる。

2. 2 ドメイン特化型知識コンパイラK C II-D S Tの概要

2. 2. 1 D S T化における改良点

我々はKCⅡの知識生成の枠組を基に、高度な診断能力を備えた機械系故障診断シェルKCⅡ-DSTの構築を行った。拡張にあたっては、主に以下の改良が施されている。

・深い知識の改良

深い知識表現に継承の概念を導入し、汎用性に富んだ抽象知識をあらかじめ用意しておき、その多重継承により下位知識の記述を行うようにした。この結果、深い知識の汎用性や記述能力がより高まるとともに、知識の記述方法が洗練された。また、診断対象が変わるたびに必要となる、部品間の階層関係や接続関係などの診断対象に固有な情報の獲得をグラフィカルに支援するインタフェースを準備した。

・診断能力の向上

診断対象の階層構造を反映した形で中間仮説の生成を行うことによって、ユーザに豊富な診断情報が提供できるようになり、診断効率の向上も図られた。

従来のKCⅡにおける推論では扱えなかった診断対象の能動的機能を持つループ構造においても、推論履歴から診断対象の構造を認識する機能の付加によって適切に推論できるようになり、定性値の拡張により故障モードへの対応も行われた。

また、故障仮説の信頼度という概念を導入し、確信度に応じたルールの多段階生成が行われるようになった。

・センサ情報の活用

ルール生成がリアルタイムに行われる状況においては、診断対象のセンサ情報を有効に活用することにより、診断効率の向上を図る。

ルール生成を事前に行う場合にも、センサ情報の獲得行動をルールに反映させ、診断対象の階層構造に応じた形でルールの生成、格納を行うことによって、深い知識を用いてリアルタイムに診断を行う場合と同等の診断能力を持つルールが生成される。

2. 2. 2 KCⅡ-DSTの概要

KCⅡ-DSTの概要を図2に示す。KCⅡ-DSTにおける診断は、以下のように進められる。

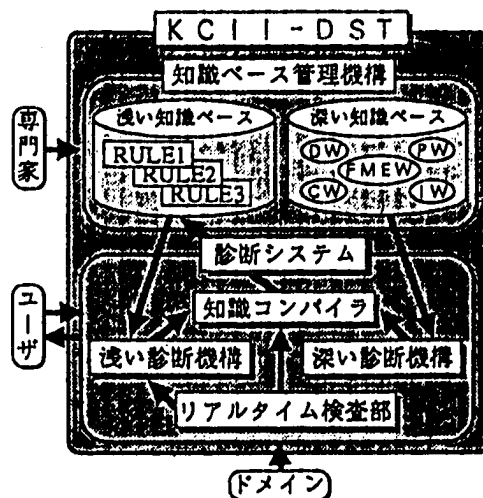


図2 : KCⅡ-DSTの概要

1) 専門家が、知識ベース管理機構が提供するグラフィカルな環境において、階層関係や接続関係などの診断対象に固有の情報を深い知識ベースに付加することにより、個々の診断対象に対応した深い知識ベースが完成する。

2) ユーザが診断対象において検出した異常徴候を入力すると、まず浅い推論機構が起動される。浅い推論機構は、浅い知識ベースとリアルタイム検査部が診断対象から獲得したセンサ情報を参照しながら診断を行い、故障部分を同定する。

3) 浅い推論機構において故障同定に失敗した場合には、診断の制御は知識コンパイラに移る。深い推論機構が深い知識を用いて推論を行い、知識コンパイラはその推論結果と診断対象からのセンサ情報に基づき、中間仮説を生成しながら故障部分を同定してゆくとともに、推論結果をプロダクションルールとして生成し、浅い知識ベースに格納する。

このような枠組を用いることにより、浅い知識を用いた効率的な診断が行えるとともに、浅い知識では対応できないような場合にも、深い知識を用いることによって専門家と同等以上の診断能力を発揮することができる。また、一度深い知識によって診断を行った状況においては、次回以降では生成された浅い知識を使ってさらに効率的に診断を行うことができる。

2. 2. 3 深い知識ベース

(1) 深い知識の記述

K C II - D S Tにおける深い知識は、継承概念の導入によって記述の洗練化や記述能力の向上が図られている。D W記述においては、以下の2種類の抽象知識が準備されている。

・基本属性知識

診断対象の部品を記述する上で必要となる属性（機能、動作環境など）を抽象的に表現している知識であり、その表現内容により、部品の機能や構造に関する作用形態知識と機能が作用する対象の特徴を表現した作用対象知識とに大別される。

・基本部品知識

基本属性知識の多重継承によって具体的機能を持つ部品を表す知識である。必要な作用形態知識を多重継承することによって、伝達系や変換系などの大まかな機能表現する知識が記述され、さらに作用対象知識を継承することによって、熱交換器やタービンなどの具体的部品の知識が表現される。

D W記述における継承関係を図3に示す。このようにして表現された知識はさまざまな診断対象において汎用的に用いることができ、診断の対象となる個々の部品は、さらに接続関係や階層構造など診断対象固有の情報を付加することによって記述される。

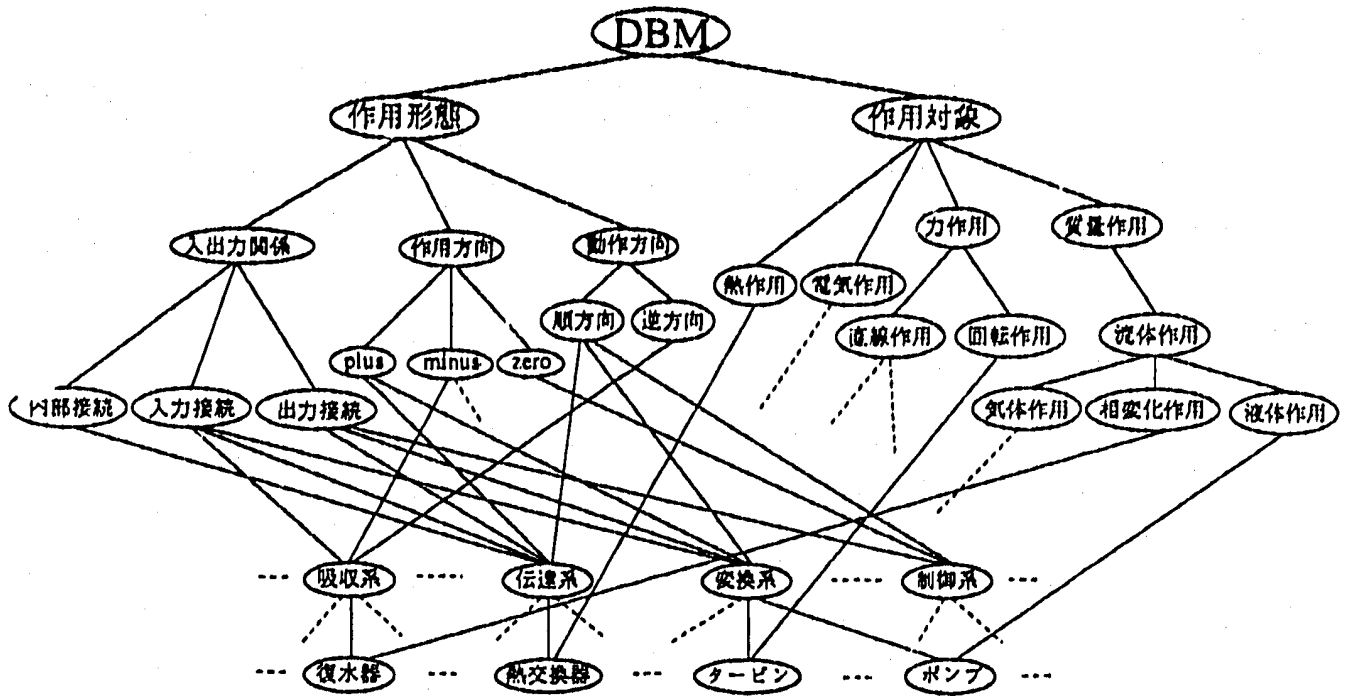


図3：DW記述におけるクラス継承関係

流体部品の記述においては、気相、液相などの抽象知識やそれを継承した水やオイルなどの流体知識を準備し、診断対象における個々の流体部品はその知識を継承し、さらに場所や接続などの対象固有情報を付加した形で記述される。流体知識の継承関係を図4に示す。

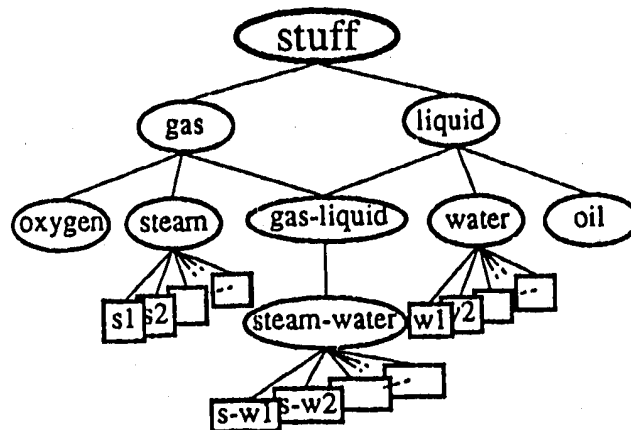


図4：流体知識の継承関係

IWにおいても、DWの継承関係においてより上位の部品知識に対応して記述しておくことにより、簡潔な表現によってさまざまな具体的部品の状態解釈が可能となっている。同様に、CWの記述においても抽象知識とその多重継承が活用される。

(2) 診断対象固有情報の付加

実際に深い知識を用いて診断を行う場合には、各部品間の接続関係や耐久性などの情報が必要となる。これらの情報は診断対象ごとに固有のもので汎用性に乏しく、診断対象を変更するたびに設計者や専門家から獲得しなければならない。この負荷を軽減するために、KCII-DSTではグラフィカルな支援機構を準備している。この支援機構における固有情報の獲得は、以下のように進められる。

- 1) 設計者が、診断対象の各部品が該当する基本部品知識を選択することによって、知識表現に用いられるテンプレートが決定される。
- 2) 決定されたテンプレートに基づき、接続や観測容易性などの固有情報が、グラフィックデ

ディスプレイやマウスなどのユーザインタフェースを有効に利用した形で専門家から獲得される。
 3) 必要な情報の獲得が終了すると設計者に知識の表現内容の確認を求め、誤りが発見された場合には修正を受け付ける。
 4) 矛盾除去フィルタがドメインモデルの整合性を検証し、矛盾が発見された場合には、設計者に修正を求める。

具体的部品に該当する基本部品知識が用意されていない場合には、記述したい部品の作用形態や作用対象などの基本属性に関する質問が行われることにより抽象知識の継承パターンが決定され、必要な基本部品知識が動的に生成される。

また、この過程において診断対象の階層情報の獲得をも行う。複数の部品を一つのサブシステムとする情報が与えられると、そのサブシステムの機能や接続関係を深い推論機構の順行推論推論の枠組を利用して推論し、一つの部品の知識として生成する。復水装置における階層化された部品の知識の例を図5に示す。

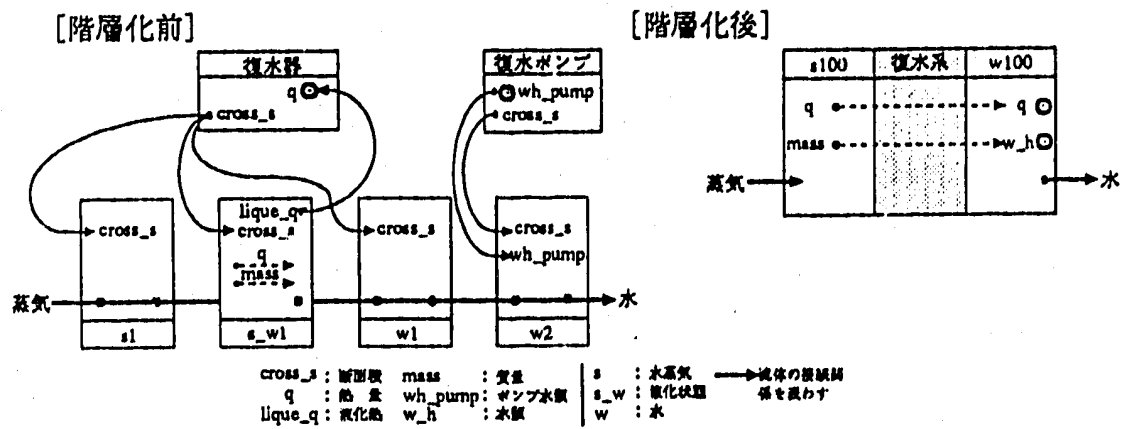


図5：復水系サブシステムの部品の知識

このようにして生成されたサブシステム部品の知識は、深い推論による診断時に有効に利用される。

2.2.4 知識コンパイラ

(1) 診断対象の構造解釈

従来のKCIIにおける推論では、対象のループ構造において推論矛盾が起こることがあった。例えば、図6のような部品Bの入力の安定化を図るフィードバック機能を持つループ構造では、次のように推論が行われていた。

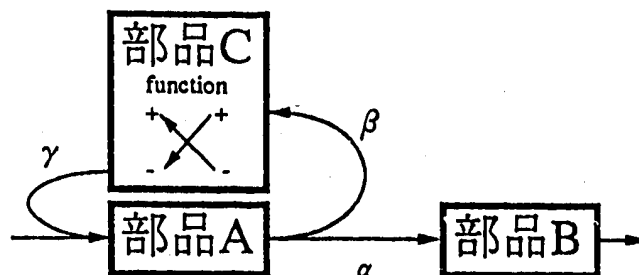


図6：ネガティブフィードバック構造の例

- 1) 「部品Aの入力が増加」
- 2) 「部品Aの出力が増加」
- 3) 接続 α により「部品Bの入力が増加」
- 4) 接続 β により「部品Cの入力が増加」
- 5) 部品Cの機能により「部品Cの出力が減少」
- 6) 接続 γ により「部品Aの入力が減少」
- 7) 6)は1)と矛盾するため、「推論矛盾」

以上のような推論の結果、「部品Bの入力が増加」という誤った結果が導き出される。これは、KCIIの推論が対象の部品間の筋所的な接続のみを見て推論を進めるため、同一部分の状態に到達してもお互いの関連性を考慮せずに処理を行っていることが原因であると考えられる。そこでドメイン特化型シェルへの拡張にあたり、対象の能動的機能を持つループ構造を認識するように改良を行った。

診断対象のループ構造としては、部品の接続方向の違いから図7のように2種類に分類される。これらの構造において推論を行うと、並列型の場合には異なる部品間の接続を辿った異なる推論過程で同一部品に到達し、帰還型の場合には自らの推論履歴に存在した部品に再び到達する。フィードフォワードループ構造は前者に該当し、フィードバックループ構造は後者の推論過程をとる。このような場合KCII-DSTでは、それまでの推論履歴を検討することにより図7の破線で囲まれた部分を構造自体が能動的機能を持っている複合機能接続列であると認識し、その構造に応じた推論制御を行う。

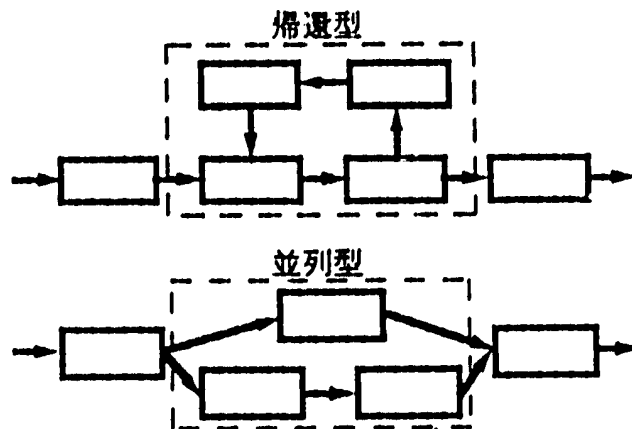


図7：ループの構造

(2) 定性値の拡張

KCIIのDST化にともなって、出力を安定化させる機能を持つネガティブフィードバックの出力が異常である場合や、外部に与える影響の程度や種類による故障状況の分類である故障モードに対応するために定性値の拡張を行った。

従来のKCIIでは正常状態を0、正常状態と比べて増加方向の変移を+、減少方向の変移を-とし、3段階の定性値によって表された物理パラメータ値を用いて推論を行っていたが、KCII-DSTでは以下の5段階の定性値を定義している。

- ++ : ドメインモデルの表現する機能の対処範囲を逸脱した異常増加
- + : 増加方向への変移
- 0 : 正常状態
- : 減少方向への変移
- : ドメインモデルの表現する機能の対処範囲を逸脱した異常減少

今回拡張された++，--は，通常+や-と同様に伝播が行われるが，++や--で表されているパラメータに関与している部品に到達した場合には，拡張された定性値ごとに準備されているIWの適用により，故障モードに応じて故障仮説を生成する。故障モードが存在する部品の一例として，図8のような入力信号の強弱に応じてバルブの開度を調節するコントローラが挙げられる。

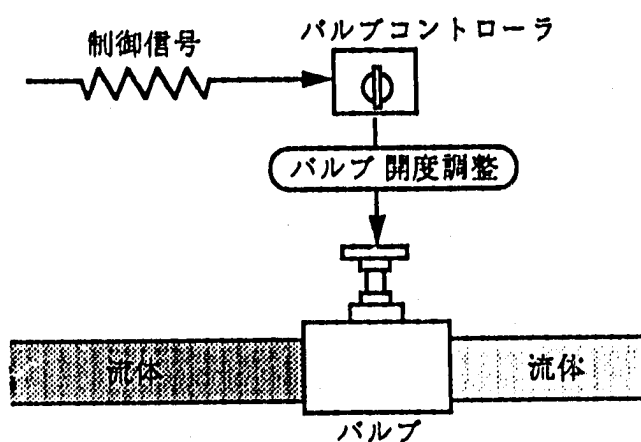


図8 : 故障モードが存在する診断対象

この場合，コントローラの調整不良により入力信号にたいするバルブ開度の比例定数が増加方向に変位している場合には，バルブ開度は正常状態と比べて増加するが，依然入力信号とバルブ開度との因果関係は失われていない。そのため，このバルブ開度にバルブ流量からのネガティブフィードバックループが掛けられている場合にはその増加方向への変位が吸収され，実際には診断対象の振舞いに影響を及ぼさない可能性がある。一方，コントローラ内部の断線などによりバルブが開いたままの状態になった場合には，入力信号との因果関係が失われており，フィードバックループ構造の機能であるバルブ流量の安定化作用は働かない。従来のKCⅡではこのような状況の判別が行えなかったが，今回の定性値の拡張で前者の状況を+，後者の状況を++と表し，それぞれに応じた解釈知識を準備することにより，故障モードに応じて適切な故障仮説の生成が可能となっている。

++や--状態の生成は，そのパラメータに関して診断対象がドメインモデルの表現範囲を逸脱するほどの故障状態に陥っていることを示しているため，遡行推論時に++あるいは--の定性値による故障仮説が生成された場合には，それ以降の因果の追跡を行わない。

また，能動的機能を持つループ構造を扱う場合に，そのループ構造が持つ機能を否定するような推論状況においては，ドメインモデルの表現範囲を逸脱したとして次の推論状態を生成する。具体的には，推論中に同一部品に到達して診断対象のループ構造を認識したときにその定性値が逆であった場合には，そのループ構造は変化を吸収する能動的機能を持つ複合機能接続

列であると認識する。そして、順行推論時には入力の変動が複合機能接続列の機能により打ち消されると考え、伝播を停止する。逆行推論時には、安定化の機能を持つ複合機能接続列の出力にも関わらず変移が見られるということは、その複合機能接続列の吸収できる変移の範囲を逸脱した入力を与えられている、古い替えればドメインモデルの表現している機能が対処できる範囲を逸脱した入力であるとし、その出力に現れた変移方向に応じて入力状態を++あるいは--に決定する。このように推論制御を行うことにより、ネガティブフィードバック構造などを含む診断対象においても、適切な故障仮説の生成が可能となる。

(3) 階層的診断

KCII-DSTにおける推論方式の模式図を図9に示す。KCII-DSTでは、設計者から診断対象の固有情報を獲得する段階で対象の階層情報をも取り込んでおり、複数の部品からなるサブシステムを上位階層の部品として取り扱い、推論を診断対象の階層構造に沿った形で最上位の階層からより下位の階層へと順に進めてゆく。この時、各階層において生成されるサブシステム部品の故障仮説は中間仮説として提示され、ユーザは必要とする詳細さでの診断結果を得ることができる。またこの推論方式の採用により、推論効率も向上している。

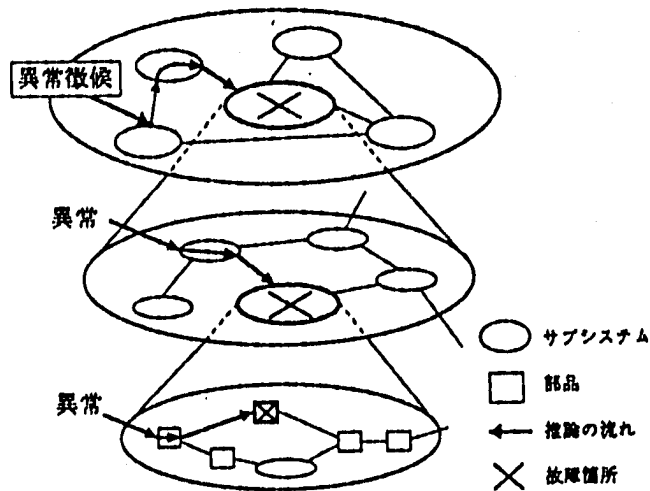


図9：階層的推論方式

(4) 浅い知識の生成

DWにおいてそれぞれの部品が持つ能動的機能は、その出力が影響を与えるパラメータと定性的方向の組合せによって記述されており、機能はさらに、入力に関係なく出力が機能する機能Iと出力の機能が入力に影響を受ける機能IIの2種類に分類されている。この分類を利用することにより、故障仮説生成時にその仮説の信頼度に応じた以下のような分類を行う。

信頼度4：出力が機能Iの否定である場合、あるいは出力が機能IIの否定で入力がすべて正常である場合は、その部品は故障しているとみなす。

信頼度3：出力が機能IIの否定であり、入力のうち一つでも異常なものが存在する場合は、入力異常の原因となる故障がほかに存在するが、その部品自体も故障している可能性があると考ええる。

信頼度2：出力が機能の否定ではなく出力に影響を与える入力がすべて正常である場合には、

ドメインモデルの表現範囲を逸脱した故障である可能性を考慮する。

信頼度1：出力が機能の否定ではなく出力に影響を与える入力の一つでも異常である場合には、故障の可能性は非常に低いと考える。

この仮説信頼度の分類には部品の入出力状態の検証が必要であり、それはリアルタイム検査部を通じて行われる。部品の入出力部分にセンサが設置されていない場合には、深い推論機構における順行推論の枠組を利用し、検証すべき状況が起こっていれば他のセンサにどのような徴候が観測されるべきかを推論し、それらのセンサ値の検証で代用とする。

この仮説信頼度とCWに記述されているパラメータの変動容易性の組合せにより、生成されるルールに確信度を付加している。確信度の付加基準を表1に示す。

以上のようにして生成されるルールは、故障仮説が取り扱う部品の階層や仮説の確信度に応じて浅い知識ベースに分類、格納され、浅い推論時に適切なルール集合が浅い推論機構へと提示される。以上のようなルール生成の概要を図10に示す。

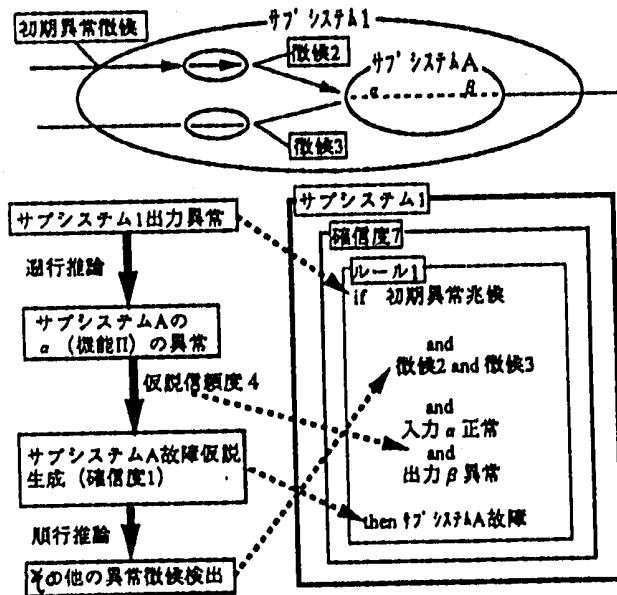


図10：ルール生成の概要

3章 高速炉の主冷却系に対する知識コンパイラの適用実験

3-1 適用対象とした高速実験炉『常陽』の概要

動燃事業団大洗工学センターにて稼働中の高速実験炉『常陽』は、熱出力100メガワットの、金属ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉である。発熱源である原子炉と、2ループからなる主冷却系及び補助冷却系が主な構成要素である。原子炉では、下部入口より流入する液体金属ナトリウムが、ウラン、プルトニウム混合燃料の核分裂によって加熱されて上部出口より1次主冷却系配管へ流出する。主冷却系は、1次主冷却系、2次主冷却系から成っており、それぞれフランス型の主循環ポンプで駆動される。原子炉で加熱された1次主冷却系のナトリウムは中間熱交換器と称される金属ナトリウム同士の対向流型熱交換器を介して2次主冷却系ナトリウムにその熱を与えた後、原子炉へ戻る。また、中間熱交換器で加熱された2次主冷却系ナトリウムは金属ナトリウム-空気間の対向流型熱交換器である空気冷却器を介して大気中に熱を放出する。空気はブロワで循環され、ダンパとベーンで流量調節が行なわれている。高速炉発電プラントとの相違の主な点は蒸気発生器の代わりにこの空気冷却器が取り付けられていることである。また、熱輸送機能を保つために、これらに加えて、電力供給系、カバーガス系、ナトリウム純化系等の諸システムをも有しており、非常に複雑で大規模なシステムである。

現在まで、『常陽』において重大な異常の発生は無いが、軽度な異常に関する診断および対応操作は、熟練運転員の経験と、これを文書に集積した異常処置マニュアルによって行なわれている。しかし、より運転しやすい高速炉発電プラントの開発を目指してこれらへの対応の際はもとより運転員が原因同定するまでに時間がかかることが予想される、初めて遭遇する異常の際にも能力を発揮する診断知識の自動導出技術の開発が必須と考えており、そのための第1ステップとして「常陽」を使った本知識コンパイラの適用・実験を行った。

(1) 知識コンパイラの対象とした『常陽』主冷却系モデル

下に本実験に使用した『常陽』主冷却系モデルを以下に示す。

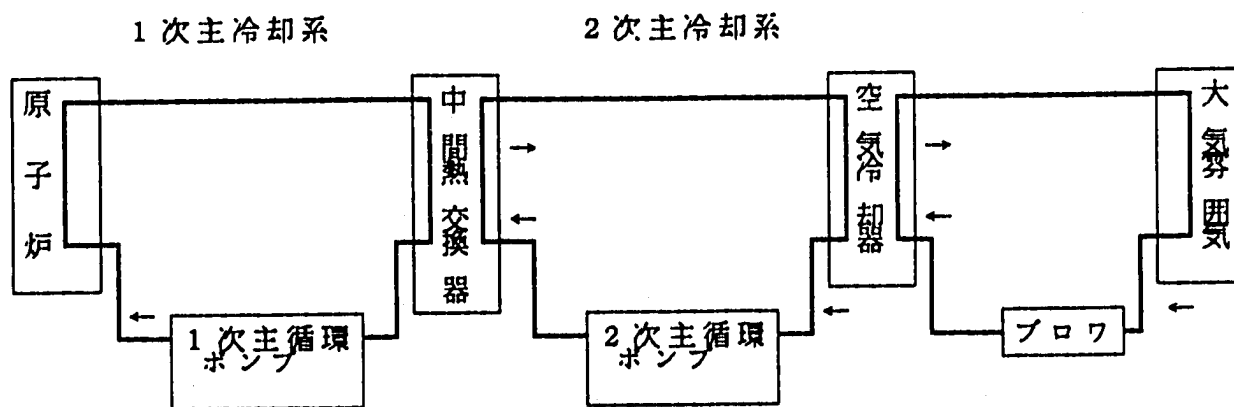


図3-1：知識コンパイラに与えた『常陽』主冷却系モデル

本実験では、知識コンパイラによって異常診断知識を網羅的に導出する事そのものは目的ではなく、原子力プラントへの適用性を評価する事が主旨であるので、最初の試みとして、『常陽』の主冷却系の、主に熱流動に関する挙動のみに着目し、これを表現する上で最小限必要な構成のみをモデル化した。まず、2ループある主冷却系を1ループで代表させて扱う事とし、空気冷却器の風量調節のためのダンパ、ベーンはほぼ同じ機能を有するのでダンパのみをモデル化した。また、今回の実験では、制御棒位置及び炉心冷却材温度と発熱量との関係、原子炉容器および1次、2次ポンプのナトリウム液面とカバーガスの挙動は対象外とした。

(2) 知識コンパイラ適用のための『常陽』主冷却系のデータ表現

3 - (2) - a 各機器のモデル化

知識コンパイラを用いて、異常診断知識を導出するためには、各構成部品について、他の部品と変化伝播関係を有するパラメータ及びその単一部品内部でそれらパラメータと変化伝播関係を有するパラメータと、それらの間の変化伝播知識を記述しなければならない。以下に、今回の実験で用いた各機器のモデルを記す。

a) 原子炉

今回の実験では、核分裂反応は診断知識の対象外とし、炉心を単に発熱体として扱う。発熱量を Q 、冷却材の流量を W 、入口温度を T_{in} 、出口温度を T_{out} とすると、従属パラメータ T_{out} に対し、 Q 、 T_{in} は正方向に、 W は負方向に作用する。

b) 中間熱交換器

中間熱交換器は、次に述べる空気冷却器と共に、対向流型の流体-流体間熱交換器である。図3-2に示すように、高温の1次流体が1次入口より流入し、2次側流体に熱を与えて出口より流出する。低温の2次側流体は、1次側流体より熱を受けて、温度が上昇した後、出口より流出する。

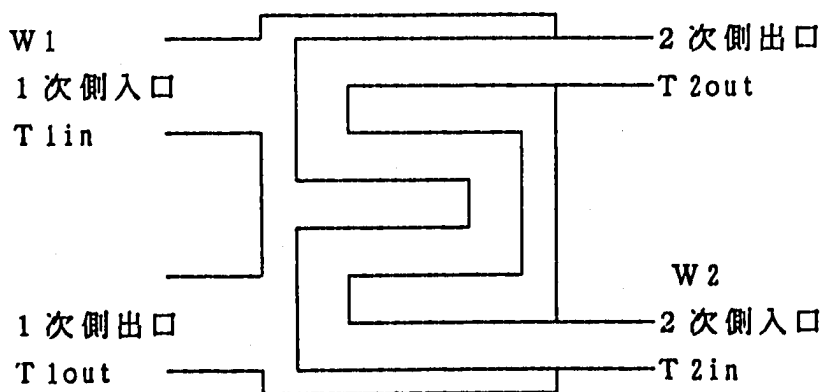


図3-2 : 対向流熱交換器の機能説明図

熱交換器単体のみを取り出して考えた場合、従属パラメータは、1次、2次の出口温度 T_{1out} と T_{2out} である。これに対し、1次、2次の入口温度 T_{1in} 、 T_{2in} は両者に正方向に作用し、1次流量 W_1 は正方向、2次流量 W_2 は負方向に作用する。また、流体の1次側と2次側の間の総合伝熱抵抗 R は、1次出口温度には正方向、2次出口温度には負方向に作用する。

c) 空気冷却器

空気冷却器の機能は、中間熱交換器と同様で、1次流体をナトリウム、2次流体を空気に代えれば、中間熱交換器の定性的特性をそのまま適用できる。

d) ポンプ

機械式ポンプの状態を表すパラメータには、液頭、回転数、トルク、流量の4つがある。ここでは簡単のため、投入電力、水頭、流量の3つで表現したが、より正確な表現法は今後の課題である。今回の実験においては、投入電力が液頭に、液頭が流量に、それぞれ正方向に作用する事とした。

e) プロワ

機械式ポンプの定性的表現をそのまま用いて表現する。

f) ダンバ

開度と流量で表現され、開度は流量に正方向に作用する。

g) 大気雰囲気

容量が事実上無限大の流体容器として扱う。パラメータは温度のみ。

以上の各機器モデルに対するパラメータ群と、その中での定性的変化伝播知識を整理すると、表3-1のようになる。変化伝播知識の欄に〈+〉とあるのは、正方向の作用、〈-〉とあるのは負方向の作用を表す。

機器名	パラメータ	変化伝播知識
原子炉	発熱量 : Q 冷却材流量 : W 冷却材入口温度 : T_{in} 冷却材出口温度 : T_{out}	$Q \langle + \rangle T_{out}$ $W \langle - \rangle T_{out}$ $T_{in} \langle + \rangle T_{out}$
中間熱交換器	1次側入口温度 : T_{1in} 1次側出口温度 : T_{1out} 2次側入口温度 : T_{2in} 2次側出口温度 : T_{2out} 1次側流量 : W_1 2次側流量 : W_2 総合伝熱抵抗 : R	$T_{1in} \langle + \rangle T_{1out}$ $T_{1in} \langle + \rangle T_{2out}$ $T_{2in} \langle + \rangle T_{1out}$ $T_{2in} \langle + \rangle T_{2out}$ $W_1 \langle + \rangle T_{1out}$ $W_1 \langle + \rangle T_{2out}$ $W_2 \langle - \rangle T_{1out}$ $W_2 \langle - \rangle T_{2out}$ $R \langle + \rangle T_{1out}$ $R \langle - \rangle T_{2out}$
空気冷却器	ナトリウム入口温度 : T_{1in} ナトリウム出口温度 : T_{1out} 空気入口温度 : T_{2in} 空気側出口温度 : T_{2out} ナトリウム流量 : W_1 空気流量 : W_2 総合伝熱抵抗 : R	$T_{1in} \langle + \rangle T_{1out}$ $T_{1in} \langle + \rangle T_{2out}$ $T_{2in} \langle + \rangle T_{1out}$ $T_{2in} \langle + \rangle T_{2out}$ $W_1 \langle + \rangle T_{1out}$ $W_1 \langle + \rangle T_{2out}$ $W_2 \langle - \rangle T_{1out}$ $W_2 \langle - \rangle T_{2out}$ $R \langle + \rangle T_{1out}$ $R \langle - \rangle T_{2out}$
1次主循環ポンプ	投入電力 : P 液頭 : H 流量 : W	$P \langle + \rangle H$ $H \langle + \rangle W$
2次主循環ポンプ	投入電力 : P 液頭 : H 流量 : W	$P \langle + \rangle H$ $H \langle + \rangle W$
空気ブロワ	投入電力 : P 液頭 : H 流量 : W	$P \langle + \rangle H$ $H \langle + \rangle W$
ダンパ	開度 : O 流量 : W	$O \langle + \rangle W$
大気雰囲気	温度 : T	

表3-1 : 各機器内の定性的変化伝播知識

3 - (2) - b 各機器間のパラメータを介した接続

図 3 - 3 に各機器の接続状態を示す。

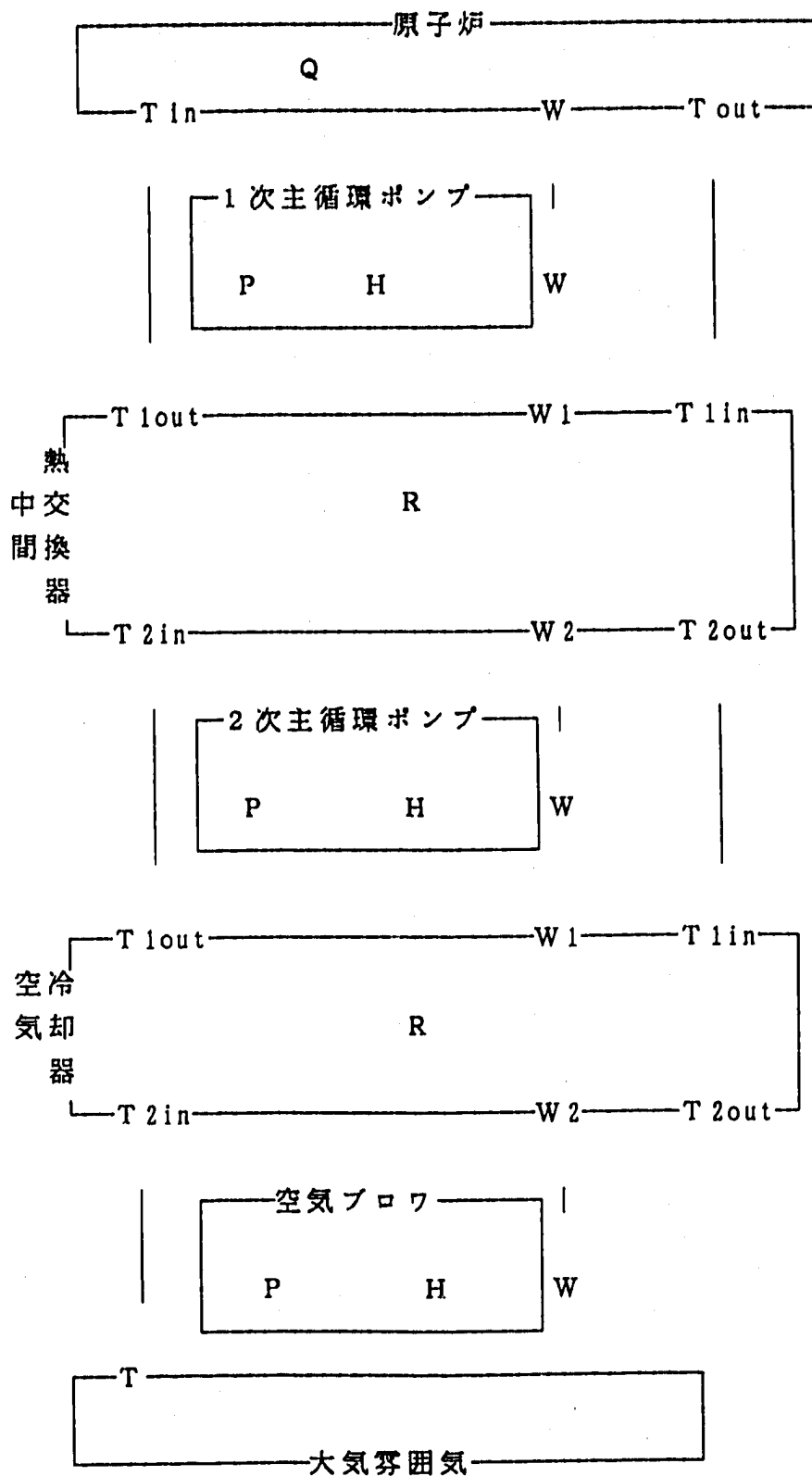


図 3 - 3 : 各機器間の接続状態

上の図において、接続する2個のパラメータ間に矢印が記入されているが、2者のどちらが伝播元でどちらが伝播先となるのかを示したものである。流量に関しては、実際のループでは流体駆動機器の液頭のみならず、他の機器の流動抵抗の変化も流量に影響するが、ここでは、簡単のため一方的な依存関係を仮定した。

3 - (2) - c センサー装着箇所に関する情報

初期の異常兆候を知識コンパイラに与える際に、観測される異常を、パラメータの正常値からの逸脱として変換する必要がある。そこで、初期異常兆候は、センサーによって観測可能なパラメータの逸脱とし、兆候となり得るパラメータのリスト、言い換えればセンサー装着に関する情報を知識コンパイラに次のように与えた。

- ① 原子炉容器
 - 入口温度
 - 出口温度

- ② 中間熱交換器
 - 1次入口温度
 - 1次出口温度
 - 2次入口温度
 - 2次出口温度

- ③ 空気冷却器
 - 空気出口温度
 - 空気入口温度

- ④ 1次主冷却系ループ — 流量

- ⑤ 2次主冷却系ループ — 流量

3 - (2) - d 異常原因の解釈に関する情報

2章で述べた知識コンパイラによる異常診断知識導出において、最初の遡行推論による原因候補を列挙する段階で、独立に変化し得るパラメータ全てについてその正常値からの逸脱が異常の原因であるとして推論を行うと、原子力プラントのような複雑な体系では生成される故障仮説の数が非現実的に大きくなる。また、「熱交換器の熱伝達率が正常値より高い」、あるいは「配管の断面積が正常値より大きい」等の、現実には起こり得ないパラメータ変化を異常の原因として扱う事は、意味が無い。そこで、正常値か

ら遊脱した独立パラメータの中から、故障仮説として意味のあるもののみを推論の対象とした。また、このためには、異常原因の解釈に関する情報が必要となるため、本実験では、次のものを入力した。

機器名	パラメータ	変位	解釈
原子炉	出口温度	低	機能不全
中間熱交換器	2次出口温度 1次出口温度	低 高	機能不全
	熱伝達抵抗	高	伝熱管汚れ
空気冷却器	2次出口温度 1次出口温度	低 高	機能不全
	熱伝達抵抗	高	伝熱管汚れ
ポンプ	液頭	低	機能不全
ブロワ	液頭	低	機能不全

表 3 - 2 : 異常原因解釈知識

(3) 導出された異常診断知識の例

異常兆候の例として、「原子炉入口温度高」を挙げた。この兆候に対して、遡行推論によってその原因の候補として、下記のもので導き出され、順行推論によってこれが検証された。

- a) 中間熱交換器 機能不全
- b) 空気冷却器 機能不全
- c) 1次主循環ポンプ 機能不全
- d) 2次主循環ポンプ 機能不全

3-2 知識コンパイラの『常陽』主冷却系への適用性評価

(1) 知識コンパイラデータ構造の原子炉容器、プラント構成機器に対する記述力

(1) - a. 機器特性の記述

KC IIでは、機器の特性は、パラメータからパラメータへの変化伝播を、伝播元パラメータ、伝播先パラメータ、伝播の正負、伝播知識が適用されるために存在しなければならないパラメータの組、によって記述される。以下に例を挙げる。

原子炉、中間熱交換器、空気冷却器についての機器記述データは次のように与えられる。

機器種別	パラメータリスト
原子炉	発熱量 2次入口温度 2次出口温度 2次流量
中間熱交換器	1次入口温度 1次出口温度 1次流量 2次入口温度 2次出口温度 2次流量 伝熱管汚れ
空気冷却器	1次入口温度 1次出口温度 1次流量 2次入口温度 2次出口温度 2次流量 伝熱管汚れ

ここで、パラメータ間変化伝播知識が以下のように与えられる。

対象機器が有すべきパラメータ	定性的変化伝播知識
2次入口温度 2次流量 2次出口温度	2次流量の変化に対して 2次出口温度はその逆の方向に変化する

これから、原子炉について、入口温度、流量、出口温度をそれぞれ「2次入口温度」、「2次流量」、「2次出口温度」と記述しておけば、①原子炉における1次主循環流量から1次ホットレグ温度への負の変化伝播、②中間熱交換器における2次主循環流量から2次ホットレグ温度への負の変化伝播、および③空気冷却器における空気循環流量から空気冷却器出口空気温度への負の変化伝播、が定義される。

このように、変化伝播知識が成立する条件として、機器名ではなく、必要なパラメータの組を指定する事により、一般的な知識を複数種類の機器に共通に記述する事ができ3-(2)-b中の図3-3に等価な系統を記述するに当って、特に取上げるべき障害は無く、このコンパイラで採用されているデータ構造は十分な適用性を持っている事が確認された。

(1) - b. 機器間の接続についての記述

機器間の接続は、機器内の各パラメータにIN,OUTポートを割り当てて、異なる機器間

で接続されているポートの組を指定する事で記述される。伝播方向はINポートからOUTポートへという方向に解釈される。本実験に用いたKC2インプットデータ内で、『常陽』主冷却系の各機器間の接続がどのように表現されているかを添付1に示す。

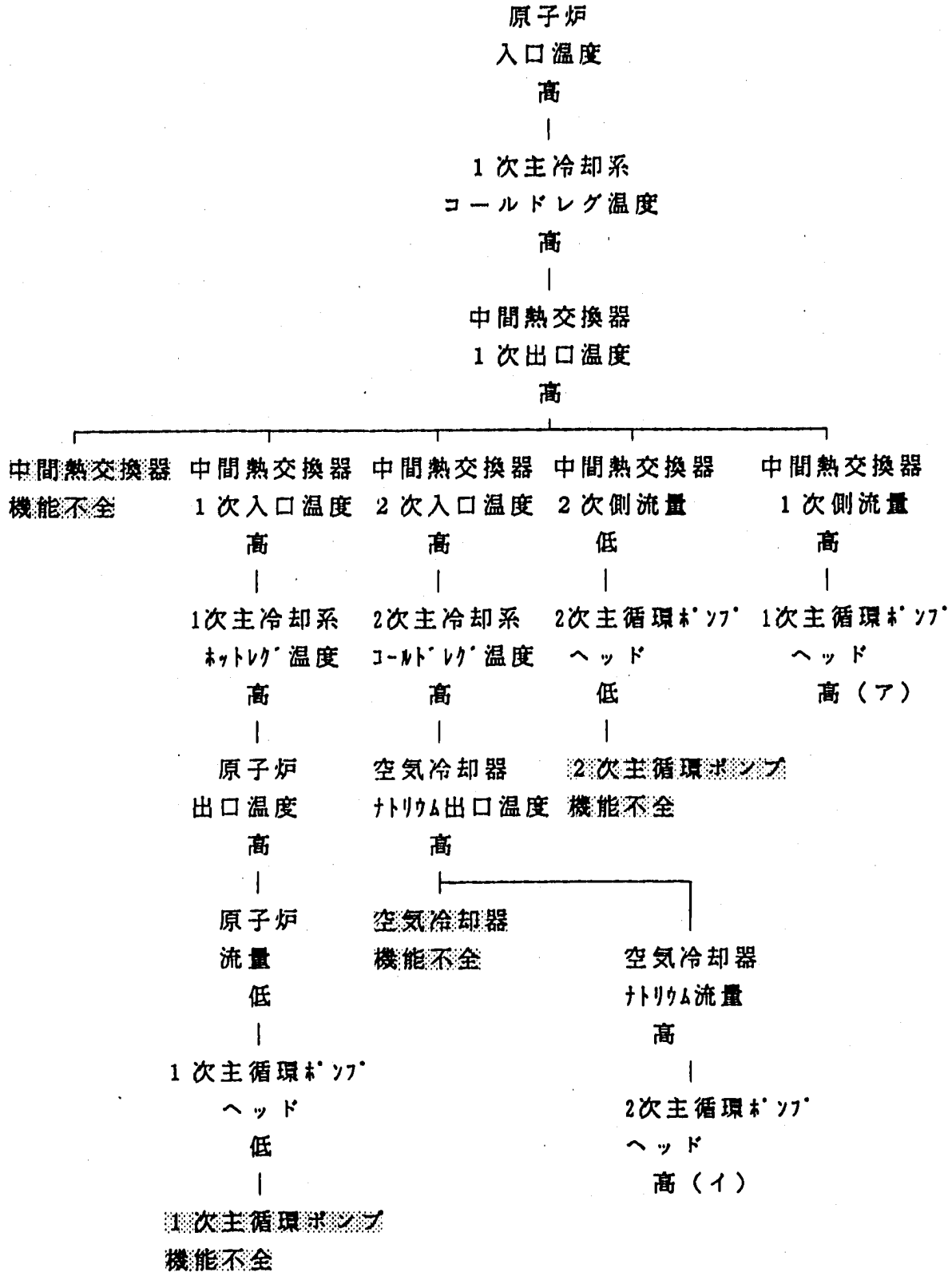
(2) プラント状態変数に関する定性的知識に対する記述力

(1) - a. で述べたデータ構造によって、種類は異なっても性質や機能が類似する機器、例えば中間熱交換器と空気冷却器に共通の特性は1通りの記述で表現する事ができる。これは、原子力プラントのように熱交換器、流体容器等、規模や充填流体が異なっても類似した特性を有する機器を多く含む系統の記述に適している。また、各機器の記述の中で、パラメータの変化容易性が指定できる。これによって、その変化が原因となっている可能性の高いパラメータについての推論のプライオリティを上げて推論の効率化を図る事ができる。このような点から、このデータ構造は、人間の有する定性的知識の記述に適している。

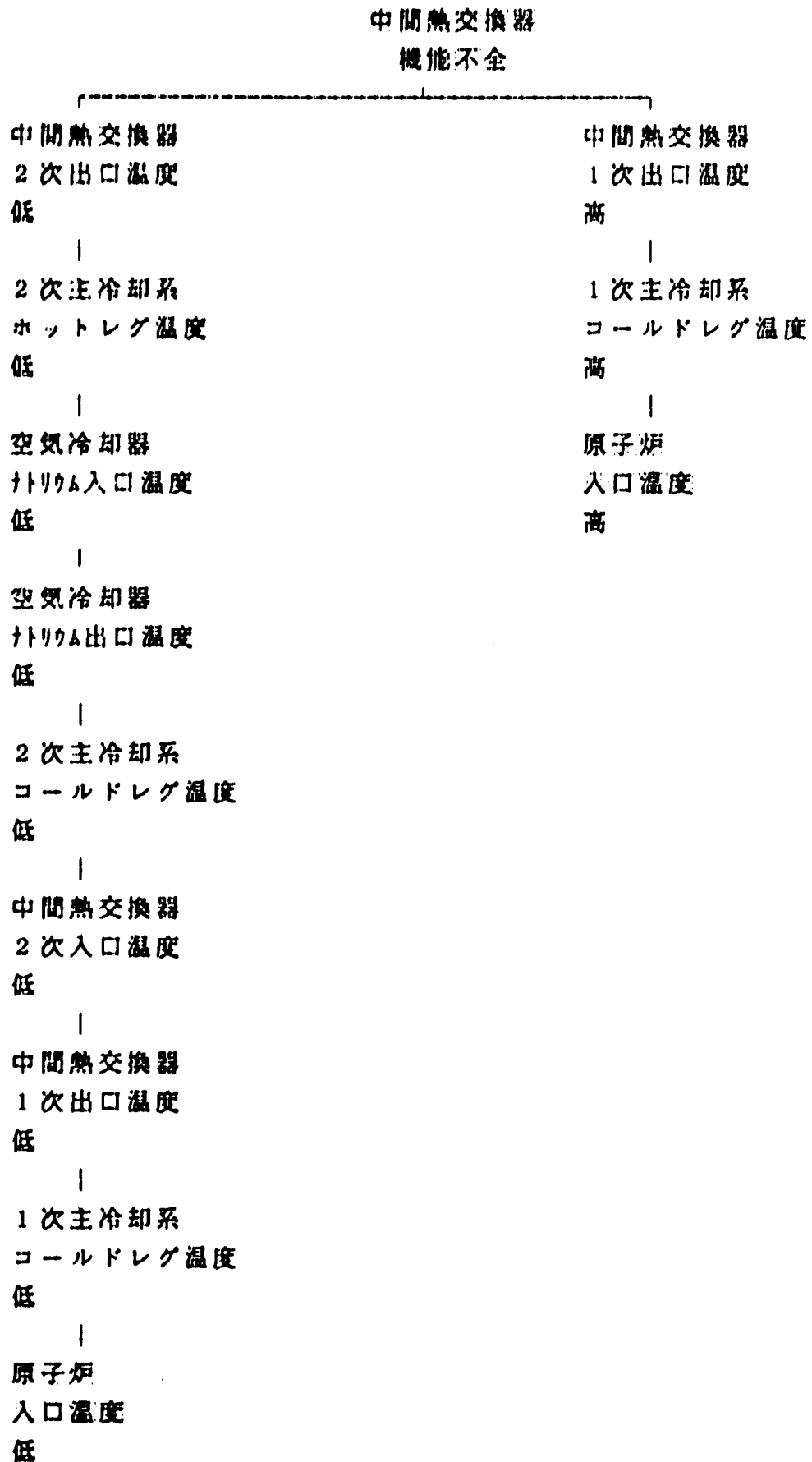
(3) . 導出された異常診断知識の妥当性

「原子炉入口温度高」に対する推論過程の概略を記す。

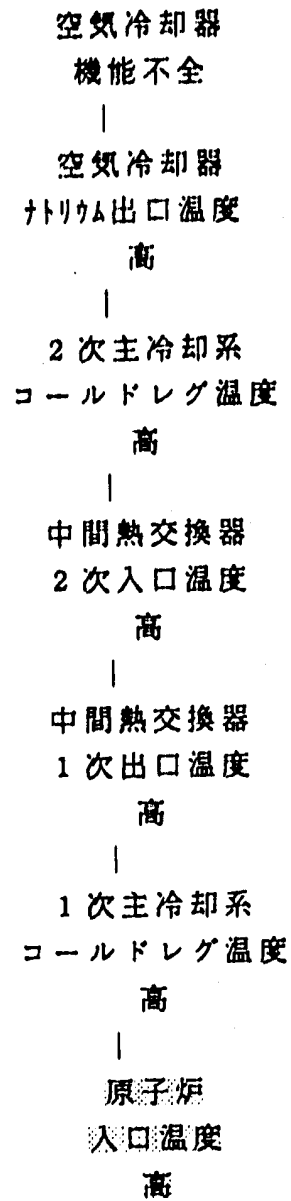
(3) - a 遡行推論



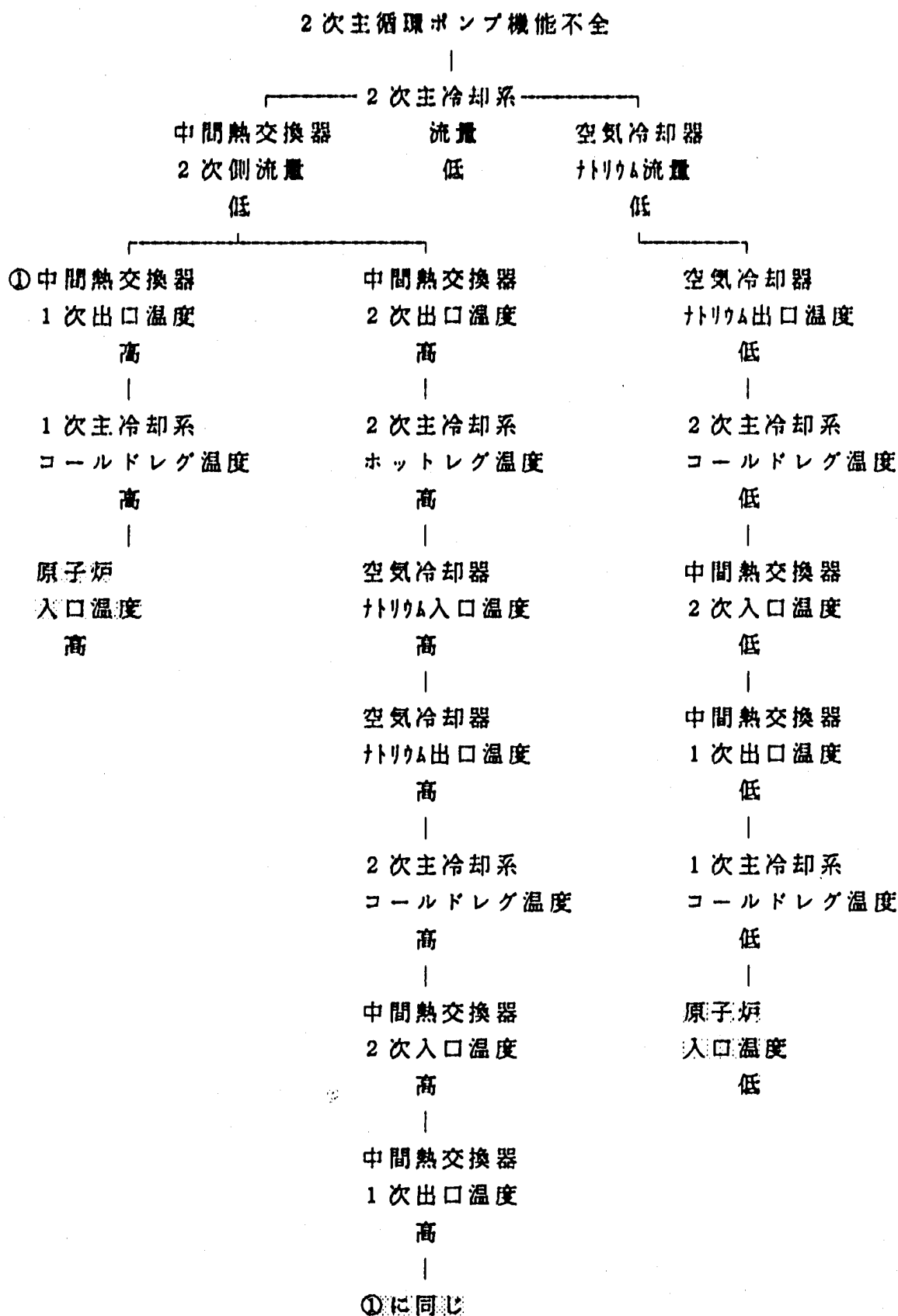
(3) -- b 「中間熱交換器機能不全」からの順行推論



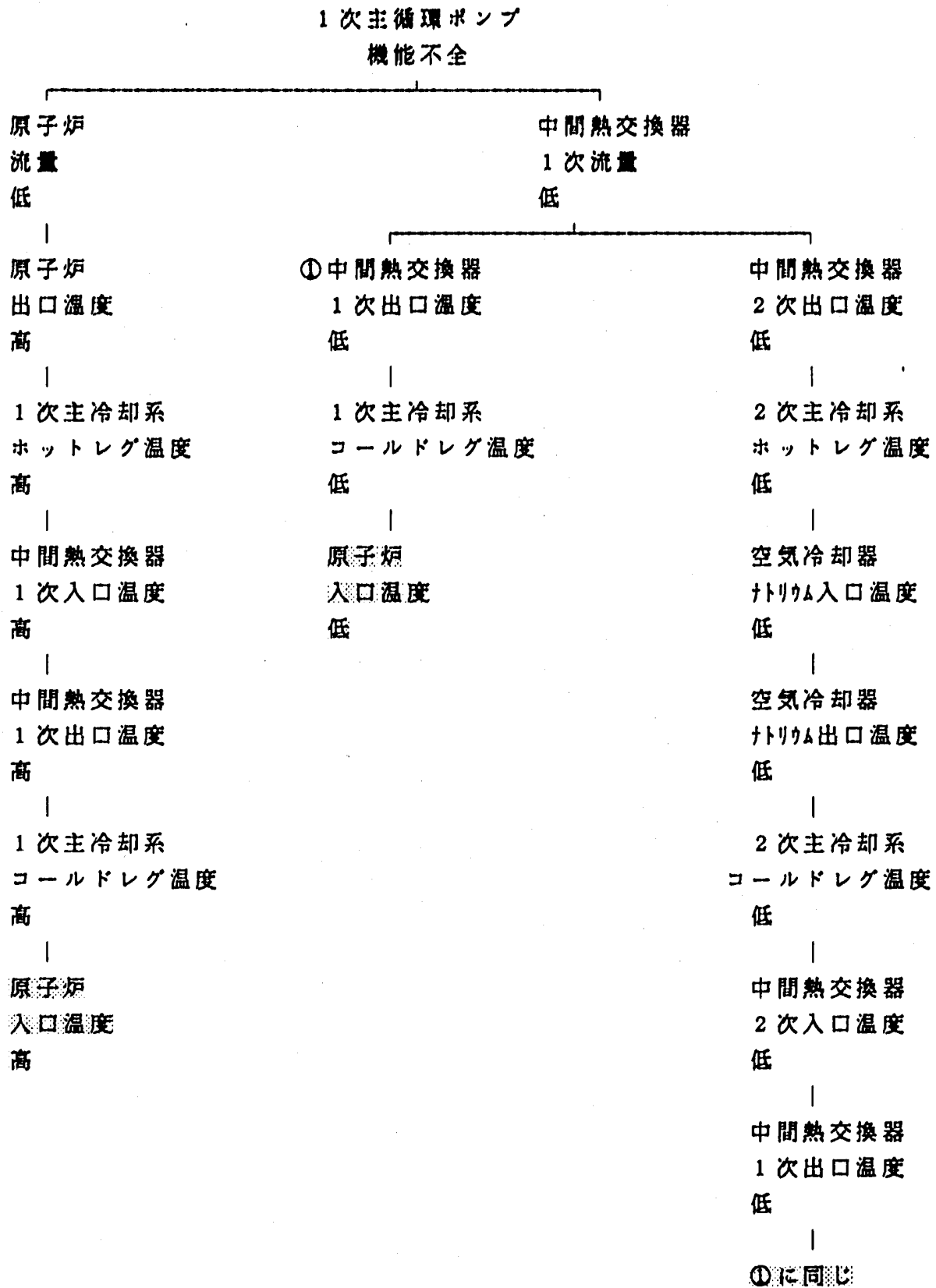
(3) - c 「空気冷却器機能不全」からの順行推論



(3) - d 「2次主循環ポンプ機能不全」からの順行推論



(3) - a 「1次主循環ポンプ機能不全」からの順行推論



以上、遡行推論においては、(3) - a の図の中のア)、イ) に示すように、1次、2次の主循環ポンプの機能不全と矛盾するノードが出現しているが、相当する原因解釈に関する知識が存在しないために、無視されている。これらの矛盾ノードに対する処理について、以下の点が考えられる。

①ある工学的なシステムの中で、その構成部品は、正常時には設計上の最大値に近い性能を発揮している場合が多い。この場合、その部品の「異常」とは、その性能に相当するパラメータの正常値からの1方向への逸脱のみを仮定すれば良い。例を挙げれば、電池で電球を点す回路では、「電流低」に対する原因として、電池に関しては「電圧低」が考えられるが、「電流高」に対して、「電池電圧高」という原因は意味が無い。また、本実験で対象とした『常陽』主冷却系のポンプも、投入電力に対して限界に近い効率で運転されているのであれば、異常としては駆動力低下のみを仮定する事が妥当である。この点では、解釈知識の無い事象ノードを遡行推論で無視するという考え方は妥当である。

②しかしながら、ポンプにおいて、何等かの制御系によって、流量が性能上十分な余裕のある一定の値に保たれる場合は、その駆動力に関する異常は正常値からの正負両方向を考える必要がある。

この2点を考えると、異常原因候補の選出に当っては、その解釈知識が存在するものとは別に、それ以上遡行できない事象ノードのリストも保存しておき、必要に応じて参照する機能の有効性を検討する必要がある。但し、複雑な系においては、この種の事象ノードの数は膨大なものとなるので、この機能はオプションとして用意するべきであろう。

順行推論については、(3) - b ~ e に示した過程から、「空気冷却器機能不全」以外の3原因については、「原子炉入口温度低」という、最初に与えた兆候と矛盾する事象ノードが出現している。にも拘わらずこれらの3原因は排除されていない。順行推論の推論木は、遡行推論とは異なり、その全ての枝端がシステムのユニークな状態を現しているべきものである。従って、互いに矛盾する事象ノードに関しては、何等かの手法により二者択一がされなければならない。

『常陽』主冷却系に関して矛盾ノードが発生する原因は、熱交換器が流体のループで閉じた系に結合されている事にある。言換えれば、どの推論木もその過程においては正しいのであるが、それら全ての作用が互いに相殺された結果だけが実際に観測される。従って二者択一は本質的に定量的な処理を要求するものであり、純粋な定性推論の枠内でのこの問題の解決は困難であると思われる。しかしながら、定量的な解析に委ねる範囲を最小限に抑える事、定量的な解析の結果を蓄積する事等は定性推論の技術的範囲で解決可能であると思われる。

第4章において、これらの問題についてより詳細に考察する。

4章. 知識コンパイラの問題点とその改良

3-2において指摘されているように、現状の知識コンパイラでは原子力プラントのような複雑なシステムを扱う際にいくつかの問題点が生じる。この章ではそのような問題点を整理し原因を考察し、明らかにされた問題点に対処するための知識コンパイラの改良点について述べる。

3-2では、部品の機能が正常な範囲を超えて発揮された事象からの故障仮説の生成と、順行推論における矛盾ノードの出現が指摘されていた。前者は、遡行推論においてパラメータが部品の持つ機能の方向へ逸脱した場合には故障仮説が生成されないという問題であり、これについては4.1節で論じる。後者は、順行推論において、パラメータに互いに矛盾するような定性値を割り当てているノードが生成される点である。この問題は、4.2節で述べる。

4.1 機能の方向への逸脱

4.1.1 問題点

知識コンパイラでは、部品の機能は影響を及ぼすパラメータの名前と影響の方向(+なら増加方向、-なら減少方向)で記述される。知識コンパイラは、前述の遡行推論において徴候から故障原因を探索する際に、パラメータの値の、機能の方向とは逆方向への逸脱に対しては故障仮説を生成するが、機能と同一の方向への逸脱に対しては故障仮説を生成しない。

例として原子炉を挙げると、原子炉の機能は冷却材出口温度を上昇する事であるから、原子炉機能の記述は「冷却材出口温度、+」となる。そこで、遡行推論によって、「冷却材出口温度、低」という状態が原子炉の出力に対して推論された場合には、機能の方向と逆方向へ、パラメータの定量値が基準値から逸脱しているため、「原子炉の機能不全」という故障仮説が生成される。しかし、「冷却材出口温度、高」という状態が推論された場合には、故障仮説が生成されない。

4.1.2 考察

一般に、部品の機能によりある方向に影響をうけるはずのパラメータが機能の影響の方向と逆方向に基準値から逸脱した場合は、その部品の機能が働いていないと考えられる。そのため、機能の方向と逆の方向へのパラメータ値の逸脱に対しては、「機能不全」という故障仮説を生成する汎用の解釈知識が用意されている。

一方、機能を同方向の逸脱に対してその部品の故障を疑うことは、故障によってさらにその部品の機能が增強されると考えることを意味し、一般には受け入れ難く、このような場合にはその部品への入力の変異を仮定して、さらに上流に故障の原因を求めることが自然であるように思われる。したがって、本知識コンパイラではそのような場合に対する解釈知識は用意されていなかった。

ところで、機能と同方向へ逸脱することと部品の故障との関係は、部品の能力の限界点も問題となる。ある工学的なシステムの中で、その構成部品は正常時には設計上の最大値に近い性能を発揮している場合が多く、機能の方向へのパラメータの逸脱は起こりにくいと考えられる。この場合、その部品の故障に関しては機能の方向とは逆の方向への逸脱のみを考慮すればよい。しかし、内部に制御系を含み、その機能によって性能上十分な余裕のある一定の値に保たれる部品の場合には、機能の方向への逸脱が起こる可能性があり、またその現象も故障と考えられる。したがって、そのような部品の機能に関する異常は、正常値からの正負両方を考える必要がある。

2章において述べたように、故障仮説は解釈知識の実行によって生成される。したがって、このような部品に関しては、特別な解釈知識を用意することにより、機能の方向への逸脱に関しても故障仮説を生成することができる。

4. 2 推論矛盾

この節では、順行推論において矛盾する定性値を推論する問題について、その原因と対策を考察する。

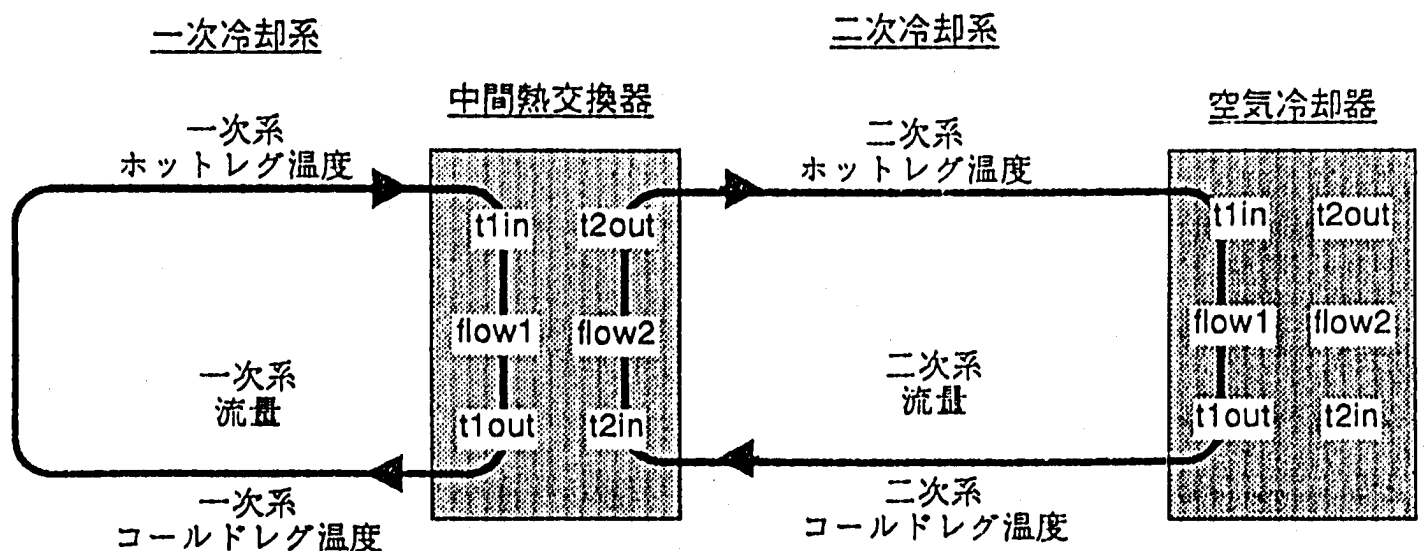


図 4 - 1 : 推論矛盾のモデル

4. 2. 1 状況

例として、中間熱交換器と空気冷却器のあいだの二次冷却系についての(二次系流量、[-])からの順行推論を取り上げる。

モデル:

一次冷却系

一次系ホットレグ温度

一次系コールドレグ温度

一次系流量

二次冷却系

二次系ホットレグ温度

二次系コールドレグ温度

二次系流量

推論:

(1) (二次系流量、[-])

ここで2つに分岐する。一方は、

(A1) 中間熱交換器に(二次系流量、[-])を伝播すると、
中間熱交換器のPW: 「flow2 は t1out に逆方向に作用する」によって、
(一次系コールドレグ温度、[+]) <1>

になり、もう一つの枝は、

(B1) 空気冷却器に(二次系流量、[-])を伝播すると、
空気冷却器のPW: 「flow1 は t1out に正方向に作用する」によって、
(二次系コールドレグ温度、[-])

(B2) 中間熱交換器に(二次系コールドレグ温度、[-])を伝播すると、
中間熱交換器のPW: 「t2in は t1out に正方向に作用する」によって、
(一次系コールドレグ温度、[-]) <2>

となる。

この推論において、<1> と <2> は矛盾している。

4. 2. 2 原因

実際の物理式、 $flow1(tlin - t1out) = flow2(t2out - t2in)$ において、それぞれのパラメータの値は、

case: $flow1\ tlin\ t1out = flow2\ t2out\ t2in$

 <1> 0 0 +(出力) = -(入力) 0 0(仮定)

<2> 0 0 -(出力) = 0(仮定) 0 -(入力)

である。このように、<1> において $t2in$ の定性値は 0 であると仮定しているのに、<2> ではそれが - になっている。よって矛盾する $t1out$ の定性値が発生する。

したがって、推論矛盾の発生する直接の原因は、パラメータの値を仮定して式を適用したあとで、仮定した値と異なる値を用いて同じ式を適用したことにある。次項では、このような状況を起こす原因となる知識コンパイラの問題点について述べる。

4. 2. 3 知識コンパイラの問題点

まず問題点として挙げられるのが、知識コンパイラが PW に基づく個々の推論の条件部において異常値をもっているパラメータをひとつだけしか認識できないことである。したがって、右辺を評価する際に、現在注目している異常値をもつパラメータ以外は定性値が 0 と仮定され、伝播先の左辺においても異常値を伝播されるパラメータは一つだけである。また、パラメータの値を管理していないため、0 と仮定したパラメータに対して異なった値が割り当てられても、値の不一致を検出できない。

さらに、前項で述べた $flow2[-]$ 、 $t2in[-]$ の状況は、定性推論では $t1out$ の値を決定することができない状況である。これを定性推論の'あいまいさ'がある状況といい、 $t1out$ の値は、[+] または [0] または [-] であると推論される。現在の知識コンパイラは、このようなあいまいさがある状況を適切に扱っていない。

4. 2. 4 改良

推論矛盾を解消するために、知識コンパイラの推論の仕組みを以下のように改良する事が考えられる。

① 複数パラメータから複数パラメータへの変化伝播を取り扱えるようにする

- ・定性値が割当てられた右辺のパラメータ全てを考慮する。
- ・定性値が割当てられていないパラメータが右辺に残ったままその式による変化伝播を扱わなければならない場合は、それらのパラメータの定性値の組合わせ全てに対応した変化伝播を or で結合して扱う。

② 順行推論における矛盾発生を検出可能にする。

- ・順行推論において、全てのパラメータに割当てられた定性値を記憶するようにする。
- ・矛盾発生に係わる推論木の最小部分の抽出を可能にするために、全てのパラメータ毎に、定性値が割当てられたノードの場所をも記憶するようにする。

ある枝で仮定した変数に関して矛盾が生じた場合は、その仮定が誤っていたということになるので、その枝は破棄される。確定した変数が矛盾を起こした場合、フィードバック・ループと認識する。これはフィードバック・ループの機能として、その変数を定性的に0に保つ(定量的に基準値に保つ)からである。

このように推論を行なうことにより、原因から起こる可能性のあるすべての状況が OR で生成されることになる。

4. 2. 5 考察

このように推論を行なうことで矛盾した推論を回避する事が可能になると思われるが、以下のような問題点が残る。

4. 2. 4 で述べた推論は右辺の未知パラメータの定性値の組合せについてすべての可能性を挙げることになる。一般に診断の場合には、実際に故障仮説が原因となって起こり得る全ての状態を推論することは望ましいことであるが、この場合、情報の不足によるあいまいさがふくまれているところに問題がある。順行推論は、与えられた故障原因より物理現象の因果連鎖によって発生しているはずの異常徴候を得ることを目的としている。したがって順行推論は、物理現象の因果連鎖を確実に追うことで、診断に有用な情報を生み出さなければならない。このような過程において、「あるパラメータが原理的にとり得るすべての値のうちどれかが起こっている」という推論は情報量がない。また、あいまいさがあまりにも多い場合、複数の故障仮説に対してそれらを選別するような徴候を生成できるかどうかの問題となる。複数の故障仮説に対して、すべて同じ徴候が生成された場合には、生成されたルールを用いて診断を行なうことができなくなってしまう。

このようにあいまいが多すぎることは、推論の有用性を失わせる結果になる。次に、そのあいまいさを減らす戦略を考察する。

あいまいさを減らす方法として、質問を行なうことが考えられる。しかし、あいまいさを持ったパラメータの値を直接聞いてしまうと、推論を行うことで情報量を生み出すことを目的としているにも拘らず、推論結果であるパラメータの値を聞くことになり、推論の結果の情報量はなくなるであろう。前述の例としてあげた状況では、あいまいさを持ったパ

ラメータは t_{2out} であるが、このパラメータの定量値が基準値を上回っているのか(この場合 t_{2out} の定性値は+になる)、同じなのか(t_{2out} の定性値は 0 になる)、下回っているのか(t_{2out} の定性値は - になる)を質問すると、 t_{2out} の定性値が判明したのは質問の回答によってであり、推論の結果ではない。したがってこの t_{2out} の値に関する情報量は無いと考えられ、そこから導かれる徴候にも情報量は無いことになる。

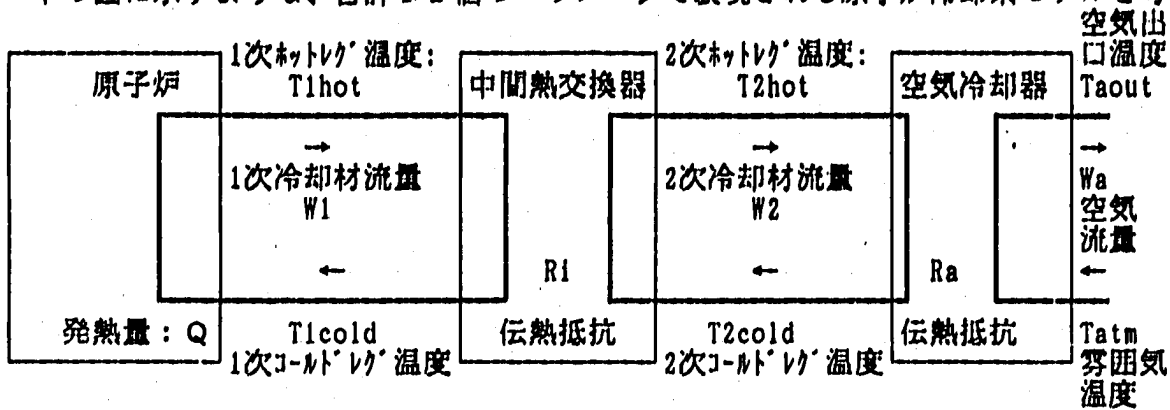
本質的には、定性推論であいまいさが発生することは、定量的な情報が欠落していることに起因する。例えば、推論矛盾の例としてあげた 2 次主冷却系流量から 1 次コールドレグ温度への変化伝播に関するあいまいさは、1 次主冷却系流量と 2 次主冷却系流量の大小関係、及び中間熱交換器と空気冷却器の総合伝熱抵抗の大小関係が分らない事が原因である(添付 4 - A 参照)。従って、この変化伝播の正負を決定するためには流量および伝熱抵抗の大小関係が必要である事を何等かの方法で自動的に提示すること、および、適当な質問を行なってこの大小関係を明確にすることができればあいまいさの本質的な原因を除去することができる。これを一般化すれば、あいまいさを発生させる本質的な事項(定量的なものとなる)を質問することで、あいまいさを解消することができると言える。また、このような本質的な事項に関する情報は、複数のパラメータのあいまいさの解消に用いることができるので、推論の材料である知識を補強していると考えることができ、推論の情報量は失われていないと考えられる。したがって、このような質問を行なうことであいまいさを減少させ推論の有用性を高めることは、有力なアプローチとなると思われる。

実際に本質的な情報を質問するためには、あいまいさを発生させる真の原因を検出するメカニズムと、そのあいまいさを解消する情報がユーザーにとって観測容易かどうかを判断する仕組みが必要である。

最初の問題に関しては 2 つのアプローチが考えられる。基本的には、あいまいさが発生するのは広い意味でネガティブ・フィードバックループまたはフォワードループが構成されている場合であると言えるが、いずれのアプローチもそのことを積極的に利用するものである。一つは、あいまいさが発生した状況を詳細な説明と共に利用者に提示して、それを解消するために有効な本質的な原因を利用者が特定し、その情報を入力する方法である。他の一つは、用いた関係式や推論過程、更に設定してきた仮定などを参照し、システム自身が本質的な原因を同定し、その情報を利用者から獲得する方法である。後者の方が望ましいことは明らかであるが、その実現には検討すべき点が多く残されており、今後の研究課題としたい。

添付 4 - A : 二次主冷却系流量から 1 次コールドレグ温度への変化伝播の符号

下の図に示すような、合計 1.2 個のパラメータで表現される原子炉冷却系モデルを考える。



この系の定常状態に関して以下の 5 個の方程式が成り立つ。

① 原子炉エネルギー保存式：
 $RE = Q - (T_{1hot} - T_{1cold}) * W_1 = 0$ (Cは冷却材比熱) 式 1

② IHX エネルギー保存式：
 $IE = (T_{1hot} - T_{1cold}) * W_1 - (T_{2hot} - T_{2cold}) * W_2 = 0$ 式 2

③ IHX 熱伝達式：
 $IH = e^{\frac{1}{R_{IHX} \cdot W_1} \cdot (T_{1cold} - T_{2cold})} - e^{\frac{1}{R_{IHX} \cdot W_2} \cdot (T_{1hot} - T_{2hot})} = 0$ 式 3

④ 空気冷却器エネルギー保存式：
 $AE = (T_{2hot} - T_{2cold}) * W_2 - (T_{aout} - T_{atm}) * W_{air} = 0$ 式 4

⑤ 空気冷却器熱伝達式：
 $AH = e^{\frac{1}{R_{AC} \cdot W_2} \cdot (T_{2cold} - T_{atm})} - e^{\frac{1}{R_{AC} \cdot W_{air}} \cdot (T_{2hot} - T_{aout})} = 0$ 式 5

但しこれらの式中の流量は、単位時間当りの重量流量に比熱を掛けたものとする。

式 1、式 2 より $T_{1cold} = T_{1hot} - Q / (C \cdot W_1)$ 、 $T_{2cold} = T_{2hot} - Q / (C \cdot W_2)$ であるので、式 3 は次式に変形される。

$$\frac{T_{1cold} - T_{2cold}}{T_{1cold} - T_{2cold} + Q(1/W_1 - 1/W_2)} = \exp\left(\frac{-1}{R_{IHX}} \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)\right)$$
 式 6

ここで、 $T_{1cold} - T_{2cold}$ を ΔT_{IHX} 、 $(1/W_1 - 1/W_2)/C$ を v_{IHX} とすると、

$$\Delta T_{IHX} = Q \cdot \frac{v_{IHX}}{\exp(v_{IHX}/R_{IHX}) - 1}$$
 式 7

これから、次の式が導かれる。

$$\frac{\Delta T_{IHX}}{v_{IHX}} = Q \cdot \frac{(1 - v_{IHX}/R_{IHX}) * \exp(v_{IHX}/R_{IHX}) - 1}{(\exp(v_{IHX}/R_{IHX}) - 1)^2}$$
 式 8

また、空気冷却器において、同様に、 $T_{2cold} - T_{atm}$ を ΔT_{AC} 、 $(1/W_2 - 1/W_{air})/C$ を v_{AC} とすると、

$$\frac{\Delta T_{AC}}{v_{AC}} = Q \cdot \frac{(1 - v_{AC}/R_{AC}) * \exp(-v_{AC}/R_{AC}) - 1}{(\exp(v_{AC}/R_{AC}) - 1)^2}$$
 式 9

式8を、 w_2 に対する ΔT_{1HX} の変化率に変換して、

$$\frac{\Delta T_{1HX}}{w_2} = Q \cdot \frac{(1 - v_{1HX}/R_{1HX}) \cdot \exp(v_{1HX}/R_{1HX}) - 1}{(\exp(v_{1HX}/R_{1HX}) - 1) \cdot w_2} \quad \text{式10}$$

及び式9を、 w_2 に対する ΔT_{AC} の変化率に変換して、

$$\frac{\Delta T_{AC}}{w_2} = -Q \cdot \frac{(1 - v_{AC}/R_{AC}) \cdot \exp(v_{AC}/R_{AC}) - 1}{(\exp(v_{AC}/R_{AC}) - 1) \cdot w_2} \quad \text{式11}$$

が導かれる。

従って、 $T_{1001d} = T_{1im} + \Delta T_{1HX} + \Delta T_{AC}$ であり、 T_{1im} はこの場合一定と仮定して差し支えないから、 v_{1HX}/R_{1HX} を χ_{1HX} 、 v_{AC}/R_{AC} を χ_{AC} と置くと、

$$\frac{T_{1001d}}{w_2} = \frac{Q}{w_2} \left[\frac{(1 - \chi_{1HX}) \cdot \exp(\chi_{1HX}) - 1}{(\exp(\chi_{1HX}) - 1)} - \frac{(1 - \chi_{AC}) \cdot \exp(\chi_{AC}) - 1}{(\exp(\chi_{AC}) - 1)} \right] \quad \text{式12}$$

$f(x) = \frac{(1-x) \cdot \exp(x) - 1}{(\exp(x) - 1)}$ とすると、この分子 $\text{numer}(x) = (1-x) \cdot \exp(x) - 1$ は0以下で、

(理由: $\text{numer}(0) = 0$, $\text{numer}'(x) = -x \cdot \exp(x)$ より $\text{numer}(x < 0) > 0$, $\text{numer}(x > 0) < 0$)

単調増加関数である。

(理由: $f'(x) = \frac{\exp(x) \cdot (x \cdot \exp(x) - 2 \cdot \exp(x) + x + 2)}{(\exp(x) - 1)^2}$ で、分子下線部は $x=0$ で0であり、

一階微分: $(x-1) \exp(x) + 1$ は $x=0$ で0、2階微分 $x \cdot \exp(x)$ は $x=0$ で0、 $x < 0$ で負、 $x > 0$ で正であるので1階微分は $x=0$ 以外では正である。従って分子下線部は単調増加関数であり、 $x < 0$ で負、 $x > 0$ で正となり分母と符号が一致する。よって $f'(x) \geq 0$ 。)

従って、 w_2 から T_{1001d} への変化伝播の符号は、 χ_{1HX} と χ_{AC} 、元の形に戻せば $(1/w_1 - 1/w_2)/R_{1HX}$ 、 $(1/w_2 - 1/w_1)/R_{AC}$ の大小によって符号が変わる。

結論

本研究で、高速炉発電プラントの主冷却系簡易モデルを対象として、定性推論に基づく知識コンパイラによる種々の異常兆候に対する診断知識の試みた結果、次のような知見が得られた。

- ①知識コンパイラに用いられている各種知識の記述方法で、原子力プラントに関する知識は記述可能である。

知識コンパイラでは、対象システムに関する知識は、物理知識、パラメータ定性値に関する解釈知識、推論制御知識、故障メカニズム用汎化知識に分類されており、容易に欠落、重複を避けて入力することができる。

- ②プラント内の各機器におけるパラメータ間の定性的変化伝播の組合せでプラント全体の特性をほぼ表現し得る。

プラント内の主要パラメータ間の依存／変化伝播の関係は、知識コンパイラで採用された様式に従って記述する事が可能である。しかしながら、今後の研究で対象範囲を拡大、詳細化した時点で改めてこの点について再評価する必要があるものと考えられる。

- ③順行推論において、矛盾が発生した時点で、推論の流れを変更するような推論制御機構が必要である。

あらゆる可能性を列挙するための遡行推論とは異なり、順行推論は、推論木全体で、対象システムのユニークな状態を表すべきものである。従って、互いに矛盾する事象が推論途中に出現した時点で、何等かの方法で二者択一を行う事が妥当である。

- ④各機器の性能が、その正常な範囲を逸脱して過剰に発揮されている事象に対しても、故障仮説を生成する必要がある。

現段階での知識コンパイラでは、各機器の性能が正常な範囲を下回る場合のみ「機能不全」という故障仮説を生成する。しかしながら、原子炉を例にとると、その機能は冷却材を昇温する事であるが、原子炉出口冷却材温度が正常な範囲を越えて高いという事象に対しては、原子炉内の出力調整機構の故障という仮説が生成される事が妥当である。

- ⑤本研究でみられた、定性推論における矛盾事象の発生は、対象システムが、熱媒体が循環するループが熱交換器を介して複数段結合している構造を有する事に起因する。

同一のループが、熱源に近い熱交換器で熱を受け取り、ヒートシンクに近い熱交換器で熱を放出する。熱交換器は、流量に対する出口温度の定性値伝播が1次側と2次側で逆である。この事が矛盾発生の基本的原因である。この結果、本研究で対象としたシステムは、7個の独立変数と5個の従属変数から成るが、35通りの変化伝播の内、その符号が定性推論で決定できるものは14通りに留まった。

以上の知見の中で、今後の適用性評価を進める上で、⑤が最も重要であると考えられる。この問題が、定量的な情報処理手法に依らなければ解決不可能なものか、あるいは

何等かの定性的情報処理、経験則、または記号処理的手法の範囲で解決可能なものかを見極める事が今後の課題である。

【参考文献】

[山口87]山口, 溝口, 田岡, 小高, 野村, 角所, "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, N3, pp. 77-84, 1987.

[小澤89]小澤, 野村, 溝口, "知識コンパイラ (KC II) のDST化", 人工知能学会研究会資料, SIG-KBS-8905, pp. 33-40, 1989.

[脇 90]脇, 平井, 野村, 溝口, "深い知識に基づくドメイン特化型シェルKC II-DST ーフィールドバックループと故障モードへの対応ー", 第4回人工知能学会全国大会論文集, pp. 523-526, 1990.

[平井90]平井, 脇, 野村, 溝口, "深い知識に基づくドメイン特化型シェルKC II-DST ー対象知識構築用インタフェースー", 第4回人工知能学会全国大会論文集, pp. 519-522, 1990.

[内田89]内田, 中澤, 実近, "Common ESPにおけるプログラミング環境", 第39回情報処理学会全国大会講演論文集, pp. 1143-1144, 1989.

執筆分担表

1章 緒言	(動燃事業団)
2章 知識コンパイラの概要	(大阪大学)
3章 高速実験炉「常陽」主冷却系への知識コンパイラの試験的適用	(動燃事業団)
4章 知識コンパイラの問題点とその改良	(大阪大学)
5章 結論	(動燃事業団)