

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（Ⅱ）

（その2：自律型プラント異常診断用知識コンパイラの開発と評価）

1992年9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(Ⅱ)
(その2:自律型プラント異常診断用知識コンパイラの開発と評価)

吉川 信治*、 笹島 宗彦*、 来村 徳信*、
池田 満*、 遠藤 昭*、 溝口 理一郎*

要旨

原子力プラントの運転を、より安全、確実に行なうための異常診断知識を、矛盾、欠落、表現の不一致等の問題を回避して構築することが求められている。この異常診断の知識を、従来のように経験を積んだ人間へのインタビューによってではなく、情報処理技術を用いてより確実、完全に構築する技術が提案されている。これは知識コンパイラと称する。

平成2年度までの研究で、定性推論に基づく知識コンパイラを原子力プラントの診断知識獲得に適用する際に、推論矛盾が発生する事がわかった。

本報告書では、この問題点を克服すべく平成3年度に考案した2種類の新たな推論手法と、その原子炉2ループ冷却系モデルに対する適用性を評価する。また、これらの新たな推論手法を核として、異常診断知識導出システムを構築するために必要な開発課題についても整理し、考察する。

何れの手法も、従来の方法が、2変数間の定性値の伝播のみに着目していることに起因して起こる推論矛盾の発生を避けるため、3個以上の変数の間の定性値の関係を同時に考慮できるようにしたものである。

また、何れの手法とも、サーマルバランスやエネルギー保存に関する変数間の定性的拘束条件を推論に用いている。

まず、最初の手法は、ある変数に影響を及ぼす他の変数の定性値をすべて管理しつつ、変数間の因果関係に沿って矛盾が発生する場合を除きつつ定性値を割り当てていく手法である。

2番目の手法は、各変数に対する他の変数からの変化伝播の方向と、サーマルバランスやエネルギー保存に関する変数間の定性的拘束条件を全て定性連立方程式に表し、これを順次分割しつつ局所的に背理法を適用することによって解く手法である。

この2手法の、原子炉冷却系モデルへの適用性を評価した結果、最初の手法は、推論過程の説明機能において優れており、2番目の手法は、解の導出効率において優れている事がわかった。

これらの推論手法を核として異常診断知識導出システムを構築するためには、定量的情報処理モジュールとのインターフェース、推論能力が向上するような新たな定性知識の追加をユーザーに示唆する機能等の開発が必要であると結論された。

*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

#大阪大学 産業科学研究所 電子機器部門

September, 1992

Development of Knowledge Acquisition Methods
for Knowledge Base Construction for Autonomous Plants

S. Yoshikawa*, M. Sasajima#, Y. Kitamura#,
M. Ikeda# A. Endou*, R. Mizoguchi#

A b s t r a c t

In order to enhance safety and reliability of nuclear plant operation, it is strongly desired to construct diagnostic knowledge base without lacking, contradiction, and description inconsistency. Recently, an advanced method: "Knowledge Compiler" to acquire diagnostic knowledge, mainly based on qualitative reasoning technique, without accumulating heuristics by interviews.

The applicability of this method for nuclear plants was evaluated in FY1990, and reasoning contradictions were found to be the most significant problem.

In this paper, 2 new reasoning methods are proposed to overcome this problem, and their applicability is discussed about 2 loop heat transport system model of a nuclear power plant. Technical development required in future are also suggested to construct new diagnostic knowledge generation system based on these 2 new reasoning schemes.

Both these methods reflect the analysis of initially experienced reasoning contradiction. Both these methods effectively utilize knowledge on thermal balance, energy conservation other than that on change propagation in qualitative variables.

In the first method, qualitative values are allocated to the system variables along with the causality direction, avoiding contradictions among plural variables in each qualitative constraint describing knowledge of propagation, thermal balance, or energy conservation.

In the second method, all the qualitative information is represented as a set of qualitative simultaneous equations. And, more than one smaller sets are generated by substituting local solutions in a recursive manner. A contrary method is applied for minimal subset to derive local solutions.

The first method is concluded to be advantageous in explanation of the reasoning process. The second method is found to be efficient in deriving the qualitative solutions.

It is found finally that 2 major technical developments are necessary to build a new structure for diagnostic knowledge generation system based on these new reasoning schemes: interface between quantitative information processing modules, and a new function to suggest adding further information to the user in order to enhance reasoning effectiveness.

#The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

*Frontier Research Section, Technology Development Division, O-arai Engineering Center,
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

目次

1. 緒言	1
2. パラメータ間因果関係と、複数の変数の定性値の関係をを用いる手法	4
2-1 新しい定性推論方式の概要	4
2-2 局所的知識	4
2-3 大域的知識	8
2-4 推論	8
2-5 常陽の機器のモデル	12
2-6 推論結果	16
3. 定性連立方程式による手法	18
3-1 原子力プラントに適用する定性推論手法が満たすべき条件	18
3-2 平衡状態に関する定性的知識からの推論の妥当性	21
3-3 手法の考察に用いた原子炉冷却系モデル	23
3-4 定性連立方程式の解法	26
3-5 異常診断知識の導出に用いた定性知識	29
3-6 2ループ原子炉冷却系モデルに対する異常診断知識導出	32
4. 新たな推論手法に関する考察	35
4-1 制約式と因果指定に基づく推論方式の課題とその解決策の考察	35
4-2 定性連立方程式による手法の課題とその解決策の考察	38
4-3 原子力プラントにおける事象と、その推論に必要な情報との関連に関する考察	40
4-4 今後取組むべき新たな開発課題	43
5. 結論	45
執筆分担	46

第1章 緒言

平成2年度の研究では、大阪大学が従来より開発を行ってきた知識コンパイラ KCII-DST を動燃の原子力プラントに適用することにより、原子力プラントのような熱交換系に対する知識コンパイラの適用性を見きわめることが目的であった。実際に原子力プラントに関する深い知識ベースを構築し、知識コンパイラによって異常診断知識の導出を試みた結果、基本的な適用可能性は確認できたものの、いくつかの問題点が明らかとなった。部品が過剰に機能を発揮する現象を故障としないことと、パラメータに矛盾する値を推論する現象が起こることが、主要な問題点であった。平成2年度の研究ではこれらの問題点の原因の探求と対策の考察がなされた。

この章では、平成2年度に行なわれた知識コンパイラ KCII-DST の原子力プラントへの適用性評価の概要を述べる。

1-2 構築した対象モデル

平成2年度の研究では図1-(1)に示す「常陽」主冷却系の熱流動を主な対象とした。原子炉容器および一次系ポンプ、二次系ポンプのナトリウム液面とカバーガスの挙動のような圧力に関する事象は対象外とした。

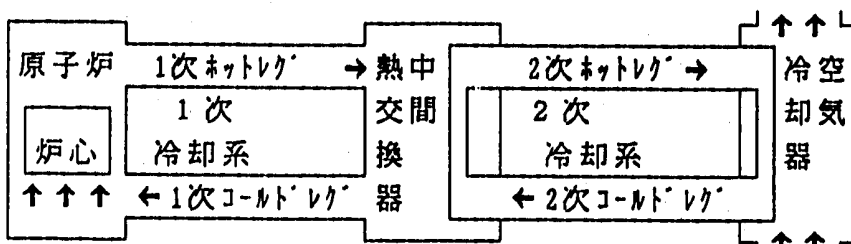


図1-(1)：「常陽」原子炉冷却系モデル

対象について構成機器ごとに、挙動を表現しうるパラメータを決定し、そのパラメータ間の変化の伝播関係を記述した。変化の伝播とは、あるパラメータaが異常値をとった際に、その変化が部品内の他のパラメータbに影響を与え、パラメータbを異常値に変化させる事象をいう。変化の伝播関係は(伝播元パラメータ名)-(D)->(伝播先パラメータ名)の形で記述された。ここでラベルDは+か-をとり、+の場合正方向の作用を表し、伝播元パラメータが正常値より大きくなる変化をしたときに、伝播先パラメータも正常値より大きくなる伝播方向を表す。(-は反対に負方向の作用を表す)ここで伝播知識がパラメータの一对一の関係で表現されることに留意すべきである。原子炉、中間熱交換器、空気冷却器の流量と二次側の出口温度の関係は共通に記述され、汎用性を備えていることが評価された。またポンプの知識は相当に簡略化されており、この知識をより正確に表現することも次年度以降の課題とされた。各機器に関する伝播知識に加えて、機器の接続状況と、異常徴候を検出するセンサー装着箇所に関する知識、異常原因の解釈の知識を与えた。

1-3 異常診断知識の導出と問題点

初期異常徴候として「原子炉入口温度・高」を与えて遡行推論を行なわせた。故障仮説として「中間熱交換器 機能不全」、「一次主循環ポンプ 機能不全」「二次主循環ポンプ 機能不全」、「空気冷却器 機能不全」が推論された。それぞれの故障仮説から他の徴候を導出する順行推論を行なわせた結果、「原子炉入口温度 高」「原子炉入口温度 低」の両方の徴候が推論される推論矛盾の現象が発生した。順行推論はある故障が起きている際の系のユニークな状態を推論するのが目的であったから、パラメータの異常値が二つある推論結果はおかしいといわざるをえない。この点は知識コンパイラにとって本質的な問題点であるという認識がなされ、詳しく考察が行なわれた。次節で平成2年度における考察の概要を述べる。

また、故障仮説の生成においてパラメータの値の機能を増大させる方向への逸脱から故障仮説が生成されないことが指摘された。これは部品の機能が故障によって増強されることは一般にはあまりないことから、そのような故障を生成する知識が記述されていなかったことに起因する。しかし、部品には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もある。このような部品の場合、機能を増大させる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。そのような部品に関しては特別な知識を用意することにより、機能を増大させる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。

1-4 推論の矛盾の原因と対策

知識コンパイラ KCII-DST が推論矛盾を起こす原因に知識の記述方法の不適切さを挙げる事ができる。KCII-DST では物理式をパラメータの一对一の伝播関係に分解して記述する。このような記述方法をとると、複数のパラメータの異常値に対して変化を起こすパラメータの変化が正確に記述できない。また部品においてある伝播関係に基づいて変化を伝播させる際に、他のパラメータに関して暗黙の仮定を置いてしまうことがある。このような変化の伝播を行なった後に、ループなどによってその仮定に反するパラメータの値が決まった場合、推論されるパラメータの値は先ほどの推論と矛盾する可能性がある。

さらに問題点として挙げられるのが、知識コンパイラが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、ある関係式の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 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。

また、熱交換器のような受動的機器の場合、系に組込まれた状態に依存した知識を記述してしまいがちである。機器の使われ方に依存した知識は、他の使い方をされたときに使用できなくなり、汎用性が損なわれてしまう。このような系に依存する知識の分離の明確化も次年度の課題とされた。

平成2年度の研究では、このような問題点を解消するための知識コンパイラの改良の方向も考察された。矛盾する値を推論することを避けるため以下のように知識コンパイラを改良することが考えられた。

1. 複数パラメータと複数パラメータの関係性を保持する。
2. パラメータに割り当てられた値を全て管理する。
3. 式の評価は、すべての異常値をもつパラメータの影響を合わせて評価する。
4. 伝播は複数のパラメータとその定性値の組を OR で生成する。
5. ある式を評価する際に、パラメータの値が分からない場合、すべての可能性を仮定して、それぞれ OR で生成する。

値の仮定と確定の問題や人為的なネガティブ・フィードバック・ループの扱いなどは次年度の課題とされた。

さらに定性推論の本質でもある曖昧性についても考察が行なわれた。定性推論では量に関する情報が欠けているため、推論結果が一意に定まらない曖昧さが発生する。曖昧さがあまりに多いと生成される診断知識の有用性が減少してしまう。対象とする熱交換系では熱交換器が受動的に熱平衡状態に達する振舞いを適切に記述することができず、推論に多くの曖昧さが出ていた。

このような考察を踏まえ、対象とする熱交換系の振舞いを分析し、その本質を抽出することで、定性推論の曖昧さを解消することが課題となった。

本報告書では、以上のような反省に基づいて考案された、次の2つの新たな推論手法の適用性を議論する。

① 制約式と因果指定に基づく定性推論方式

② 定性連立方程式による方法

以下、①を第2章で、②を第3章で説明する。

第2章 パラメータ間因果関係と、複数の変数の定性値の関係をを用いる手法

平成2年度の研究で、従来の知識コンパイラの推論方式ではループがある系を対象とした際に矛盾するパラメータの値を推論することが明らかとなった。またパラメータの値が矛盾しないようにありうる可能性をすべて生成すると、曖昧さが多くなり推論の有用性が減少することが予測された。平成3年度の研究ではこれらの課題を解決すべく、推論方式と知識の記述様式の根本的改良が図られた。その結果、新しい推論方式とその推論方式に適合したプラントの人工知能的モデルを構築することができた。この節では新しい推論方式と、構築したプラントのモデルについて述べる。

2-1 新しい定性推論方式の概要

新しい推論方式はループがあるような系についても正しい推論を行なうことが目的である。従来の推論方式と比較しての特徴は以下の通りである。

- ・複数のパラメータ間に成り立つ制約条件を扱う。
- ・パラメータの値の管理を行なう。
- ・パラメータに因果の属性を指定する。
- ・部品ごとに局所的知識を記述する。
- ・曖昧さを減少させるために大域的知識を与える。
- ・推論は部品ごとに制約条件を満たす状態を生成する。
- ・故障仮説や異常徴候の生成は従来と同じである。

このような特徴をもつ新しい推論方式は、値の矛盾を起こすことなく推論を行なうことができる。また大域的知識を用いることで曖昧さが減少する。

2-2 局所的知識

局所的知識は部品ごとに与える。部品を接続情報を用いて接続し組み合わせることで、系全体に関する知識を構成する。この際、部品の知識は系に影響されてはいけない。例えば、パイプの機能を記述する際にパイプがループの一部分を構成していることに依存してはならない。あくまでパイプが単独で果たす機能を記述し、その機能を他の部品の機能と組み合わせることで、ループによる影響が導出されるべきである。

部品に与える知識は

- (1) パラメータ集合
- (2) 制約条件
- (3) 接続関係
- (4) 因果指定
- (5) 故障に関する知識

からなる。

(1) パラメータ集合

パラメータ集合は部品の状態を表現できるだけの物理的パラメータを与える。パラメータの値は定性値で表し、[+],[0],[-]のいずれかである。ここで[0]はパラメータが表す物理量が基準の値に等しいことを表す。[+]は基準値より大きい異常値、[-]は小さい異常値であることを表す。

(2) 制約条件

制約条件は複数のパラメータ間に成り立つ制約を、複数のパラメータと演算子を用いて記述する。制約条件は定量的な物理方程式を定性方程式に直したものであり、定性値をとるパラメータと定性演算子によって充足される。

(3) 接続関係

接続関係は部品間の接続に関する知識である。部品は複数のポートを持ち、それぞれのポートを他の部品に接続することができる。接続関係は部品のポート名の2つ組で表現され、その2つのポートが互いに接続されていることを表現する。また部品のパラメータは0または1つのポートに所属することができる。あるパラメータがポートに所属している場合、その値はポートが接続されている先の部品の対応するパラメータの値に直接的に相互に影響される。接続情報に基づき、部品のパラメータには次のフラグが付加される。

・外部(eXternal:X)

パラメータが部品の外部に継っているかどうかを表す。

外部に継っていれば X(外部)、そうでなければ \bar{X} (内部)と表記する。

(4) 因果指定

一般に部品における物理現象には一方的な因果関係が見られることがある。例えばパイプの両端の温度を考えると、パイプの入口温度が高い時は必ず出口温度も高くなる。しかし出口温度が高くても入口温度は影響を受けない。このようにパイプの出口温度は入口温度に一方的に依存している。したがってパイプに関して推論する際に入口温度の変化から出口温度の変化を推論することは正しいが、出口温度の変化から入口

温度の変化を推論することは正しいとはいえないことになる。この2つのパラメータの関係は制約式では (入口温度) = (出口温度) と表現するしかないが、2つのパラメータの関係は等価ではない。制約式に加えて一方的因果関係をなんらかの方法で表現することで、正しい推論を行なうことが可能になる。

このような因果関係は物理現象に固有な場合もあるが、大部分は部品の構造や機能などによって物理現象が制約されることによって起こる。したがって因果性に関する情報は部品のパラメータごとに記述する。このような因果性を、パラメータをノードとする有向グラフを知識として与えれば依存関係を完全に記述することができるが、パラメータの依存関係を完全に把握することは難しいと思われる。

以上のような考察を踏まえ、因果性に関する知識を部品のパラメータごとに以下の条件がなりたつかどうかのフラグを付加することで表現する。

- ・原因 (Cause: C) そのパラメータの変化が原因となって、部品内の他のパラメータの値が影響されることがあるか。
- ・結果 (Effect: E) 部品内の他のパラメータの変化が原因となって、そのパラメータの値が変化することがあるか。

パラメータの属性は記号と否定記号で表す。C は原因になれることを示し、 \bar{C} はなれないことを示す。この2つの属性は排他的なものではないので、実際にはパラメータには以下の2つの記号の組合せが属性としてつく。

$C^{\wedge}E$: 原因であり結果ではない。

部品内のパラメータの変化によって影響をうけることはなく、他のパラメータに影響を与えるだけである。すなわち部品に対して入力として部品の外から与えられるもの。

(例) 抵抗の抵抗値 R (内部定数)
 モータの電圧 V (外部から与えられる)

$\bar{C}E$: 原因ではなく結果である

部品の他のパラメータに影響を与えることはなく、影響を受けるだけのもの。

(例) 抵抗での発熱量 (不可逆過程の結果)
 パイプの出口温度 (一方的な依存)

CE: 原因かつ結果である

影響を及ぼし、及ぼされるパラメータ

(例) パイプの入口圧と出口圧と流量

このような部品のパラメータの属性としての因果指定は依存関係の一部分を表現するだけであり、知識を記述する人間にとっては部品内部のパラメータによって影響されるか、影響するかを考えればよく、記述は容易であると考えられる。

なお、原因になれるパラメータを原因パラメータ、結果になれるパラメータを結果パラメータと呼ぶことがある。原因パラメータは CE または C^E であり、結果パラメータは CE または [^]CE のフラグを持つ。

(5) 故障に関する知識

故障に関する知識は、その部品で起こりうる故障の概念を表す。部品は機能とする制約条件を指定できる。部品における故障の原因は、診断対象の系の外側の事象をパラメータで表現する外因パラメータ(後述)の異常に帰着する場合と、パラメータではなく制約式にしか原因を求められない場合がある。したがって部品の外因パラメータが異常値をとる場合はその部品の故障であり、またすべての原因パラメータが正しいにも関わらずに制約が成り立たない場合は、後者の制約条件がなんらかの原因がなりたたない、故障モードともいべき動作モードに移っていると考えられる。この場合に成り立つ制約条件は故障の原因によって異なるので、それぞれ故障モードとその時成り立つ制約式として記述する。

外因パラメータとはそのパラメータの値が診断対象の系のパラメータに依存していないものをいう。これは部品内部の定数のようなものや、診断対象の系の外部にあるものを表すパラメータなどがある。定数(の異常)を決定するものはパラメータでは捉えることができないし、診断対象の外部にあるものの状態を決定することもできない。したがって外因パラメータの異常値は説明することができないので、それをもって故障とする。外因パラメータは接続を表す X フラグと、因果を表す C, E フラグを用いて以下のように定義できる。

・外因(exogenous:0)

系の外部の要因の要因で変化するパラメータ。

Cであることが必要。

1. 内部パラメータであり、C^Eなパラメータ。

内部の定数を表す。

2. 外部パラメータかつ C'E または CE なパラメータで、
診断対象の系全体の外部と繋がっているもの。

このパラメータの値は系の外部の要因によって与えられる。

2-3 大域的知識

提案する新しい推論方式は基本的に前項で述べた局所的知識に基づいて推論を行なう。
しかし局所的知識だけに基づいて推論を行なうと多くの曖昧さが発生する。これは部品が接続して作られるループのような構造がもたらす性質などを局所的知識では表現できないことが原因と考えられる。我々は、このような性質を抽出し知識として記述することで、曖昧さを減少させることができると考えており、現在抽出を進めているところである。

現在抽出している曖昧さを減らす知識は大域的知識として表現される。大域的知識は、複数の部品で構成される大域的な構造の性質を複数の部品のパラメータの間で成り立つ制約式として記述する。大域的制約は系がループを組んでいる際の圧力バランスなどの構造によって生じる性質を表すものと、系が到達する定常状態で大域的に成り立つ関係を表すものがある。このような大域的な制約は部品の接続状態に依存しており局所的な知識では表現できず、接続された部品で構成される大域的構造が持つ制約として記述するしかない。また定常状態を規定する制約式を記述することで、系が定常になる状態だけを推論することができる。人工的に機械によって構成された系は定常状態で動作することが多いと考えられ、また熱のように必ず平衡に達する物理現象もあることから、定常状態に到達すると仮定することが合理的といえる場合も多い。このように定常状態に到達すると仮定できる場合は定常状態を規定する制約条件を記述することで、曖昧さを減らすことができる。

2-4 推論

この節では新しい推論方式が行なう推論の概要を述べる。推論は基本的に局所的知識に基づいて部品ごとに行なわれる。部品ごとに部品内部のパラメータを決定し、次々に隣りの部品の状態を決定していく。部品の内部のパラメータの値はパラメータ間の制約条件に基づいて決定される。この際因果指定を利用して、隣接する部品の値を参照または決定する。

大域的知識は局所的推論によってパラメータの値が決定されたときに参照される。もし局所的に値が決定されたパラメータが大域的制約式に含まれるのであれば、大域的制約式を用いて他の部品に含まれるパラメータの値を決定する。

推論の際に用いられるワークスペースの内容は以下のようなものである。

全パラメータ(名前)と値の組

パラメータ名	名前(部品名+パラメータ名) pump:press-out
値	[0]、[+]、[-]
値の個数	$n > 0$
値の集合	{}, {0}, {+}, {-}, {0,+}, {0,-}, {+,-}, {0,+,-}

推論はひとつの異常徴候から故障仮説を生成する遡行推論と、故障仮説からその他の異常徴候を生成する順行推論の2つがある。それぞれについて推論の概要を以下に示す。

● 遡行(R)

遡行推論は一つの異常徴候からその原因である故障を推論する。その推論は原因から結果への因果の流れを遡って進む。遡行推論は3つのステップで進められる。まず徴候をパラメータの異常値に変換する(ステップR1)。次にその異常値からすべての部品のパラメータを決定する(ステップR2)。最後に推論した全部品の状態から故障仮説を生成する(ステップR3)。以下、ステップごとに動作を説明する。

(R1) 異常徴候から初期状態を作る。

一つの異常徴候をパラメータの異常値に変換する。これは故障に関する知識で行なわれる。例えば、徴候の 温度センサ12:高 は パラメータの異常値 pump:Tout [+] に変換される。

(R2) 部品での遡行推論

一つの部品の状態の推論は4つのフェイズから構成される。

フェイズ1: となりの部品からの伝播

このフェイズでは ^CEX パラメータ の値を回りの部品からとってくる。ここで ^CEX パラメータ は 外部 かつ 結果 かつ 原因ではないパラメータである。^CEX パラメータの値は、所属するポートの接続相手の部品のパラメータの値に一致する。この相手が推論済みである場合はその値であり、未推論である場合はすべての値とする。

フェイズ2: 部品内でのパラメータの決定

このフェイズでは結果パラメータから原因パラメータの推定値を生成する。結果パラメータはフェイズ1で決定しているから、原因パラメータにすべての定性値を割り当てて、条件に適合する組だけを残す。

フェイズ3: まわりの部品との矛盾チェック

推論した原因パラメータが隣りの既に推論済みのパラメータの値と矛盾しないか、チェックする。推論した原因パラメータを p_1 とし、対応する他の部品での推論済みのパラメータを p_2 とするとき、

1. p_2 が E である場合

p_1, p_2 の値の集合の積集合に含まれるものだけを残す。

2. p_2 が \bar{E} である

E, \bar{E} は一致しなくてもよいので、なにもしない。

フェイズ4: 次に推論する部品の選択

継っている部品のうち、まだ推論していないもののいづれかを選択する。自分のまわりが全部終わっている場合は戻る。全部の部品に関して推論すると、推論は終了する。

(R3)故障仮説の生成

部品の機能とする制約条件に含まれる結果パラメータ(複数)を機能パラメータと呼ぶ。

ある部品の機能パラメータが異常値である際に、その部品の原因パラメータがすべて正常であれば、その部品は故障している。(制約条件が成り立たなくなる故障)原因パラメータが異常値である場合、そのパラメータが外因パラメータであればその部品は故障している。(外因パラメータの異常。故障箇所がその部品である)外因パラメータでなければ、その異常値は他の部品の故障の影響を受けたものと思われるので、この部品は故障ではない。

以上のように、ある部品の機能とする制約条件に含まれる結果パラメータが異常であり、かつ原因パラメータがすべて正常であるか、または外因パラメータだけが異常値である場合に、その部品の故障仮説が生成される。

● 順行推論 (P)

順行推論は一つの故障原因から発生する異常徴候を推論する。その推論は原因から結果への因果の流れを沿って進む。順行推論は3つのステップで進められる。まず故障原因から故障している部品のパラメータの値を決定する(ステップP1)。次にその異常

値からすべての部品のパラメータを決定する(ステップP2)。最後に推論した全部品の状態から異常徴候を生成する(ステップR3)。以下、ステップごとに動作を説明する。

(P1)初期状態の生成

故障している部品と故障原因から故障している部品のパラメータを決定する。外因パラメータを異常値に設定するか、または故障原因(故障モード)の指定に従って異常値を設定する。

(P2)部品での順行推論

一つの部品の状態の推論は4つのフェイズから構成される。

フェイズ1: となりの部品からの伝播

このフェイズでは C^{EX} パラメータ の値を回りの部品からとってくる。ここで C^{EX} パラメータ は 外部かつ原因かつ結果ではないパラメータである。C^{EX} パラメータの値は、所属するポートの接続相手の部品のパラメータの値に一致する。この相手が推論済みである場合はその値であり、未推論である場合はすべての値とする。

フェイズ2: 部品内でのパラメータの決定

このフェイズでは原因パラメータから結果パラメータの推定値を生成する。原因パラメータはフェイズ1で決定しているから、結果パラメータにすべての定性値を割り当てて、条件に適合する組だけを残す。

フェイズ3: まわりの部品との矛盾チェック

推論した結果パラメータが隣りの既に推論済みのパラメータの値と矛盾しないか、チェックする。推論した結果パラメータをp1とし、対応する他の部品での推論済みのパラメータをp2とするとき、

1. p2 が C である場合
p1, p2 の値の集合の積集合に含まれるものだけを残す。
2. p2 が \bar{C} である
E, E は一致しなくてもよいので、なにもしない。

フェイズ4: 次に推論する部品の選択

続けている部品のうち、まだ推論していないもののいずれかを選択して、フェイズ1へ行く。自分のまわりが全部終わっている場合は戻る。全部の部品に関して推論すると、推論は終了する。

(P3)異常徴候の生成

パラメータの異常値を異常徴候に変換する。例えば、pump:Tout [+] -> Sensor12 on と変換する。

2-5 常陽の機器のモデル

2-2節で述べた部品の知識の記述様式に沿って、常陽の冷却システムで用いられる機器のモデルを構築した。圧力のバランスを記述できるようにパイプなどにおける圧力損失を考慮し、流量を一定にコントロールするポンプの振舞いもモデル化した。

以下に各機器のモデルの概要を示す。各機器は複数箇所で用いられているので接続関係は一例である。複雑なものに関しては説明をつけた。この説明は知識ではない。

1. 原子炉 (REACTOR)

ポート	in: 冷却材入口		
	out: 冷却材出口		
接続	in from pipe1C2:out		
	out to pipe1H:in		
パラメータ	symbol--name--	Ccode--	port--
	flow 冷却材流量	C^E	in, out
	tin 冷却材入口温度	C^E	in
	tout 冷却材出口温度	^CE	out
	pin 冷却材入口圧力	C^E	in
	pout 冷却材出口圧力	^CE	out
	Q 発熱量	C^E, X0	-
制約式	Q = flow(tout-tin)		
	flow = H(pin-pout)		
異常	Q [+], [-]		
故障	原子炉の異常発熱 Q [+]		
	原子炉の出力低下 Q [-]		
故障の知識	X0 のパラメータの異常は故障である。		

2. ポンプ(PUMP)

ポート

in 流体入口
out 流体出口
pin 電源口

接続

in from pipe1C1:out
out to pipe1C2:in
pin from OUT-OF-SYSTEM。

パラメータ:

symbol	--name--	Ccode	-- port--
power	電力	CE	pin
flow	流量	C^E	in, out
pin	入口圧力	C^E	in
pout	出口圧力	^CE	out
dp	圧力差	C^E	-
n	回転数	C^E	-
T	トルク	^CE	-
Tp	出力トルク	^CE	-
Tf	内部トルク	C^E	-
ap	ループの総圧損	C^E	GLOBAL

制約式:

$n * T_p = flow * dp$
 $dp = ap$
 $n * T = power$
 $T = T_p + T_f$
 $dp = pout - pin$
 $n = const$
 $flow = const(\text{コントローラの出カ})$

説明:

回転数は一定。

電力を与えられてトルクがかかっているシャフトを回す。

トルクは流量と回路の総圧損(負荷)に比例する。

流量を一定にするコントローラがついていることがある。

その場合、流量一定。

総負荷が増えた場合、流量が一定になるように電力が増大す

る。

トルクには実際に働くトルクと内部損失のトルクからなる。

ポンプの圧力差は総圧損である。

故障の知識:

1. power[-]

外部電源の異常

2. flow [-]

外部のコントローラ異常

3. Tf [+]

なにか詰まった。

4. パイプと一緒に

式はoverride。

3. 熱交換器(HX)

ポート

in1: 一次側入口

out1: 一次側出口

in2: 二次側入口

out2: 二次側出口

接続

in1 from pipe1H:out

out1 to pipe1C1:in

in2 from pipe2C2:out

out2 to pipe2H:in

パラメータ

symbol	--name--	Ccode	-- port--
t1in	一次側入口温度	C^E	in1
t1out	一次側出口温度	^CE	out1
t2in	二次側入口温度	C^E	in2
t2out	二次側出口温度	^CE	out2
w1	一次側流量	C^E	in1, out1
w2	二次側流量	C^E	in2, out2
plin	一次側入口圧力	CE	in1
plout	一次側出口圧力	CE	out1
p2in	二次側入口圧力	CE	in2
p2out	二次側出口圧力	CE	out2
H	伝熱係数	C^E	-

定量制約式:

$$Q = w1*(t1in-t1out)$$

$$Q = w2*(t2in-t2out)$$

$$Q = k*H*((t1in+t1out)/2 - (t2in+t2out)/2)$$

$$w1 = plout - plin$$

$$w2 = p2out - p2in$$

$$H = \text{const}$$

異常:

1. H [-]

2. w1out < w1in

w2out < w2in

or、w1 に関する知識が成り立たない。

故障:

1. 伝熱管汚れ

2. 配管破損

故障の知識:

1. H は const。

2. パイプ

4. パイプ(PIPE)

ポート	in: 入口 out: 出口																		
接続	in from rx:out out to ihxl:inl																		
パラメータ	<table border="0"> <thead> <tr> <th>symbol--name--</th> <th>Ccode--</th> <th>port--</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>flow 流量</td> <td>CE</td> <td>in,out</td> </tr> <tr> <td>pin 入口圧力</td> <td>CE</td> <td>in</td> </tr> <tr> <td>pout 出口圧力</td> <td>CE</td> <td>out</td> </tr> <tr> <td>tin 入口温度</td> <td>C^E</td> <td>in</td> </tr> <tr> <td>tout 出口温度</td> <td>^CE</td> <td>out</td> </tr> </tbody> </table>	symbol--name--	Ccode--	port--	flow 流量	CE	in,out	pin 入口圧力	CE	in	pout 出口圧力	CE	out	tin 入口温度	C^E	in	tout 出口温度	^CE	out
symbol--name--	Ccode--	port--																	
flow 流量	CE	in,out																	
pin 入口圧力	CE	in																	
pout 出口圧力	CE	out																	
tin 入口温度	C^E	in																	
tout 出口温度	^CE	out																	
制約式:	$flow = k(pin-pout)$ $flowout = flowin$ $tout = tin$																		
異常:	1. $flow = k(pin-pout)$ が成り立たない。 2. $tout \neq tin$																		
故障原因:	1. 破損																		

5. 弁(バルブ:VALVE)

ポート	in: 入口 out: 出口																																				
接続	in from rx:out out to ihxl:inl																																				
パラメータ	<table border="0"> <thead> <tr> <th>symbol--name--</th> <th>Ccode--</th> <th>port--</th> <th>remarks--</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>flowIn 入口流量</td> <td>C^E</td> <td>in</td> <td></td> </tr> <tr> <td>flowOut 出口流量</td> <td>^CE</td> <td>out</td> <td></td> </tr> <tr> <td>pin 入口圧力</td> <td>CE</td> <td>in</td> <td></td> </tr> <tr> <td>pout 出口圧力</td> <td>CE</td> <td>out</td> <td></td> </tr> <tr> <td>dp 圧力差</td> <td>^CE^X</td> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>tin 入口温度</td> <td>C^E</td> <td>in</td> <td></td> </tr> <tr> <td>tout 出口温度</td> <td>^CE</td> <td>out</td> <td></td> </tr> <tr> <td>R 開度</td> <td>C^E^X0</td> <td>-</td> <td>+が開ける方向。-</td> </tr> </tbody> </table>	symbol--name--	Ccode--	port--	remarks--	flowIn 入口流量	C^E	in		flowOut 出口流量	^CE	out		pin 入口圧力	CE	in		pout 出口圧力	CE	out		dp 圧力差	^CE^X	-		tin 入口温度	C^E	in		tout 出口温度	^CE	out		R 開度	C^E^X0	-	+が開ける方向。-
symbol--name--	Ccode--	port--	remarks--																																		
flowIn 入口流量	C^E	in																																			
flowOut 出口流量	^CE	out																																			
pin 入口圧力	CE	in																																			
pout 出口圧力	CE	out																																			
dp 圧力差	^CE^X	-																																			
tin 入口温度	C^E	in																																			
tout 出口温度	^CE	out																																			
R 開度	C^E^X0	-	+が開ける方向。-																																		

で閉まる

制約式:	$dp = pin-pout$ $flowIn = flowOut$ $dp = (-R)*flow$
説明:	開度R が -. 閉まったとき。 $dp +.$ $flowOut -.$ $flowIn$ 0 との差が生じる。 in 側に液が溜まる。

ポンプが流量一定：流量 0. (電力+)

ポンプで電力0 で流量 -。

$flowIn = flowOut = [-]$

flow [+], R[0] \rightarrow dp [+]

故障：

1. 開度低 R -

2. 開度高 R +

さらに 2 - 3 節で述べたように、上記の機器で構成される系の大域的知識を抽出した。

(1) 圧力バランスに関する知識

流体をポンプで駆動している場合、ポンプの出力する圧力はポンプが駆動する負荷の総圧損に等しい。この性質は上記の系の場合、ポンプの局所的知識として、

(ポンプの入口圧と出口圧の差) = (負荷の総圧損)

さらに大域的知識として、

(負荷の総圧損) = (RX での圧損) + (IHX での圧損) + (パイプでの圧損)

という制約式で記述される。

(2) 熱平衡による定常状態に関する知識

熱は十分な時間が立てば必ず平衡に達し、平衡に達したものの温度は一定になる。上記の冷却系の場合、冷却ループの温度が一定になる。したがってループの両側で熱交換器によって交換される熱量は等しくなる。このことを大域的知識として、

(RX から一次系ループに伝播される熱量)

= (一次系ループから二次系ループに伝播される熱量)

= (二次系ループから大気雰囲気へ伝播される熱量)

を記述する。

2 - 6 推論結果

前出の「常陽」冷却系のモデルから、圧力についての知識を取り除いたものを対象として前述の推論方式の評価を行なった。以下に机上でのシミュレーションに基づく外因パラメータの異常値からの順行推論の例を示す。

IHX熱伝達率低下

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	+	+	+	○	○	○	○	○	○

AC熱伝達率低下

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	+	+	+	+	+	+	+	○	○

大気温上昇

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

空気流量減少

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	+	+	+	+	+	+	+	+	○

一次系流量減少

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	-	+	-	○	○	○	○	○	○

二次系流量減少

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
○	○	○	○	+	-	+	-	○	○
+	+	+	+	+	-	+	-	○	○
-	-	-	-	+	-	+	-	○	○

原子炉発熱量増加

Trxh	Trxc	Tihx1h	Tihx1c	Tihx2h	Tihx2c	Tac2h	Tac2c	Taout	Tatm
+	?	+	?	+	?	+	?	+	○

順行推論の結果、二次系流量減少と原子炉発熱量増加という2つの外因からの推論結果に曖昧さが発生した。曖昧さ発生の原因と解決策については5章で検討する。

第3章 定性連立方程式による手法

3-1 原子力プラントに適用する定性推論手法が満たすべき条件

第1章で述べた、2変数間の変化伝播知識に基づく定性推論が有する問題点を、定性連立方程式の応用という観点から、以下に整理する。

3-1-1 : 対象モデルの構築法

1で述べた知識コンパイラは、元になる知識の記述が簡潔・容易で、診断ルールの生成過程も、推論木の規模の問題を別にすれば人間にとって理解が容易で、現実的で強力な手法である。しかし、これを図1-(1)のモデルに適用すると、例えば次の問題が生じる。

順行推論では、仮定した原因候補に対し、導かれる対象システムの状態は一意的に定まるべきである。ところが、今仮に「1次主循環流量 低」という事象が、1次コールドレグ温度へ及ぼす影響をこの手法で導くと、次のような矛盾を生じる。

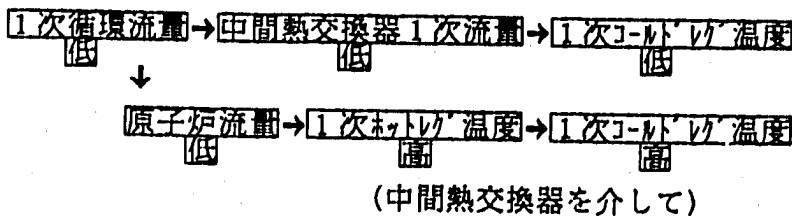


図3-(1) 2変数間変化伝播に基づく推論での矛盾発生例

これは、個々の推論の枝が誤っているのではなく、用意した局所伝播知識からは、中間熱交換器において「1次入口温度は高いが、1次側の流量は低いので、1次出口温度の定性値は決定できない。」のである。即ち、あるパラメータの定性値を、これに影響を与える他の1個のパラメータの定性値のみで決定しようとする事に問題がある。

中間熱交換器においては、1次出口温度、2次出口温度が従属パラメータであり、それぞれ1次、2次の流量及び入口温度の4個の独立パラメータから影響を受ける。従って、正常状態の近傍で線形化した次式を考える。

$$\Delta 1次出口温度 = k_1 \cdot \Delta 1次流量 + k_2 \cdot \Delta 2次流量 + k_3 \cdot \Delta 1次入口温度 + k_4 \cdot \Delta 2次入口温度$$

$$\Delta 2次出口温度 = k_5 \cdot \Delta 1次流量 + k_6 \cdot \Delta 2次流量 + k_7 \cdot \Delta 1次入口温度 + k_8 \cdot \Delta 2次入口温度$$

4個の独立パラメータから2個の従属パラメータへの定性的変化伝播知識とは、以下のK1~K8の符号の情報である。

係数	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8
符号	+	-	+	+	+	-	+	+

従って、例えば、この知識から、1次出口温度の定性値が正であると決定できるのは、以下の場合のみである。

(1次流量が[+]or[0])and(2次流量が[-]or[0])

and(1次入口温度が[+]or[0])and(2次入口温度が[+]or[0])

このように、ある従属パラメータの定性値を評価する際には、これに直接影響する全ての独立パラメータの定性値を考慮して、定性的な知識と矛盾を生じる定性値の組合せのみを否定する推論機構が必要である。

ところが、定性的な知識と矛盾を生じない定性値の組合せ全てを解として求めると、独立パラメータの特定の定性値の組合せに対して、従属パラメータの定性値の組合せが一意的に得られない場合がある。その例を、2年度に研究の対象とした図1-(1)のモデルについて説明する。

このモデルの各部品について、物理量の変化の伝播関係即ち、ある独立変数の変化に対して、これで引き起こされる他の変数の変化の正逆、及び定常時に成立する式、を以下に説明する。なお、以下の文中で用いる記号の意味は次の通りである。

Q:原子炉発熱量

W1:1次循環流量

W2:2次循環流量

Wa:空気流量

T1h:1次コールドレグ温度

T1c:1次コールドレグ温度

T2h:2次コールドレグ温度

T2c:2次コールドレグ温度

Taout:空気出口温度

Tatm:大気雰囲気温度

Ri:中間熱交換器伝熱抵抗

Ra:空気冷却器伝熱抵抗

各部品における物理量の変化の伝播関係を表3-(1)に示す。これらの表で、+は変化の伝播が正、-は逆である事を示す。

原子炉

中間熱交換器

空気冷却器

結果 原因	T1h へ
Qから	+
T1cから	+
W1から	-

結果 原因	T1c へ	T2h へ
T1hから	+	+
W1から	+	+
T2cから	+	+
W2から	-	-
Riから	+	-

結果 原因	T2c へ	Taout へ
T2hから	+	+
W2から	+	+
Tatmから	+	+
Waから	-	-
Raから	+	-

表3-(1) 2変数間の変化伝播と部品間接続による順行推論

上の表に示した知識のみによって、各独立変数がそれぞれ一個のみ正であるという情報に対して、従属パラメータの定性値に関する推論結果をまとめたものを以下の表3-(2)に示す。この表では、原因パラメータの各々が1個のみ正の定性値を有した時の、各結果パラメータの定性値を示している。定性値が定まらないパラメータについては?を記している。

原因	結果	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout
Qから		+	+	+	+	+
W1から		?	?	?	?	?
Riから		?	?	?	?	?
W2から		?	?	?	?	?
Raから		?	?	?	?	+
Waから		-	-	-	-	-
Tatmから		+	+	+	+	+

表3-(2) 2変数間変化伝播に基づく推論の結果

この表から、定性的な変化伝播知識では、系全体にわたる事象を推論するためには不十分な事がわかる。ここで、後の議論のために、表3-(1)に示された知識を、下に定性連立方程式として表しておく。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa
1	-	+				+	-					
2	+	-		+			+	+	-			
3	+		-	+			+	-	-			
4			+	-					+	+	+	-
5			+		-				+	-	+	-

表3-(3) 定性連立方程式として表した、変化伝播に関する定性的知識

しかしながら、定性的な知識としては、変化の伝播に関するもの以外に、パラメータ間の定性的な拘束条件として認識されているものがある。これを以下に示す。

中間熱交換器及び空気冷却器に、伝熱量Q、1次、2次冷却系及び空気側の代表温度という概念を導入して定常時に成立する、次の式6~9から新たな定性式を生成する事ができる。即ち、中間熱交換器において、「1次ホットレグ温度と1次コールドレグ温度の正の重み係数付き平均値と、2次ホットレグ温度と2次コールドレグ温度の正の重み係数付き平均値の差を伝熱抵抗で割ったものが伝熱量である」という関係を式に表すと、

$$(k_{1h} \cdot T1h + k_{1c} \cdot T1c) - (k_{2h} \cdot T2h + k_{2c} \cdot T2c) - Q/Ri = 0$$

同様に空気冷却器においても、次式が成立する。

$$(k_{ah} \cdot T2h + k_{ac} \cdot T2c) - (k_{at} \cdot Taout + k_{atm} \cdot Tatm) - Q/Ra = 0$$

また、式2、4の代りに、「流量とホットレグ-コールドレグ間の温度差の積が原子炉発熱量に等しい」事を式に表すと、

$$Q - W2 \cdot (T2h - T2c) = 0$$

$$Q - Wa \cdot (Taout - Tatm) = 0$$

これらの関係を定性化すると以下の表が得られる。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa
6			-	+		+			-			
7	+	+	-	-		-		+				
8					-	+					+	-
9			+	+	-	-				+	-	

表3-(4) 新たに付加する定性連立方程式

図1-(1)のモデルについて、独立パラメータから従属パラメータへの影響の伝播の方向を求めた結果を表3-(5)に示す。なお、表中A, B, Cはそれぞれ、定性式1~5、定性式1及び6~9、定性式1~9を用いた結果である。

独立変数	従属変数			T1h			T1c			T2h			T2c			Taout		
	用いたマトリックス			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Q	?	?	+	?	?	+	?	?	+	?	?	+	?	?	+	?	?	+
W1	?	-	-	?	+	+	?	0	0	?	0	0	?	0	0	?	0	0
Ri	?	-	-	?	-	-	?	0	0	?	0	0	?	0	0	?	0	0
W2	?	?	?	?	?	?	?	-	-	?	+	+	?	+	+	?	0	0
Ra	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	0	0
Wa	?	-	-	?	-	-	?	-	-	?	-	-	?	-	-	?	-	-
Tatm	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+

表3-(5) : 定性連立方程式による順行推論

(注：?は定性値が一意的に定まらない事を示す。)

この表から、パラメータ間の伝播に関する知識以外の、定性的な拘束条件をも加えると、定性推論の有効性が高まる場合があるので、原子力プラントの異常診断知識生成用の定性推論機構には、このような、伝播に関するもの以外の定性知識をも取り扱う機能が必要である。

3-2 平衡状態に関する定性的知識からの推論の妥当性

A) 時間微分項を無視する事の妥当性

現在一般に定性推論と呼ばれている推論手法には、対象の系の時間変化を考慮にいれたもの、つまり変数の時間微分項をも定性化して、系全体の動的挙動までも推論の対象とするものが多い。これに対して、本研究では対象の系の、定常状態としての異常に関する診断のみを扱っている。この手法の正当性をここで考慮する必要がある。

次の、バネで支えられた質点の例を考える。

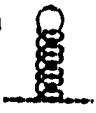
質量: m  質点の位置: x (ばね自然長の状態を0として上向きにとる)
ばね定数: k

図3-(2) ばね-質点系のモデル

この質点の運動は次の方程式で記述される:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -kx - mg \quad (\text{但し } g \text{ は重力加速度})$$

時間微分項を無視、即ち左辺を0とした解は、 $x = -mg/k$

この解は、 $x = (x_{max} + mg/k) \cos(\sqrt{k/m}t) - mg/k$

質点が静止している状態から、ばね定数が突然減少した場合を考えると、

定常の式では質点が下降するという結論が導かれるが、時間微分項を考慮した式によれば、質点は振動し続けるという結論が導かれる。

実際の現象では、僅かながら質点の運動速度に比例した抵抗が働くので、支配方程式は次のようになる。

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -kx - mg - c \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{但し } g \text{ は重力加速度})$$

この解は、

1) $C^2 - 4mk > 0$ の場合

$$\frac{x + mg/k}{x_{max} + mg/k} = \frac{-\beta}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} + \frac{\alpha}{\alpha - \beta} e^{\beta t}$$

$$\text{但し、} \alpha = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}, \quad \beta = \frac{-c - \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

2) $C^2 - 4mk \leq 0$ の場合

$$\frac{x + mg/k}{x_{max} + mg/k} = e^{\frac{-c}{2m}t} \cos(\sqrt{k/m - c^2/4m^2}t)$$

これは、 $c > \sqrt{4mk}$ の時は単調に、そうでなければ振動しながら、質点が次第に平衡位置 $-mg/k$ に達する事を示している。

つまり、新たな平衡点を、時間微分項を無視した式から導くことは、この振動の減衰を前提としていることになる。従って、減衰の時定数が人間の知覚に比して十分短く、新たな平衡に短時間に達するような現象に対してこの前提は妥当性を有する。

本研究で対象とする原子炉冷却系については、熱流力学的な外乱で生じる振動は、振動的な振るまいをすることは、経験から少ないと言える。あるパラメータが正常値から一方向へ偏位している現象については、その現象の時定数が短い場合は、この手法で十分に推論が可能であり、また時定数が長い場合には、その時定数と同オーダーの時間に亘る観測結果から推論を行えば、その結果は妥当性を有する。

B) モデルの限界

対象の系が、外乱によって、正常な状態と異なる新たな平衡状態に達するまでに、正常な状態に対して構築されたモデルの限界を逸脱する場合がある。

例えば、上に挙げたばね-質点系においては、質点の直下に、比重が質点に比べて非常に大きい液体の表面があった場合が考えられる。この場合には、現在の平衡状態に、ばね定数が低下するという外乱が加えられても、液面への接触により、質点の位置の降下は、無視しうる程度にしかならない。

定性推論に限らず、計算機上に構築されたモデルに基づく対象の系の挙動の推論においては、その結果は、モデル構築において使用された仮定が有効な範囲でのみ妥当性を有する。

本研究で対象とする原子炉冷却系に関して、このような、モデル構築に組込まれた仮定を否定するような事象としては、冷却材の逆流を生じるようなポンプ駆動力の極端なアンバランスや、冷却材の相変化を生じるような発熱量と冷却材流量のアンバランス等が考えられる。

しかし本研究の目的は、異常事象がこのように進展してしまう以前に、その初期段階において原因を同定して危険の増大を防止するための知識の導出であるので、正常状態の近傍に対して構築されたモデルを使用して推論を行なうことには意味がある。

以上、本研究で採用している定性推論の有効性について、A、B 2点について考察を行なった。さらに詳細に有効性を評価するためには、実際にソフトウェアを開発して異常診断知識の導出を行なう必要がある。

3-3 手法の考察に用いた原子炉冷却系モデル

以上のような考察に基づき、定性連立方程式による異常診断知識導出システムのプロトタイプを作成した。以下これについて説明する。

平成2年度においては、1ループの原子炉冷却系モデルを対象に、定性推論に基づく知識コンパイラの適用性を評価し、改良すべき点及び追加すべき機能を明確にした。平成3年度においては、その改良や機能追加の、より大規模な体系に対する有効性を評価するため、以下のような2ループモデルを対象に研究を行なった。

2系統ある2次冷却系ループのそれぞれは、平成2年度で対象としたモデルのものと同一であるが、1次主冷却系ループは、2系統のループそれぞれを循環する冷却材が原子炉容器で混合する点で平成2年度のモデルと異なる。また、1次主冷却系のA、B両ループのポンプの水頭は、相手側のループの流量にも影響を及ぼす。

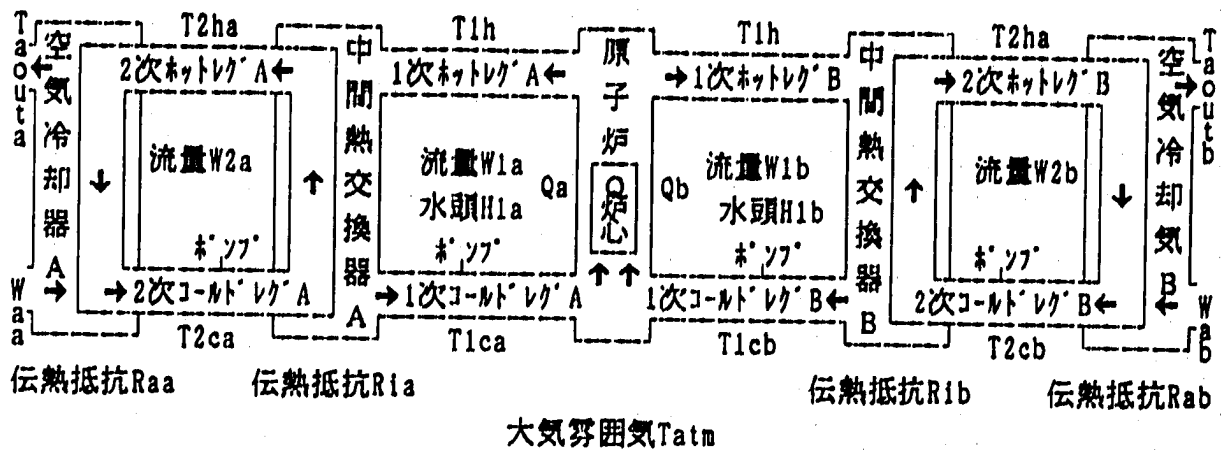


図3-(3) 原子炉冷却系2ループモデル

以下、このモデルの記述に用いる変数名と意味を示す。

1) モデル全体に共通なもの

Q : 原子炉発熱量 $T1h$: 1次系ホットレグ温度 $Tatm$: 大気雰囲気温度

2) A、Bループがそれぞれ有するもの

Q_a 、 Q_b : 1ループ当りの熱輸送量

$W1_a$ 、 $W1_b$: 1次主循環流量 $T1c_a$ 、 $T1c_b$: 1次コールドレグ温度 $H1_a$ 、 $H1_b$: 1次主循環ポンプ水頭

Ri_a 、 Ri_b : 中間熱交換器伝熱抵抗

$W2_a$ 、 $W2_b$: 2次主循環流量 $T2h_a$ 、 $T2h_b$: 2次ホットレグ温度 $T2c_a$ 、 $T2c_b$: 2次コールドレグ温度

Ra_a 、 Ra_b : 空気冷却器伝熱抵抗 Wa_a 、 Wa_b : 空気流量 $Taout_a$ 、 $Taout_b$: 空気冷却器出口温度

次に、このモデルの定常状態を記述する方程式を以下に示す。

方程式

$$Q - Q_a - Q_b = 0$$

Aループ

$$Q_a - W1_a (T1h - T1c_a) = 0$$

Bループ

$$Q_b - W1_b (T1h - T1c_b) = 0$$

$$H_{1a} - F_{1a} \cdot W_{1a}^2 - Fr \cdot (W_{1a} + W_{1b})^2 = 0$$

$$e^{\frac{1}{R_{1a} W_{1a}}} (T_{1ca} - T_{2ca}) - e^{\frac{1}{R_{1a} W_{2a}}} (T_{1h} - T_{2ha}) = 0$$

$$Q_a - W_{2a} (T_{2ha} - T_{2ca}) = 0$$

$$e^{\frac{1}{R_{2a} W_{2a}}} (T_{2ha} - T_{2outa}) - e^{\frac{1}{R_{2a} W_{1a}}} (T_{2ca} - T_{2im}) = 0$$

$$Q_a - W_{1a} (Taout_a - T_{2im}) = 0$$

$$H_{1b} - F_{1b} \cdot W_{1b}^2 - Fr \cdot (W_{1a} + W_{1b})^2 = 0$$

$$e^{\frac{1}{R_{1b} W_{1b}}} (T_{1cb} - T_{2cb}) - e^{\frac{1}{R_{1b} W_{2b}}} (T_{1h} - T_{2hb}) = 0$$

$$Q_b - W_{2b} (T_{2hb} - T_{2cb}) = 0$$

$$e^{\frac{1}{R_{2b} W_{2b}}} (T_{2hb} - T_{2outb}) - e^{\frac{1}{R_{2b} W_{1b}}} (T_{2cb} - T_{2im}) = 0$$

$$Q_b - W_{1b} (Taout_b - T_{2im}) = 0$$

(但し、 F_{1a} 、 F_{1b} 、 Fr はそれぞれ、Aループ原子炉出口-原子炉入口、B原子炉出口-原子炉入口、原子炉入口-原子炉出口の圧力損失係数を表す。)

このモデルにおける従属変数は、 T_{1h} 、 Q_a 、 T_{1c} 、 W_{1a} 、 T_{2h} 、 T_{2c} 、 $Taout_a$ 、 Q_b 、 T_{1c} 、 W_{1b} 、 T_{2h} 、 T_{2c} 、 $Taout_b$ であるが、この内、 Q_a 、 Q_b は可観測ではないので、異常診断知識には用いることができない。

一方、独立変数は、 Q 、 T_{atm} 、 Fr 、 F_{1a} 、 H_{1a} 、 R_{1a} 、 W_{2a} 、 R_{2a} 、 W_{1a} 、 F_{1b} 、 H_{1b} 、 R_{1b} 、 W_{2b} 、 R_{2b} 、 W_{1b} である。

3-4 定性連立方程式の解法

3-1において、系を構成する各部品内のパラメータ間変化伝播に関する定性的知識だけでは、系全体に渡る異常診断には十分でない場合があること、並びに人間にとって自然な定性的知識として、パラメータ間変化伝播に関するもの以外の拘束条件があり、これを用いる事でパラメータ間の変化伝播に関する曖昧さを大幅に減少できる事を示した。実際に計算機を用いて、既知の定性的知識全てを一括して取り扱うためには、定性連立方程式を効率良く解くアルゴリズムを構築する必要がある。

この手法は、未知数の定性値の組合せの中、矛盾する式が定性連立方程式中に無いものを全て解とする。従って、単純な背理法を適用すると、変数の数 n に対して、 3^n 個の定性解の組合せ全てについて与えられた定性連立方程式との矛盾の有無を調べる必要から、次の問題が生ずる。

①計算機負荷が変数の数に対して爆発的に増加する。

単純な背理法による計算時間を評価するに当たって、以下の仮定をする。

- a) 定性方程式が変数の数 n に比例して、 $1.5n$ 個存在する。
- b) 定性連立方程式の解が n 個ある。
- c) 解ではない定性値の組合せが矛盾を判定されるに要する定性方程式の数は、平均して、 $0.75n$ 個である。

以上の仮定に立てば、処理時間は、 $3^n * 0.75n$ となり、矛盾のチェック1回を 10^{-8} 秒で行なっても、30個の未知パラメータに関する問題を解くのに1400年以上かかる。

②不定な変数についての解の網羅的表示により、意味の把握が困難になる。

例えば、A, B, Cの3パラメータに関して、次の定性連立方程式があるとする。

- 1) $[+]A + [-]B + [+]C = [+]$
- 2) $[-]A + [+]B + [+]C = [-]$
- 3) $[+]A + [-]B = [+]$

この定性連立方程式と、 $(A=[+])$ or $(B=[-])$ は同値であるが、これを背理法で解くと、次の15通りの解が得られる。

変数名															
A	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	-	-	-
B	+	+	+	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-

表3-(6) $(A=[+])$ or $(B=[-])$ の定性値組合せへの展開

このような問題を解決するために考案した定性連立方程式の解法についてそのアルゴリズムの概要を以下に説明する。

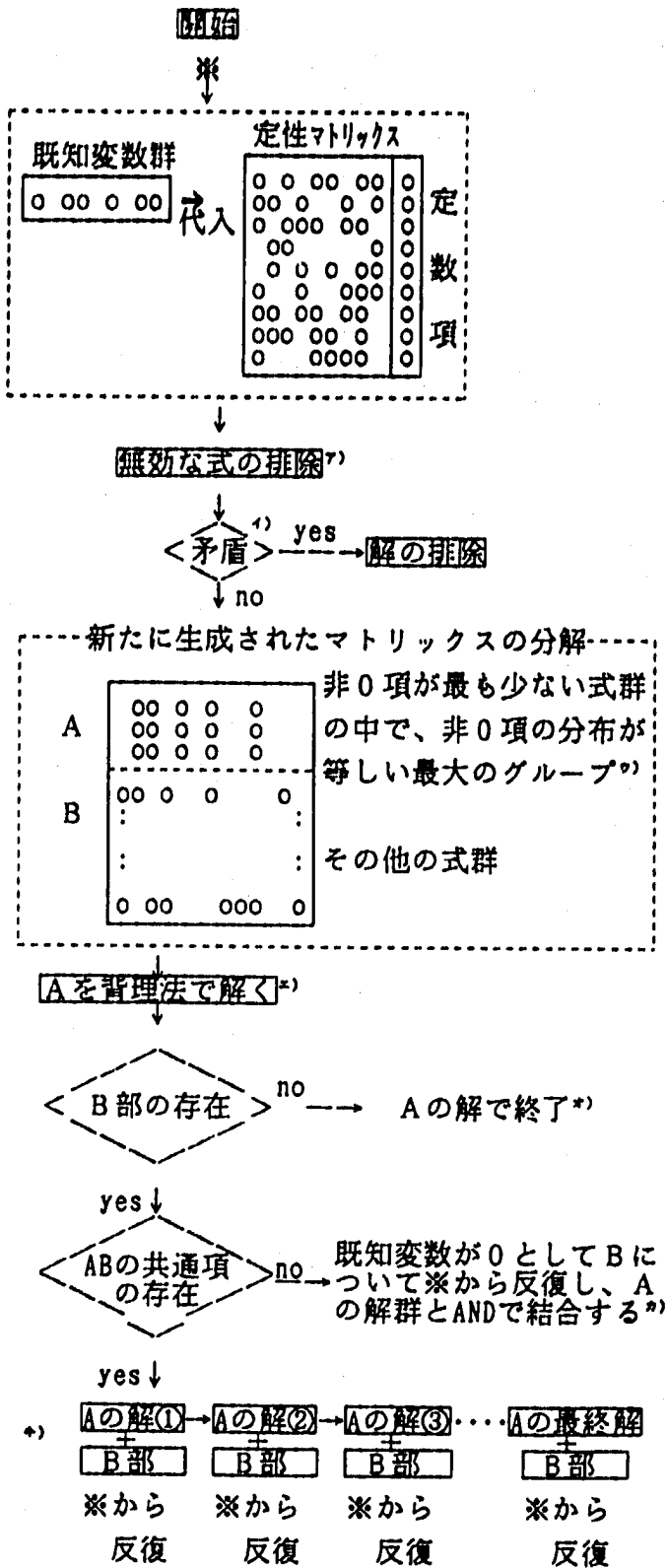


図3-(4)：定性連立方程式を解くアルゴリズム

以下、このアルゴリズムの7)～キ)について説明する。

7) 無効な式の排除

例えば、 $(+)X_1 + (-)X_2 + (+)X_3 = 0$ という式に、 $X_1=(+)$ 、 $X_2=(+)$ が代入されて、 X_3 の如何なる定性値もこの式と矛盾しなくなるような場合に、この式を排除する。

1) 矛盾

7)とは逆に、 $(+)X_1 + (-)X_2 + (+)X_3 = 0$ と $(+)X_1 + (-)X_2 + (-)X_3 = 0$ の2式に、 $X_1=(+)$ 、 $X_2=(-)$ が代入されて、 X_3 の如何なる定性値も矛盾を生じるような場合には、それまで仮定したパラメータの定性値の組合せを否定する。

なお、ア)とイ)は実際には並行して処理を行なう。また、この段階で、定数項が負のものは、後の処理を容易にするために、全ての項の符号を反転する。

ウ) 新たなマトリックスの分解

定性マトリックスを、局所解を残りの部分に代入・縮小する場合、解の絞り込みの効果の大きな局所マトリックスを選択する方法として、項の数が最少で、しかも項の分布が同じ式の数が最大のものをこの局所マトリックスとして選択する事とした。

1) Aを背理法で解く

このAは、ウ)からわかるように、非0項のみのマトリックスであり、対象パラメータの定性値の組合せ全てを順次生成し、A内の全ての定性式と矛盾しないものを解とする。

ウ) Aの解で終了

7)の無効な式の排除により、B部が存在しない場合は、残りの変数の定性値は全て不定として、定性解の見かけの数を減じて、より理解しやすい形で解を得る。

カ) 既知変数が無いものとして※から反復する

この場合は、この時点で解くべきマトリックスがA、B完全に独立になっているので、分離して解く。Aの解が n_A 、Bの解が n_B とすると、 $n_A * n_B$ 個の網羅的な解を、両者の解をANDで結合して見かけの解の個数は $n_A + n_B$ とする。

キ) Aの解各々とBを組合せて※から反復する

通常Aの解は複数存在するので、それぞれを既知変数群とみなしてBと組合せて新たな定性連立方程式として処理を進める。

単純な背理法に伴う問題点として、この小節の初めに、①過大な計算機負荷、②解の網羅的表示、の2点を挙げたが、このソルヴァーのアルゴリズム中、上のア)～キ)の各々がこのどちらに対処したものであるかを以下に示す。

アルゴリズムの箇所	7)	イ)	ウ)	エ)	オ)	カ)	キ)
背理法の	①	○	○	○	○		
問題点	②	○			○	○	

表3-(7) 解法各所の背理法への対処

以上の手法に基づいて定性連立方程式のソルヴァーを開発したが、これは、例えば限られた既知の情報から、考えられる事態を全て導出するといった時に有効だという観点から解の個数が多い場合への対応を考えたためである。

次に、この手法を3-2で述べた2ループ原子炉冷却系モデルに対する異常診断知識導出に適用した結果を述べる。

3-5 異常診断知識の導出に用いた定性知識

まず、モデル中の各構成部品内のパラメータ間の変化伝播を整理する。

局所伝播知識

A B両ループに共通なもの

定性式	意味
7) $Q = (Q_a +) (Q_b +)$	A B両ループによる熱輸送量の合計は炉心発熱量に等しい
4) $T_{1h} = (Q +) (W_{1a} -) (W_{1b} -) (T_{1ca} +) (T_{1cb} +)$	炉容器出口温度へは、炉心発熱量が正、また各ループの流入流量が負、入口温度が正に作用する。

各ループに適用されるもの

ウ) $W_{1a} = (H_{1a} +) (H_{1b} -)$	1次流量へは当該ループのポンプの水頭が正、他ループのポンプの水頭が負に作用する。
エ) $W_{1b} = (H_{1a} -) (H_{1b} +)$	
オ) $T_{1ca} = (T_{1h} +) (T_{2ca} +) (W_{1a} +) (W_{2a} -) (R_{1a} +)$	中間熱交換器の1次出口温度に対し、1次、2次入口温度、1次流量、中間熱交換器伝熱抵抗が正に、2次流量が負に作用する。
カ) $T_{1cb} = (T_{1h} +) (T_{2cb} +) (W_{1b} +) (W_{2b} -) (R_{1b} +)$	
キ) $T_{2ha} = (T_{1h} +) (T_{2ca} +) (W_{1a} +) (W_{2a} -) (R_{1a} -)$	中間熱交換器の2次出口温度に対し、1次、2次入口温度、1次流量が正に、2次流量、中間熱交換器伝熱抵抗が負に作用する。
ク) $T_{2hb} = (T_{1h} +) (T_{2cb} +) (W_{1b} +) (W_{2b} -) (R_{1b} -)$	
ケ) $T_{2ca} = (T_{2ha} +) (T_{atm} +) (W_{2a} +) (W_{aa} -) (R_{aa} +)$	空気冷却器のNa側出口温度に対し、Na流量、Na入口温度、大気温度、空気冷却器伝熱抵抗が正に、空気流量が負に作用する。
コ) $T_{2cb} = (T_{2hb} +) (T_{atm} +) (W_{2b} +) (W_{ab} -) (R_{ab} +)$	

$\varphi) Taouta = (T2ha +)(Tatm +)(W2a +)(Waa -)(Raa -)$ 空気冷却器の空気出口温度に対し、 Na
 $\psi) Taoutb = (T2hb +)(Tatm +)(W2b +)(Wab -)(Rab -)$ 流量、 Na 入口温度、大気温度が正に、
 空気冷却器伝熱抵抗、空気流量が負に
 作用する。

属所伝播知識以外の拘束条件

定性式

$\kappa) Qa = (W1a +)(T1h +)(T1ca -)$

$\epsilon) Qb = (W1b +)(T1h +)(T1cb -)$

意味

1 ループ当りの熱輸送量は、1 次循環流量と、炉容器出入口温度差の積に等しい。

$\nu) Qa = (T1h +)(T1ca +)(T2ha -)(T2ca -)(R1a -)$

$\xi) Qb = (T1h +)(T1cb +)(T2hb -)(T2cb -)(R1b -)$

1 ループ当りの熱輸送量は、1 次平均温度と 2 次平均温度の差に比例し、中間熱交換器伝熱抵抗に反比例する。

$\zeta) Qa = (W2a +)(T2ha +)(T2ca -)$

$\eta) Qb = (W2b +)(T2hb +)(T2cb -)$

1 ループ当りの熱輸送量は、2 次循環流量と、2 次系のホットレグ-コールドレグ間温度差の積に等しい

$\theta) Qa = (T2ha +)(T2ca +)(Taouta -)(Tatm -)(Raa -)$

$\iota) Qb = (T2hb +)(T2cb +)(Taoutb -)(Tatm -)(Rab -)$

1 ループ当りの熱輸送量は、2 次平均温度と、空気側平均温度の差に比例し、空気冷却器伝熱抵抗に反比例する。

$\kappa) Qa = (Waa +)(Taouta +)(Tatm -)$

$\lambda) Qb = (Wab +)(Taoutb +)(Tatm -)$

1 ループ当りの熱輸送量は、空気出口温度と大気雰囲気温度との差と、空気流量の積に等しい。

以上の定性知識を、全て、3-1 で述べたように、右辺が 0 の 1 次方程式の、係数の符号のみをとりだして構成した、定性マトリックスで表現すると、以下の表 3-(6) になる。

3-6 2ループ原子炉冷却系モデルに対して導出された異常診断知識

表3-(8)を連立定性方程式として作成したソルヴァーに与えて、独立パラメータ中各々1個のみが正、他は全て0という定性値の組合せに対して矛盾を生じない従属パラメータの定性値の組合せを求めた。その結果を表3-(9)に示す。

伝播元パラメータ	伝播先パラメータ	A ループ					B ループ							
		原子炉出口温度	熱輸送量	原子炉入口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度	2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度	熱輸送量	原子炉入口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度	2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度
原子炉発熱量		+	+	+	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+
大気雰囲気温度		+	?	+	0	+	+	+	?	+	0	+	+	+
A ループ	1次循環ポンプ水頭	?	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
	中間熱交換器伝熱抵抗	+	-	+	0	-	-	-	+	+	0	+	+	+
	2次循環流量	?	?	?	0	-	+	?	?	?	0	?	?	?
	空気冷却器伝熱抵抗	+	-	+	0	+	+	-	+	+	0	+	+	+
	空気冷却器空気流量	-	?	-	0	-	-	-	?	-	0	-	-	-
B ループ	1次循環ポンプ水頭	?	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
	中間熱交換器伝熱抵抗	+	+	+	0	+	+	+	-	+	0	-	-	-
	2次循環流量	?	?	?	0	?	?	?	?	?	0	-	+	?
	空気冷却器伝熱抵抗	+	+	+	0	+	+	+	-	+	0	+	+	-
	空気冷却器空気流量	-	?	-	0	-	-	-	?	-	0	-	-	-

表3-(9) 定性連立方程式で得たパラメータ間変化伝播の符号

このような表から、次のような診断知識を導くことができる
初期兆候：「原子炉Aループ入口温度 高」

B ループ 空気冷却器出口温度	A ループ 空気冷却器出口温度	原子炉発熱量 高		原子炉発熱量 高	
		高	低	A ループ 空気流量	B ループ 空気流量
高	高			高	低
	低	Aループ 2次系ホットレグ orコールドレグ温度	低	高	高
低	低			高	低
	高	Bループ 2次系ホットレグ orコールドレグ温度	低	高	高

初期兆候：「原子炉出口温度 高」

A ループ空気冷却器出口温度	高	B ループ空気冷却器出口温度	高	原子炉発熱量 高 原子炉温度 高 A ループ空気流量 低 B ループ空気流量 低
		低	B ループ2次系 ホットレグ温度	低 高
低	A ループ2次系 ホットレグ温度	低	低	A ループ中間熱交換器伝熱抵抗 高
		高	高	A ループ空気冷却器伝熱抵抗 高

初期兆候：「A ループ2次ホットレグ温度 高」

A ループ2次コールドレグ温度	高	B ループ空気冷却器出口温度	高	原子炉発熱量 高 原子炉温度 高 A ループ空気流量 低 B ループ空気流量 低	
		低	低	A ループ空気冷却器伝熱抵抗 高	
低	B ループ空気冷却器出口温度	高	B ループ2次系 ホットレグ温度	低 高	B ループ中間熱交換器伝熱抵抗 高 B ループ空気冷却器伝熱抵抗 高
		低	A ループ原子炉入口温度	高 低	A ループ1次循環ポンプ水頭 高 B ループ1次循環ポンプ水頭 低 A ループ中間熱交換器伝熱抵抗 低*
低	低	低	低	A ループ2次主循環流量 低	

初期兆候：「A ループ2次コールドレグ温度 高」

A ループ2次コールドレグ温度	低	低	低	A ループ2次循環流量 高	
高	B ループ空気冷却器出口温度	高	A ループ空気冷却器出口温度	高 低	原子炉発熱量 高 原子炉温度 高 A ループ空気流量 低 B ループ空気流量 低 A ループ空気冷却器伝熱抵抗 高
		低	低	低	A ループ1次循環ポンプ水頭 高 B ループ1次循環ポンプ水頭 低 A ループ中間熱交換器伝熱抵抗 低*
高	子炉入口温度	低	A ループ原子炉入口温度	高 低	B ループ中間熱交換器伝熱抵抗 高 B ループ空気冷却器伝熱抵抗 高
		高	B ループ2次系 ホットレグ温度	低 高	B ループ中間熱交換器伝熱抵抗 高 B ループ空気冷却器伝熱抵抗 高

初期兆候：「A ループ空気冷却器出口温度 高」

B ループ 空気冷却器 出口温度	高	原子炉発熱量 高 炉気温度 高 A ループ空気流量 低 B ループ空気流量 低			
		炉B 入口温度 ループ 原子	高	低	B ループ中間熱交換器伝熱抵抗 高
	低		高	B ループ空気冷却器伝熱抵抗 高	
	低	炉A 入口温度 ループ 原子	高	高	A ループ1次循環ポンプ水頭 高 B ループ1次循環ポンプ水頭 低
			低	高	A ループ中間熱交換器伝熱抵抗 低*
		AN-7 2次系 ネット・コールド・レグ 温度	高	低	A ループ空気冷却器伝熱抵抗 低*
低			低	A ループ空気冷却器伝熱抵抗 低*	

以上の診断知識で、「伝熱抵抗 低*」は実際にはあり得ない原因事象である。平成2年度の研究では、機能が過剰に発揮される事象を扱う必要がある場合について述べたが、これは、「電池電圧高」等と同じく、あり得ない事象として推論結果から削除すべきものである。以上の各表は、表3-8)に記した定性連立方程式の解として得られたものをそのまま表したものである。

これらの診断知識の適用性を考慮すると、次の点が指摘される。

- ①以上の診断知識は、原因を同定するのに観測しなければならないパラメータの数の最大値を最少にすべく導出した診断ルールであるが、実際の使用にあたっては、このルールを運転員に提示するか、計算機化されたシステムに供与するか等の条件を考慮して最適な診断ルール生成法を採用する必要がある。例えば、最初の例のように、「原子炉Aループ入口温度 高」という兆候に対し、まずBループの空気冷却器出口温度を観測する、という診断知識は、運転員の経験からみれば不自然とも言える。また、運転員にとっては、同一のレコーダに記録されるパラメータの組合せや、冷却ループ間の対称性も診断に際しては重要な情報であるが、ここに導出された診断知識には反映されていない。一方、自動化された診断システムに組込む際には、このような事は問題にならず、原因の同定のために観測しなければならないパラメータが少なければ効率の良い診断知識として用いることができる。
- ②本研究で対象としたモデルの基である原子炉冷却系では、2次系のコールドレグ温度を一定とするように、空気冷却器の空気流量を制御している。ある箇所において温度の異常が観測された場合、運転員は、この制御系の故障を原因候補の1つとして診断を行なうが、以上で説明した診断知識の導出手法では、このような診断は行なえない。
- ③実際のプラントでは、パラメータによって、測定精度が異なる。本モデルの基となるプラントでは、空気流量、空気冷却器出口空気温度は正確に測定する事が困難であるので、診断の過程の初期で観測される事は稀である。診断ルールの生成においてこの事を考慮する必要がある。

第4章 新たに考案された推論手法に関する考察

4-1 制約式と因果指定に基づく推論方式の課題とその解決策の考察

3.3節では制約式と因果指定に基づいた定性推論方式を提案した。推論は状態を満たすパラメータの値を部品ごとに求め、部品の接続関係を参照して、矛盾するものを破棄する。この際に推論の枝の破棄を部品がパラメータを変更できるのかどうかというパラメータの因果指定を利用して行なうことで、部品の因果の面から見ても正しい推論結果を生成する。またパラメータの値をワークスペースで管理することで、昨年度指摘されたような推論矛盾は起こらなくなる。さらに大域的知識を記述することで曖昧さを減らすことができる。

この節では提案した推論方式の課題を整理し、その解決策を考察する。前章で述べたように常陽の冷却系を対象とした推論の結果では、原子炉発熱量増加からの推論と二次系流量減少からの推論で曖昧さが発生している。この曖昧さの原因と解消のための対策を考察する。さらに曖昧さを減らす大域的知識について考察を行なう。

(1) 原子炉発熱量増加という外乱からの推論について

原子炉発熱量増加という外乱からの推論で曖昧さが発生した理由を順行推論の過程を追いつながりながら分析する。外乱によって原子炉から単位時間当たり発生する熱量が増加しているので一次系ループのホットレグ温度が高くなる($T_{rxh}[+]$)。次に中間熱交換器に推論結果を伝播させる($T_{ihx1h}[+]$)。一次系入口温度から一次系→二次系と伝播する熱量を引いたものが一次系出口温度となる。現在ホットレグの熱量も伝播する熱量も定性的に $[+]$ であり、定性的演算によってコールドレグの持つ熱量を求めようとする

$$\begin{aligned} (\text{ホットレグ}) - (\text{伝播する熱量}) &= [+]-[+] \\ &= ? \end{aligned}$$

となる。つまり現在の中間熱交換器の記述からは、一次系入口温度 $[+]$ から出口温度を推論すると $[+]$, $[0]$, $[-]$ のどれでも制約式を満たし、出口温度が推論できない。これは入口温度が増加すると単位時間に二次系に伝達する熱量は、両端の温度に比例するため増加するので、入口温度の上昇が出口温度を上昇させるかどうか分からないためである。ところが、入口温度が増加するとき人間は直観的に出口温度が増加すると考えるし、また実際の現象においても出口温度は増加する。この現象はパラメータの定量的な関係に依存しないので、この曖昧さは定量情報の欠如に起因するものではない。

そこでこのような曖昧さをなくすための推論の手法のひとつとして、中間熱交換器の機能に関する知識「一次系ホットレグ温度と一次系→二次系と伝播する熱量の定性値が一致した場合、一次系コールドレグ温度の定性値は一次系ホットレグ温度の定性値と一致

する」を考えるという方法が考えられる。これによって曖昧さはなくなる。

また曖昧さの発生した推論過程を検討してみると、入口温度の増加による熱量の増加量が二次側に放出する熱量の増加量より大きいことが分かれば、出口温度が上昇することが推論できることが分かる。よってパラメータの変化量についての推論を行なうことができれば曖昧さを減らすことができると考えられる。例えば、流体が流れるパイプの両端で流体の分子が持つ熱量を考え、入口での熱量を p_1 、出口での熱量を p_2 とする。このとき、パイプの内部に熱源がないとすると、熱はなくならず熱源以外で増加しないので、 $p_1 > p_2$ であり、 p_1 の変化が p_2 の変化を起こす際には、変化量についても成り立つと考えられる。よって p_1 が $[+]$ に変化したことが p_2 に影響を及ぼし p_2 を $[+]$ に変化させた場合、 $p_1 - p_2 = p_3$ の p_3 は $[+]$ または $[0]$ であると推論することができる。このような熱量の変化量に関する知識は熱の性質に基づくものであり、十分汎用性があると考えられる。この例のような汎用性のある知識に基づいた変化量推論の手法を、我々の推論手法に融合させることを現在検討している。

(2) 二次系流量減少という外乱からの推論について

中間熱交換器と空気冷却機に関する推論の結果、二次系ホットレグ温度 $T_{ihx2h}[+]$ 二次系コールドレグ温度 $T_{ihx2c}[-]$ 。次に一次系ループについて推論する。一次系ループを表現するパラメータを制約する式に次の2つがある。

$$Q = H_{ihx} \{ (T_{ihx1h} + T_{ihx1c}) - (T_{ihx2h} + T_{ihx2c}) \} \dots (a)$$

$$Q = W_1 (T_{ihx1h} - T_{ihx1c}) \dots (b)$$

現在異常がおきている外因パラメータは W_2 でありそれ以外は正常なので (b) 式において外因パラメータ $Q[0], W_1[0]$ 。よって

$$(T_{ihx1h}, T_{ihx1c}) = (+, +) \text{ or } (0, 0) \text{ or } (-, -) \dots (c)$$

次に (a) 式を考えると、

$$\begin{aligned} T_{ihx2h} + T_{ihx2c} &= [+] + [-] \\ &= [?] \end{aligned}$$

であり、(c) の全ての解が (a) を満たす。これが曖昧さの原因である。

一方、空気冷却器で定常状態に関する制約条件を元に推論した結果、 $T_{ac2h}[+]$ と $T_{ac2c}[-]$ の和は $[0]$ であることがわかる。ここで、ループを構成しているパイプを温度降下を無視してモデル化すると、両端の温度は等しいことがいえる。したがって、中間熱交換器の二次系ループ側の入口温度 (T_{ihx2c}) と出口温度 (T_{ihx2h}) はそれぞれ空気冷却器の二次系ループ側の出口温度 (T_{ac2c}) と入口温度 (T_{ac2h}) に等しい。そのうえでパラメータ同士の和に関する推論結果を管理しておくと、 $T_{ac2h} + T_{ac2c} = [0]$ から $T_{ihx2h} + T_{ihx2c} = [0]$ を導くことができるので、(c) の推論結果が $(T_{ihx1h}, T_{ihx1c}) = (0, 0)$ と一意になる。

(3) 大域的知識の導出

提案する推論方式では曖昧さを減らすために大域的知識を記述している。例えばポンプの出力する圧力はポンプが駆動する負荷の総圧損に等しいことを大域的知識として記述する。このような知識は他にもあると考えられ、ドメインや対象の系の構造ごとに抽出を行わなければならない。

しかし、このような知識は流体や熱の性質と構造の形から導出することができる。例えば、圧力のバランスに関する知識は流体がなくならず、ちぢまないことと、流体がループを構成して循環していることから導出される。このような熱や流体の性質や、流体がループを構成して循環していることの影響は、部品ごとの局所的な知識では表現できない。したがって、流体や熱の性質を汎用な形で抽出し事前に集積し、診断対象の系の構造に適用することで、曖昧さを減らす大域的知識を導出できると考えられる。

この過程を知識コンパイラに与える深い知識の前処理と捉え、構造に関する知識と系の局所的な知識を入力として、大域的知識を埋め込んだ系の知識を出力する機構(構造コンパイラと呼ぶことにする)を知識コンパイラの前段階におくことで、対象モデル構築が容易になるであろう。

今後、このような曖昧さを減少させる知識を熱や流体の性質やループの構造の特性から抽出し、その定式化とそれを利用した推論について考察を進める。また、構造の特性を実際の系に適用する構造コンパイラについてもさらに考察を深めたい。

4-2 定性連立方程式による手法の課題とその解決策の考察

4-2-1 異常診断知識の導出に用いるための推論の制御

3-4で述べた定性連立方程式の解法は、パラメータ間の定性的な拘束条件を効率良く処理するには適しているが、例えば、「原子炉Aループ入口温度 高」という情報のみから推論を行なうと、基本的には、独立パラメータの定性値に関する全ての組合せを探索するので、膨大な数の定性解を導出し、診断知識としては不適當な情報しか得られない場合がある。具体的に説明すると、

「原子炉Aループ入口温度 高」に対して、1次Aループ流量、原子炉発熱量、雰囲気温度の3個の独立パラメータに関して得られるべき情報は、

「1次Aループ流量 低」or「原子炉発熱量 高」or「雰囲気温度 高」である。しかし、定性連立方程式の解としては、「1次Aループ流量 低」and「原子炉発熱量 高」and「雰囲気温度 高」という定性値の組合せを $[-, +, +]$ のように表すと、下図のように19個の組合せが導出される。

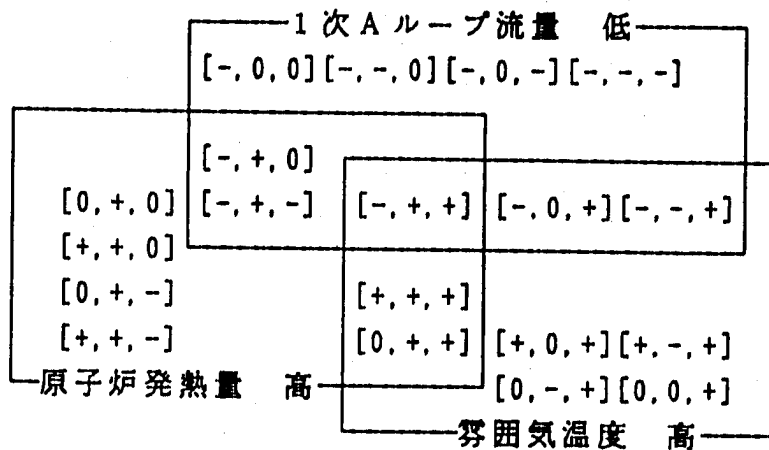


図 定性的知識と、定性連立方程式の解の関係

3-4の、定性連立方程式のアルゴリズム中、か)ではこの点を考慮しているが、上の19個の定性解を $[-, ?, ?]$ or $[?, +, ?]$ or $[?, ?, +]$ のように変換する機能は無い。

例えば、「Aループ1次主循環ポンプ水頭 高」という原因に対する順行推論を行なうと、 $W1a, W1b, Qa, Qb, Taouta, Taoutb, T2ha, T2hb, T2ca, T2cb$ の各パラメータの定性値を求めた後、 $T1cb, T1ca, T1h$ の3パラメータの定性値について、 $([-], [+], [-])$, $([-], [+], [0])$, $([-], [+], [+])$ の3通りを出力する。これは、 $T1cb = [-]$, $T1ca = [+]$, $T1h$ は不定、という形で出力される事が望ましい。

この問題点の1つとして考えられるのは、この手法が、平成2年度に評価の対象とした手法のように、因果に関する情報を利用できないことである。

実際的な異常診断知識にこの手法を適用するための1つの手段としては、定性連立方程式に最初に与える定性情報として、観測された従属パラメータの定性値に、独立パラメータ中1個を除いて他の定性値を0とした定性値列を加えたものを使用する事が考えられる。例えば、Aという従属パラメータとB, C, Dという独立パラメータで考えている系で、A[+]という兆候に対する推論を行なう場合、

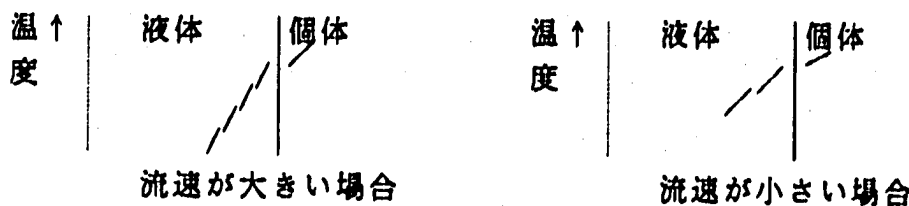
① A[+] B[?] C[0] D[0]、② A[+] B[0] C[?] D[0]、③ A[+] B[0] C[0] D[?]、のそれぞれを定性連立方程式に与えて推論を行なう手法である。

4-3 原子力プラントにおける事象と、その推論に必要な情報との関連に関する考察

平成2年度の研究で、原子炉冷却系の2次主循環流量の変化が1次主冷却系の温度へ及ぼす影響の符号について、定性的な知識のみでは導出が困難であることが指摘された。

これは、2つの熱交換器を循環する流量の変化が、原子炉と大気との総合的な熱伝達に対して相反する2つの影響を有し、その優劣が一意的に定められないからである。このような性質を有する機器をモデル化する場合、モデルの詳細度が高くなるに従って、定性的な情報のみでは影響の符号が決定できない事象が増加する事が考えられる。以下にこのような例を1つ挙げて考察する。

本研究における熱交換器のモデルでは、伝熱抵抗R (= 熱伝達率Hの逆数) は一定と仮定しているが、実際には、個体と液体の間の熱伝達率は、液体の個体に対する相対速度に影響される。



ここで言う熱伝達は、「通過時間が長いから受ける熱量が大きい」というのとは別の因子で、単位時間に単位重量の流量が個体壁と交換する熱量を、個体の平均温度と流体の平均温度との差で割ったものである。これは、壁面での流体の温度勾配に比例するので、上の図のように、流速が大きい程熱伝達率が高く、伝熱抵抗は減少する。

(もっと厳密には、双方の温度そのものにも影響されるが、こちらは影響が小さく、定量情報が必要な例としては性格が似ているので、ここでは割愛する。)

このRをW1, W2の関数としてR(W1, W2)として扱いますと、1次流量から1次コールドレグ温度への変化伝播についても定量情報が必要になる。

1次ナトリウムと伝熱管との間の熱抵抗をR1(W1)、

2次ナトリウムと伝熱管との間の熱抵抗をR2(W2)、とすると、

$$T1c - T2c = Q \frac{\frac{1}{W1} \frac{1}{W2}}{e^{\frac{1}{R1+R2} (\frac{1}{W1} - \frac{1}{W2})} - 1} \quad \text{式 9)}$$

1/W1 - 1/W2をvと置くと、

$$\frac{\partial (T1c - T2c)}{\partial v} = Q \frac{(e^{-\frac{v}{R1+R2}} - 1) - v \left(\frac{1}{R1+R2} e^{-\frac{v}{R1+R2}} - \frac{v}{(R1+R2)^2} e^{-\frac{v}{R1+R2}} * \frac{\partial R1}{\partial v} \right)}{(e^{-\frac{v}{R1+R2}} - 1)^2}$$

$$= Q \frac{(1 - \frac{v}{R1+R2} + (\frac{v}{R1+R2})^2 \frac{\partial R1}{\partial v}) e^{-\frac{v}{R1+R2}} - 1}{(e^{-\frac{v}{R1+R2}} - 1)^2} \quad \text{式 10)}$$

ここで、 $\frac{\partial Y}{\partial W1} = \frac{-1}{W1}$ であり、 $T2c$ はここでの議論では一定として差し支えないので、

$$\frac{\partial T1c}{\partial w1} = \frac{1}{Q} \frac{1 - \left(1 - \frac{Y}{R1+R2} - \left(\frac{Y}{R1+R2}\right) \cdot \frac{\partial R1}{\partial W1} W1\right) e^{-\frac{Y}{R1+R2}}}{W1^2 \left(e^{-\frac{Y}{R1+R2}} - 1\right)} \quad \text{式 11)}$$

この式で、網のかかった所が、1次流量の変化が、中間熱交換器の伝熱抵抗を介して原子炉入口温度、言い換えれば1次コールドレグ温度に影響を与える因子である。他の部分は正であるが、この網のかかった部分は $\partial R1 / \partial W1$ が負であるから負になる。この両者の絶対値の大小を決めるのは定性的な手法では困難と思われる。

傾向を把握するために、 $R1 = CW1^{-n}$ で近似して、

$$\frac{\partial R1}{\partial W1} = -CkW1^{-(n+1)} = \frac{-k \cdot R1}{W1} \text{ を式 11 へ代入し、}$$

$$\frac{\partial T1c}{\partial w1} = \frac{1}{Q} \frac{1 - \left(1 - \frac{Y}{R1+R2} + \left(\frac{Y}{R1+R2}\right)^2 k \cdot R1 \cdot W1\right) e^{-\frac{Y}{R1+R2}}}{W1^2 \left(e^{-\frac{Y}{R1+R2}} - 1\right)} \quad \text{式 12)}$$

上の式の下線部を元の形に復元すると、

$$\left[1 - \frac{1}{R1+R2} \left(\frac{1}{W1} - \frac{1}{W2}\right) + \left(-\frac{1}{R1+R2} \left(\frac{1}{W1} - \frac{1}{W2}\right)\right)^2 k \cdot R1 \cdot W1\right] e^{-\frac{1}{R1+R2} \left(\frac{1}{W1} - \frac{1}{W2}\right)}$$

これを更に $W1$ で微分したものが、 $W1=W2$ 以外で0になるための条件は、

$$K = \frac{(R1+R2)W2(1+(R1+R2)W1)}{(R1+R2)R1W1(W1+W2) - R1(W1-W2)} \quad \text{式 13)}$$

ここで、1次側と2次側の平均温度の差を $\Delta T_{1,2}$ 、ホットレグとコールドレグの温度差を $\Delta T_{h,c}$ とすると、 $Q = W \cdot \Delta T_{h,c} = \Delta T_{1,2} / (R1+R2)$ であるから、

$W1(R1+R2) = \Delta T_{1,2} / \Delta T_{1,h,c}$ 、 $W2(R1+R2) = \Delta T_{1,2} / \Delta T_{2,h,c}$ となる。

FBRの中間熱交換器のような、非常に熱伝導率の高い流体を使用した熱交換器の場合、これは小さな数(数分の1)になり、また、通常運転では1次、2次の流量は殆ど同じであるら、右辺分母の第2項は無視できる。すると、右辺は1以上になる。一方、 K は条件にもよるが、0.5~0.8であるので、式12右辺の分子の $W1$ に対する微分値は $W1=W2$ で0、 $W1 < W2$ で負、 $W1 > W2$ で正になる。

また、式12右辺の分子そのものは $W1=W2$ で0であるから、式12は $W1=W2$ で0以外は常に正である事が導かる。

これらの数式の操作を以下のように解釈する事ができる。

「常陽」では、1次側と2次側のホットレグとコールドレグの温度配置が図1のようになっているから、1次側の流量が減少しても、図1'のように推移し、1次コールドレグの温度も下降する。

しかし、何等かのプラントで、図2のような温度配置の熱交換システムがあった場合は、1次流量の減少によって、図2'のように1次コールドレグ温度が逆に上昇する事が考えられる。

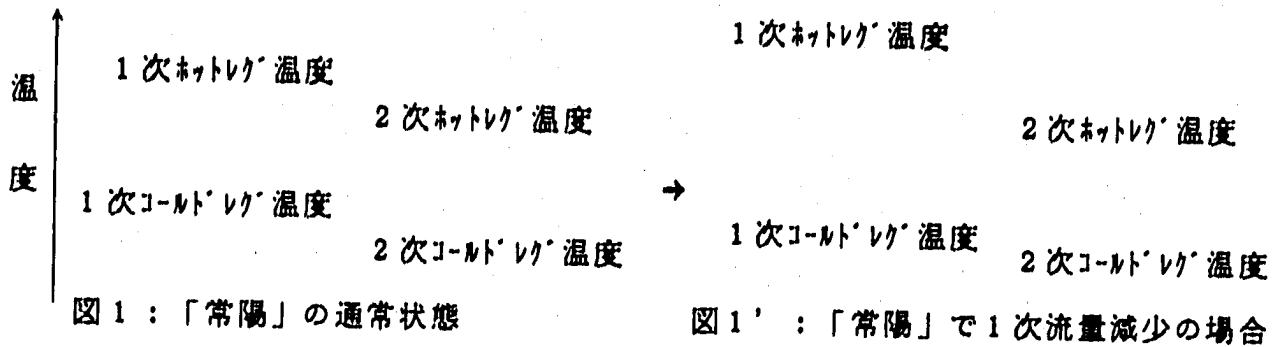


図1: 「常陽」の通常状態

図1': 「常陽」で1次流量減少の場合

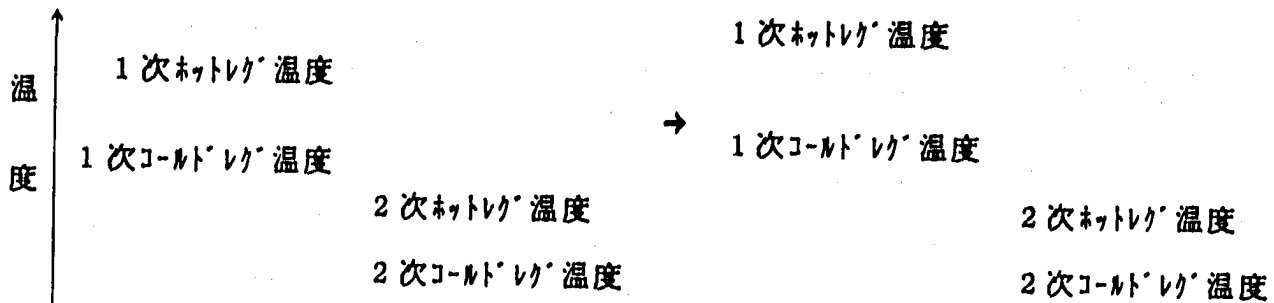


図2: 仮想システムの通常状態

図2': 仮想システムで1次流量減少の場合

このように、各部品内の詳細な現象をモデルに組込むに従って、定性情報のみでは影響の符号を決定できない場合が増えて行くことが考えられる。異常診断知識の導出という目的に照せば、このような場合に次のような情報がシステムから供給されることが望ましい。

- ①その影響の符号は定性情報のみでは導くことができないという事。
- ②その影響の符号を支配する因子（上述の例では、ホットレグーコールドレグ温度差 / 1次-2次温度差の比）
- ③今までに何等かの方法で符号が決定された例と、その場合の支配因子の値）
- ④その影響のゲインを決定する数式、あるいは手順

4-4 今後取組むべき新たな開発課題

これまで、原子炉冷却系に対する推論において曖昧さを抑制する、2つの新たな定性推論手法について述べてきた。

この両者には、次の2つの共通点がある。

- ①推論の対象となる系を構成する部品内で、ある従属パラメータに影響を与えるパラメータが複数ある場合、従来の手法では、同時にはその中の1パラメータと従属パラメータとの定性値の関係のみを考慮していた。これに対し、新たに考案された手法では、ある従属パラメータと、これに影響を与える全てのパラメータの定性値を考慮しつつ推論を進める方式を採用している。
- ②従来の手法では、パラメータ間の変化伝播に関する知識のみに基づいて推論が行なわれるが、新たな手法では、これとは別の、対象の系が、外乱が加えられた後の新たに達する平衡状態においても正常な平衡状態と同様に満たす拘束条件に関する定性知識をも推論に用いている。

②で述べたように、変化伝播とは異なる種類の定性知識を用いるためには、①の改良が必要であるので、この2つの共通の改良点は、互いに密接に関係している。

4-4-1 追加すべき定性知識をユーザーに示唆する機能

従来の定性推論によって、多くの場合推論矛盾が発生していた原因の1つは、上述の②であるが、これは、定性知識の不足と解釈することができる。本報告書では、②で述べた新たな種類の定性知識は、ユーザーが自然に認識しているものとして扱った。しかし、対象になる系が大規模で複雑になる、或いは日常的な感覚で把握する事の困難な性格を有するようになると、このように推論の曖昧さを減少させるのに有効な定性知識とはどのようなものかを推察することは人間にとって困難になるものと考えられる。この問題を解決するには、知識コンパイラに与えられている定性情報を評価して、さらに追加することが望ましい定性知識に関する示唆をユーザーに行なう機能を開発することが必要である。以下に、3-4で述べた、定性連立方程式に関する考察をもとにして、この機能の実現方法を1つ提案する。

対象としては、同じく3-4に述べた、原子炉冷却系1ループモデルを用いる。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa
1	-	+				+	-					
2	+	-		+			+	+	-			
3	+		-	+			+	-	-			
4			+	-					+	+	+	-
5			+		-				+	-	+	-

上の表は、このモデル内の変化伝播に関する定性知識をマトリックスで表したものであるが、定性推論に用いて、曖昧さを生じないためには、定性連立方程式のある部分集合の従属部の係数マトリックスの行列式の符号が決定できることが必要条件である。しかし、このマトリックスでは、a及びbの局所マトリックスの行列式の符号が決定できないので、従属部全体の行列式の符号も決定できない。このことは、例えば、「独立パラメータの定性値が全て[0]であるとき、定性知識1と定性知識2、及び定性知識3と定性知識4は、独立して別々に存在する意味が無い」と解釈できる。

推論において曖昧さを発生しないための必要条件を満たすために加えるべき定性方程式は、T1hとT1c、或いはT2hとT2cに同じ符号がかかっているようなものである。これを知識として解釈すると、「T1hとT1cの和、或いはT2hとT2cの和に関する定性知識」となる。これは、3-4に示した、変化伝播以外の定性的拘束条件が満たしている。

以上の機能を計算機上に実現すれば、有効性の高い定性知識群の構築を計算機で支援することができる。

4-4-2 定量的情報の処理モジュールとのインターフェース

新たに考案された2つの推論手法は何れも、従来の手法に比べて曖昧さを大幅に減少することができるが、なお変化伝播事象のあるものについては、その影響の方向を決定することができない。前項では新たに追加すべき定性知識を示唆する機能について提案を行なったが、常にその示唆によって新たな定性知識を付加する事が可能であるとは限らない。また、平成2年度の研究でも明らかになったように、定性推論という手法の枠内では対処不可能な事象も存在する。診断知識の導出のために、このような事象を扱う必要が生じた場合には、定量情報に依存せざるを得ない。定量情報を処理する手法としては、主に次のものが考えられる。

①人間の知識から引き出す

②過去の推論結果を蓄積しておき、その中から該当する情報を引き出す

③数値計算を行なう

広い範囲において、有効な異常診断知識を導出するためには、これらの種々の定量情報処理機能と柔軟に情報授受を行なうインターフェース機能が求められる。また、推論過程において単に情報授受を行なうのみではなく、定性推論に依存するよりも定量情報を獲得するほうが妥当だと判断する機能、診断知識を導出した過程を確認する必要が生じた場合、どのようなソースから定量情報を得て、その結果が推論過程のどの段階に用いられたかを明確に提示する機能も必要である。

5 結論

本報告書で述べた研究を以下にまとめる。

まず、定性推論に基づく異常診断知識導出手法の、原子力プラントへの適用性を評価するために、2ループを有する原子炉冷却系簡易モデルを構築した。

次に、平成2年度に行なった、原子炉冷却系単一ループモデルに従来の定性推論手法を適用して明らかになった、推論矛盾の発生を抑制する、2つの新たな定性推論手法を提案した。

最初の手法は、変数間の因果関係に沿って推論を進めるという点では、従来の手法と同じであるが、あるパラメータへ直接影響を及ぼす全てのパラメータの定性値を同時に管理しつつ推論を進める点、及び変化伝播以外の定性的拘束条件を大域的制約条件として、これとの矛盾を調べつつ推論を進める点で従来の手法と大きく異なる。

次の手法は、変数間の定性的知識全てを、定性連立方程式という形で整理し、これに部分的に背理法を適用しつつ順次縮小しつつ定性解を導く手法である。

更に、この2つの新手法の、2ループ冷却系モデルへの適用性を、机上のシミュレーション、或いはプロトタイプソフトウェアによって評価した。

その結果、最初の手法は、推論過程の把握が容易で、ユーザーにその推論過程を説明する機能において優れていること、また、2番目の手法は解の導出速度において優れていることが分かった。また、これらの新たな推論手法によって、本研究で対象とした、2ループ冷却系の簡易なモデルの範囲内では、概ね正しい診断知識を導出しうる事が確かめられた。

この両者の詳細な比較は、最初の手法のプロトタイプの作成を待たなければならないが、推論の効率と、推論結果の導出過程のユーザーへの説明機能は、異常診断知識の導出という観点から、その何れも必要不可欠なものである。従って、今後は、より大規模で複雑な対象に対して、この両手法共、その適用性を評価しつつ必要な改良、機能追加を行ない、併せてこの両手法をサブモジュールとして用いる知識導出システムの構築していく必要があると考えられる。

また、予め与えた定性知識の有効性が不十分な場合、新たな定性知識を追加するべきか、あるいは定量的な情報処理に依存するべきかを判断する機能等を開発する必要があることも明確になった。これらの機能は、推論の対象となる系が複雑、大規模になるに従ってその必要性が増すことと思われる。

謝辞

本研究に対し、実プラントの運転に携わった経験から、貴重なコメントを数多く頂いた、動燃事業団大洗工学センター実験炉部第1課の道野昌信、村上隆の両氏に対し、ここに感謝の意を表す。