

# 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

(その4:人間-計算機間での知識共有のための機能モデル表現言語の開発)

(共同研究報告書)

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

大阪大学

産業科学研究所

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下さい。

〒311-1393 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

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-1393, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1994

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  
(その4:人間-計算機間での知識共有のための機能モデル表現言語の開発)  
(共同研究報告書)

笹島 宗彦<sup>2)</sup> 来村 徳信<sup>2)</sup>  
吉川 信治<sup>1)</sup> 溝口 理一郎<sup>2)</sup>

要旨

本報告書は、原子力プラントの機能や挙動を計算機上に表現するための言語体系の開発について述べたものである。この言語は、機能や挙動を単に表現するに留まらず、計算機によって仮定された外乱からプラント挙動を予測したり、観測されたプラント挙動からその第一原因を同定する手がかりを導いたりすることを可能にするものである。その言語の開発に当たっては、機能と挙動の関係を明確にすることと、対象プラントの挙動推論が効率的に行えることを要件として設定し、それらは概ね達成された。

この開発の目標は、原子力プラントの機能や挙動に関する知識を人間と自動制御系の間で共有し、両者の協調による安全で経済的なプラントの運転を可能にすることである。

---

1) 動燃事業団 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

2) 大阪大学 産業科学研究所 電子機器部門

## Development of Knowledge Acquisition Methods for Knowledge Base Construction for Autonomous Nuclear Plant

M. Sasajima<sup>2)</sup>, Y. Kitamura<sup>2)</sup>,  
S. Yoshikawa<sup>1)</sup>, R. Mizoguchi<sup>2)</sup>

### Abstract

This report describes a development of an ontology for computerized representation of behaviors and functions of nuclear power plants. This ontology also enables computers to predict plant behaviors under assumed changes of boundary conditions and to derive cause identification suggestions of observed anomalies, as well as to represent functions and behaviors. Technical requirements in this development were recognized as clarified distinguishment of functions from behaviors and efficient plant behavior reasoning, and these have been successfully attained.

The purpose of this development is to achieve knowledge sharing between human and automated instrumentation and control system about nuclear plant functions and behaviors, to realize cooperation of human and automated system for safe and cost acceptable nuclear plant operation.

---

1)The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

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

## 目次

1 緒言 .....	1
2 原子カプラントの機能と振る舞いの表現言語の開発 .....	2
2.1 まえがき .....	2
2.2 機能モデル表現言語FBRL .....	4
2.2.1 基本方針 .....	4
2.2.2 機能モデル記述のためのテンプレート .....	4
2.2.3 振舞いモデルの記述方針 .....	5
2.2.4 FTの記述 .....	8
2.2.5 FTによる機能概念間の関係表現 .....	11
2.2.6 FBRLモデルの再利用性 .....	13
2.3 FBRLの説明タスタへの適用 .....	14
2.3.1 説明生成の枠組み .....	14
2.3.2 機能レベルの説明生成 .....	16
2.4 関連研究 .....	19
2.5 むすび .....	21
2.6 参考文献 .....	22
3 原子カプラントの機能モデル記述言語の説明生成への応用の検討 .....	23
3.1 はじめに .....	23
3.2 機能モデル記述言語“FBRL” .....	23
3.2.1 対象物の記述テンプレート .....	23
3.2.2 振舞いと解釈情報の記述 .....	25
3.3 機能モデルの説明タスクへの応用 .....	27
3.3.1 機能モデルを利用した説明の枠組 .....	28
3.3.2 機能モデルに基づく2種類の説明 .....	29
3.3.3 説明生成の例 .....	29
3.4 むすび .....	30
3.5 参考文献 .....	30
4 機能モデル表現言語を用いたプラント挙動説明生成システムの開発 .....	31
4.1 FBRLを利用した説明生成システム .....	31
4.1.1 説明生成の枠組 .....	31
4.1.2 機能モデルを利用した説明の実現 .....	32
4.1.2.1 部品の機能とシステムの関わり(1) .....	32

4.1.2.2	部品の機能とシステムの関わり (2)	35
4.1.2.3	説明の詳細化	37
4.1.2.4	故障の発生	37
4.1.3	振舞いの知識を利用した説明	38
4.2	むすび	39
4.3	参考文献	39
5	モデルに基づく問題解決のための流体系と時間の言語体系の構築	40
5.1	まえがき	40
5.2	部品に基づいた因果性と時間	41
5.2.1	因果的性質の明示的記述	41
5.2.2	局所性と状況独立性	41
5.2.3	局所的決定性	42
5.2.4	因果的時間オントロジー	43
5.3	流体系オントロジー	45
5.3.1	流体の全連続性	45
5.3.2	流量の因果性	45
5.3.3	圧力と圧力差の因果性	46
5.3.4	因果的時間と大域的制約	46
5.3.5	部品の因果性の例	47
5.4	モデルの記述様式	48
5.5	振舞いの推論の能力	49
5.5.1	時間に関する能力	49
5.5.2	フィードバックに関する能力	50
5.5.3	現象に関する能力	50
5.6	振舞いの推論方式	51
5.7	原子力プラントへの適用	51
5.7.1	モデル記述	52
5.7.2	推論結果	54
5.7.3	検討	54
5.8	関連研究	56
5.9	むすび	57
5.10	参考文献	58

## 図目次

図2.1 機能モデルクラスのテンプレート .....	5
図2.2 熱交換器 .....	6
図2.3 機能の概念の関係図 (部分) .....	12
図2.4 機能の概要の階層的組織化 (部分) .....	13
図2.5 説明生成システムの枠組み .....	15
図2.6 原子力発電プラントのモデルの例 .....	16
図3.1 対象物記述の為のテンプレート .....	24
図3.2 FBRLによる「燃エネルギーを運ぶナトリウム」の記述例 .....	24
図3.3 機能モデル記述のためのテンプレート .....	26
図3.4 冷却システムの概要 .....	26
図3.5 FBRLによる熱交換器の機能表現 .....	27
図3.6 説明生成システムの枠組み .....	28
図4.2 説明生成システムを組み込んだエキスパートシステム .....	31
図4.3 階層的な機能モデルの概念 .....	33
図4.4 原子力プラントのモデルの例 .....	34
図4.5 逃し弁を含む油圧回路 .....	35
図5.1 2次系熱輸送系の概略 .....	52
図5.2 A系統中間熱交換器 (IHXA) のモデル .....	53
図5.3 A系統1次ループポンプ (P1a) のモデル .....	53
図5.4 A系統1次系ループの熱量保存則 (LOOP1a_HEAT) のモデル .....	54
図5.5 ポンプ (P1a) の電力低下時の因果関係 (部分) .....	55
図5.6 中間熱交換器 (IHXA) 熱伝達率低下時の因果関係 (部分) .....	56

## 表目次

表2.1 各機能を表現するFTの組み合わせ .....	14
-----------------------------	----

## 第1章 緒言

原子力プラントの運転における安全性と経済性の両立のためには、異常事象を早期に検知、診断することが必要である。そのためには、運転員と計測制御系がプラントの機能、挙動、構造に関する知識を共有して、互いに強調して異常の原因同定や対応操作決定を行う必要がある。原子力プラントのような複雑な系では、異常が発生した際の原因同定や対応操作の決定を、量と精度が不十分な情報に基づいて行う必要があるため、定められた境界条件の下で行う数値計算は適用できない。また計算機がプラントの現在の状態や将来の挙動に関して有する情報を人間と共有するためには、物理パラメータのスカラー値のみの集合は不適切であり、「意味」を含んだ情報を処理する必要がある。パラメータのスカラー値に過度に依存せずに様々な外乱とそれによってもたらされる影響とを関係付けて処理する手法の一つとして定性推論が提唱され、筆者らも原子力プラントの異常診断への応用を研究してきた。その結果、プラントの定常状態近傍でのプロセスパラメータ間の関係を近似する連立一次方程式から係数の符号のみを取り出して、これに因果関係を加えたものを情報源としてプラント異常の原因同定や状態推定を行うことはほぼ達成された。このような情報源やそれに基づく推論過程を人間が「理解する」ためには、意味付けの様式を厳密に、しかも汎用性多角定める必要がある。言い換えれば、プラントに不具合が生じた際の影響の伝播、結果として知られるプラントの挙動や状態、プラントに関わる人間にとっての支障等関連事項すべてを記述できて、しかも計算機上で稼働させることのできる言語体系が必要になる。このような言語体系を人工知能分野でオントロジーと称する。

この報告書では、原子炉主冷却系の異常診断に関するオントロジーの開発について述べる。第2章では、プラントの機能と挙動に焦点を当てた言語の開発について述べる。第3章では、計算機から人間への知識伝達、つまり説明のためのこの言語の応用に関する検討結果を述べ、続く第4章では実際に開発したプラント挙動説明を紹介する。第5章では、原子力プラントのように流体循環ループを多数有する対象の非定常挙動を言語で記述する際に最も問題となる時間の扱いについて検討した結果を紹介する。



## 第2章 原子力プラントの機能と振る舞いの表現言語の開発

### 2.1 まえがき

モデルベースの問題解決システムの課題の一つとして、優れた定性モデルを構築する方法論を整備することがあげられる。近年、モデルベースの問題解決システムが扱う問題が高度化するにつれて、対象モデルが表現すべき知識の内容を議論し、計算機や人間の間で共有・再利用できる知識を記述することの重要性が高まってきている。対象モデルに基づくタスクにおいて、重要な役割を担っているのが振舞いと機能の概念である。振舞いはシミュレーションと密接に関係し、機能は概念レベルにおける推論と深く関連している。また、両者は対象を理解するために不可欠なドメインオントロジーの中心的な要素であり、対象モデル表現の中核をなす概念でもある。両者を深く理解しその表現方式を確立すること、言い換えれば、機能と振舞いの本質的な違いを理解しその表現方式を確立することは、モデルベース推論が扱うべき知識の内容を議論し規定するために必須の課題であるといえる。

対象モデル記述方式の一つとして、あらかじめシステムに部品単位でモデルを準備しておいて、その組合せ、修正によって対象モデルを記述するというものがある。この方式はモデル構築の労力を削減することに大いに貢献すると考えられるが、de Kleer<sup>[2-1]</sup>が指摘するように、部品単位のモデル構築時には、部品の振舞いを導出するために必要な知識と機能の知識が混在しがちであり、細心の注意を払う必要がある (No Function in Structure)。これら2種類の知識の混在は部品モデルの再利用性を低下させるので、それらを明示的に分離して記述する必要がある。

これまでも対象の機能モデルを記述し、問題解決に応用するための研究がさまざまに行われてきた。de Kleer<sup>[2-2]</sup>は部品を、因果性を持つ複数の入出力関係、すなわち振舞いを持つものとして捉え、そこから適切な振舞いを選択した結果機能が認識されるとした。de Kleerの手法は、振舞いのパターンをすべて数え上げ、その一つ一つに対して機能語彙を割り振る方式に頼っており、振舞いとその振舞いを表現する機能語彙との関係は暗黙的である。また、部品の機能を副部品の機能と振舞いを適切に組み合わせることで表現する枠組みも提案されている。この方式では、あるグレインサイズにおける振舞いモデルが異なったグレインサイズでは機能を表現することになり、機能と振舞いの本質的な相違が捉えられていない。これらの記述方式に見られるように、これまでに提案されてきた方式は望ましい機能モデル記述方式の要件を満たしていない。

筆者らは、機能と振舞いには本質的な差があると考えている。この考えに基づいて、機能と振舞いの概念に対して従来とは異なった定義を与える。振舞いとは、時間とともに変化する対象の状態遷移であり、利用者が必要とする対象のシミュレーションの結果と定義する。シミュレーションを行うために必要十分な情報、すなわち対象の状態を表すパラメータの集合や、それらの間に成り立つ制約式などを表現したものを振舞いモデルと呼ぶ。次に、部品をシステムに組み込む場合、その部品に対して意図された望まし

い状態を認識することができる。これを目標と呼ぶ。最後に、目標のもとで振舞いを解釈することができる。例えば、熱交換器から出力されてくる冷却媒体の温度が入力時より低い状態、という目標のもとで、その熱交換器の振舞いは熱エネルギーを除く、と解釈される。このように、目標のもとで振舞いを解釈した結果を機能と呼ぶ。

以上の議論に基づいて、我々は対象部品の機能と振舞いの概念を深く追求し、振舞いと機能のオントロジーを整備してきた。そのうえで機能と振舞いのオントロジーに基づいて部品の機能モデルを表現するための言語FBRLを設計した。機能と振舞いのオントロジーは、ドメインオントロジーの重要な部分要素であり、その記述方式の確立はドメインオントロジーの整備に貢献する。本研究は、オントロジーの形式的に厳密な公理化ではなく、その開発方式の規定、表現すべき概念の切出しとその意味の確定に重点を置いて機能モデル表現の標準化と機能語彙の組織化を行う。

FBRLは振舞いモデルに我々がFunctional Topping (FT) と呼ぶ、振舞いモデルを解釈するための情報を加えたものとして機能モデルを表現する。この振舞いモデルとFTを記述するためのプリミティブを整備することによって、対象の機能モデルをプリミティブの組合せによって記述することができるようになる。さらに筆者らは、FBRLモデルの有効性を検討するために、FBRLを従来の振舞いモデルのみに基づくモデルベースシステムにとって困難であった機能レベルの語彙を用いた説明生成に適用した。機能レベルの説明は対象の振舞いを解釈することが困難なユーザの対象理解を助けることができると考えられる。

本章は五つの節からなる。2節は、FBRLの言語仕様と表現能力について述べる。3節は、FBRLの説明タスクへの適用実験について述べる。4節は、関連する研究との比較を行い、5節で総括と今後の展望を述べる。

## 2.2 機能モデル表現言語FBRL

言語設計においては記号の形式的な表現が持つSemanticsとその言語によって表現したいと考えているmeaningに関する議論が必要である。筆者らは後者に重点を置いて、ドメインの知識をより簡単に記述できるようにモデル構築を支援することを目標として、機能モデル表現言語FBRLを開発してきた。その結果FBRLは、表現できる概念とその体系の点で豊富な機能表現言語となっている。本稿では、FBRLの形式的な表現が持つ意味論についての詳細な議論は行わない。本節では、部品の振舞いと機能を記述するための基本方針を述べた後、FBRLについて概説する。

### 2.2.1 基本方針

振舞いと機能の違いを特徴づけるために、機能モデルを振舞いモデルにその解釈情報を付加したものとして記述する方針をとり、目標のもとでの解釈行為を説明するための視点、すなわちFTを同定することを目指して検討を行った。このための方法として、まず機能と振舞いの概念を深く理解し、そしてそれを表現するために必要な語彙の体系である機能と振舞いのオントロジーを整理し、それを表現するために必要な記述プリミティブを検討した。その結果、対象の振舞いを捉えるための視点と四つのFTを同定した。これら四つのFTは、その必然性を示すことはできない性質のものであるが、有用性は、振舞いと機能の差を明示的に表現することだけでなく、説明や5節で述べる再設計のための対象理解などに貢献する本質的な情報を提供する性質によって示されていると考えている。

### 2.2.2 機能モデル記述のためのテンプレート

部品の機能と振舞いのモデルを記述するためのFBRLテンプレートを図2-1に示す。ObjectsからQN-Relationsまでの七つの属性に値を与えることによって、対象モデルの振舞いを導出するために必要なシステムの入出力関係を表現する。

システムに組み込まれた一つの部品が複数の機能を発揮することがある。そのような対象モデルを表現するためにFBRLテンプレートは、一つの振舞いモデルに対して複数の解釈情報を記述することを許す。一つの解釈情報、すなわちFT-setは、0-FocusからNecessityまでの四つの属性値の組合せで表現され、一つの振舞いモデルに対応するFT-setの集合を属性FT-setsに記述する。

### 2.2.3 振舞いモデルの記述方針

本節では、振舞いモデル記述方式を概説する。以下、本稿ではFBRLの属性に属性値を与えることを次のように表現する。

属性：属性値

#### [1]デバイス中心の部品記述

振舞いを、システムを構成する個々の部品の入出力関係、すなわち振舞いモデルから導出されるシステムの状態の系列として捉える。入出力関係の表現方式としては入力されたものがどのように加工されて出力されるかというプロセス中心のオントロジーによるものと、システムを部品単位で捉え、そこに入力されたものと出力されたものの関係、すなわちデバイスオントロジーによるものが考えられる。本研究では後者の方式をとり、部品を入力口と出力口を持ったブラックボックスとして表現する。部品の入力口からあるものを入力すると、出力口から違うものが出力されてくる。部品には、入力されたものを部品内部に取り込んでしまうものや部品内部から出力しかしないものもある。部品に入力されるもの（入力物）や部品から出力されるもの（出力物）、部品内部に存在するものをまとめてその部品の対象物と呼ぶ。対象物としては、部品の機能を発揮させるような物質や熱、光のようなエネルギーを記述する。すべてのエネルギーは媒体によって運搬されるものとして捉え、その量は媒体の状態を表すパラメータによって表現される。対象物の入出力関係を捉える際には、磁場の力、重力などの場の力による影響は無視する。

以上の議論をふまえて、部品の振舞いを対象物と対象物間の関係によって記述する。また、部品や対象物の記述はオブジェクト指向に基づいて行う。

```

Behavior:
  Objects:                /*対象物の集合*/
  SubComponents:          /*副部品のID*/
  MP-Relations:          /*原料-生成物関係*/
  SameClass:              /*対象物のクラスの同一性*/
  InherentParams:        /*部品固有のパラメータ*/
  Ports:                  /*部品の接続関係*/
  QN-Relations:          /*パラメータ間の量的関係*/
  FT-sets:
  FT-set1
    O-Focus:              /*注目する出口パラメータ*/
    P-focus:              /*解釈時に注目するポート*/
    FuncType:             /*機能タイプ：維持、保持、達成*/
    Neccessity:           /*対象物の必要性*/
  FT-set2

```

図2.1 機能モデルクラスのテンプレート

[2]振舞いの表現方式

振舞いモデルは部品の機能を表現するために必要な対象物の集合と、それらの関係によって表現される(第2章 3節[1]項)。FBRLでは、図2-1で示したテンプレートの次の七つの属性に値を与えることによって、対象の振舞いモデルを表現する。図2-2は、In<sub>1</sub>とOut<sub>1</sub>の間を流れる高温の流体とIn<sub>2</sub>とOut<sub>2</sub>の間を流れる低温の流体の間で熱エネルギーの受渡しをさせる、熱交換器の振舞いモデルである。この図を例として振舞いモデルを表現するための各属性が持つ意味を説明する。

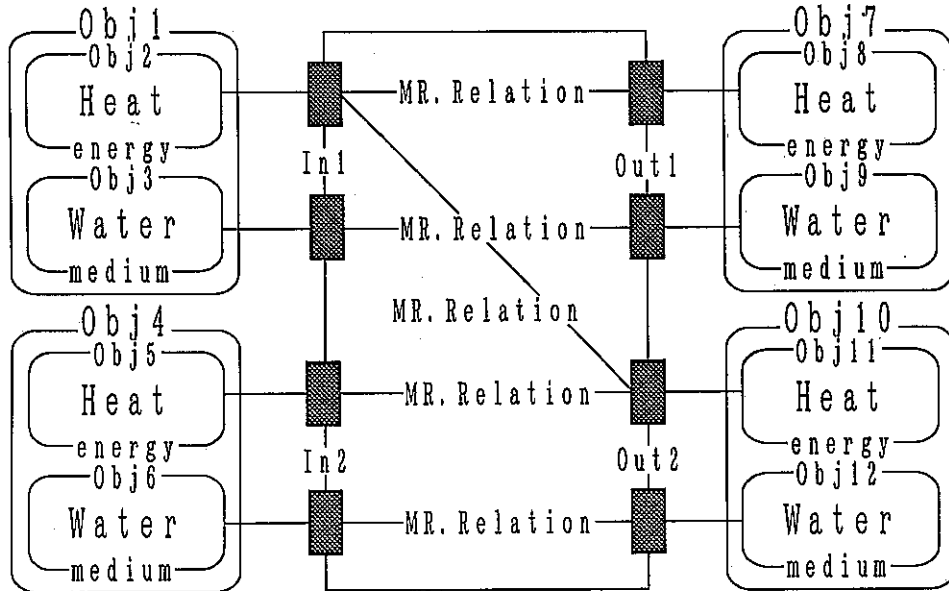


図2.2 熱交換器

- Objects : 部品の機能を表現するために必要な対象物の集合を記述する。対象物の集合とは、対象物クラスのインスタンスの集合である。図2-2の場合、Obj<sub>1</sub>からObj<sub>2</sub>までの対象物のインスタンスを記述する。

- SubComponents : 部品には、いくつかの副部品から構成されているものがある。このような部品を階層的に表現する場合に、その副部品のIDのリストを記述する。例えば、ノズルと回転羽根から構成されるタービンを

SubComponents : (ノズル 回転羽根)

と表現する。

- MP-Relation : 出力物には、それがどのような原料、すなわち入力物から生成されたかを認識することができるものがある。このような、生成物 (Product) とその原料 (Material) の関係にある対象物を原料-生成物関係と呼び

MP-Relations : ( (生成物のリスト) (原料のリスト) ) ... )

によって記述する。図2.2の場合、低温側の出口にある熱エネルギー (Obj<sub>11</sub>) は、高温側の入口から入力された熱エネルギー (Obj<sub>2</sub>) と低温側の入口から入力された熱エネルギー (Obj<sub>5</sub>) から生成されることを認識できる。その表現は、次のようになる。

MP-Relations : ( (Obj<sub>11</sub>) (Obj<sub>2</sub> Obj<sub>5</sub>) ) )

- SameClass : 「エネルギーを変換する」のように、抽象度の高い機能モデルを表現する場合、対象物のクラスどうしの同一性が重要な意味を持つことがある。対象物のクラスの同一性を

SameClass : ( (関係演算子対象物<sub>1</sub> 対象物<sub>2</sub>)

と表現する。関係演算子は、対象物のクラスが同じときには=、異なる場合は≠である。

- InherentParams : 部品には、熱伝達率のように対象物の影響を受けない固有のパラメータを持つものもある。そのようなパラメータのリストを記述する。図2-2の熱交換器を熱伝達率のほかにポートの断面積なども対象物の影響を受けないものとしてモデル化した場合、InherentParamsの記述は

InherentParams : (熱伝達率ポート断面積)

となる。

- Ports : 振舞いのシミュレーションや、後述する異なる部品の機能どうしの関係を推論したりする場合に、部品の接続情報は重要である。属性Portsは、ポートの接続情報を記述する。例えば、図2.2のOut<sub>1</sub>ポートが発電プラントの2次系ループホットレグのIn<sub>1</sub>ポートに接続しているということを、熱交換器の属性Portsに、次のように記述する。

Ports : (Out量2次系ループホットレグIn<sub>1</sub>)

- OS-Relations : 対象の振舞いや属性間の因果関係を導出するために必要な、属性間の関係を表示する式の集合を記述する。図2.2において、熱交換器をエネルギーロスがない理想的な部品としてモデル化した場合、熱エネルギーの総量が保存され、Obj<sub>11</sub>の熱量はObj<sub>2</sub>の量にObj<sub>3</sub>の量を加えたものとなる。これは

(=Obj<sub>11</sub>. Amount  
 (+Obj<sub>2</sub>. Amount Obj<sub>3</sub>. Amount) )

と表現することができる。

## 2.2.4 FTの記述

機能の側面から部品を記述するために、「注目する出口パラメータ」、「注目するポート」、「目標状態を実現する入出力関係」、「対象物の必要性」の四つの観点からプリミティブを抽出した。

### [1]0-Focus：解釈時に注目するパラメータのクラス

属性0-Focusは、解釈時に注目するパラメータのクラスをその値としてとる。一般に部品はさまざまな振舞いを併せ持つ。0-Focusは、部品が持つ複数の振舞いのうち、どれに着目したかを見分ける重要な視点を提供する。例えば、ランキンサイクルなどに使用されるボイラは、水を水蒸気に変換する振舞いと水蒸気を高圧にする振舞いを併せ持つ。ボイラの場合、水蒸気の発生という振舞いに注目することを

0-Focus：相

と表現し、圧力を与える振舞いに注目することを

0-Focus：圧力

と表現する。0-Focusの値を指定することによって、ある機能を果たしている部品の振舞いについての説明を生成するときには、説明すべきパラメータとそうでないパラメータをシステムに区別させることができる。例えば、ボイラが水を相変化させる機能に注目して説明するときには圧力パラメータの変化を述べる必要がないので省略することもできる。

### [2]P-Focus：解釈時に注目するポート

属準P-Focusは、解釈時に注目するポートを表現し、属性値として二つの要素からなるリストをとる。

P-Focus：(要素<sub>1</sub> 要素<sub>2</sub>)

要素<sub>1</sub>、要素<sub>2</sub>は、おのおの解釈時に注目する入力側と出力側のポートのリストである。

部品には複数の媒体間でエネルギーなどの受渡しをするものがあり、どの媒体の動作に注目するかによってその解釈が異なったものになる。P-Focusの記述によって、解釈時に注目する媒体やエネルギーの流れを表現することができる。図2.2の熱交換器の振舞いの解釈は、エネルギーを放出している流体の動作（流れ）と、エネルギーを受け取る流体の動作（流れ）のどれに注目するか、または注目しないかによって変わる。エネルギーを放出している流体をSRC、受け取る流体をRCPと呼ぶ。例として、図2.2の振舞いモデルを熱エネルギーに注目して解釈することを考える。熱エネルギーのSRC、すなわちIn<sub>1</sub>とOut<sub>1</sub>の間を流れる高温流体の流れに注目すれば、高温側の流体から熱エネルギーを「取る」と解釈される。熱エネルギーのRCP、すなわちIn<sub>2</sub>とOut<sub>2</sub>の間を流れる低温流体の流れに注目すれば、低温側の流体に熱エネルギーを「与える」と解釈され、どちらの流れにも注目しなければ、高温側から低温側に「伝える」と解釈される。上述の熱交換器の場合、P-Focusの値を次のようにすることによって、それぞれの注目の仕方を表現することができる。

高温側の流れに注目する場合：P-Focus：（（In<sub>1</sub>）（Out<sub>1</sub>））

低温側の流れに注目する場合P-Focus：（（In<sub>2</sub>）（Out<sub>2</sub>））

どちらにも注目しない場合：P-Focus：（（）（））より詳細な議論をすれば、P-Focus記述は、注目する媒体の動作（流れ）を指定するだけでなく、どのパラメータの変化（差異）に注目するのかを指定すると考えるほうが適切である。例えば、熱交換器の振舞いを、低温流体に熱を与えていると解釈する場合、我々は低温流体の入口と出口での温度差に注目している。また、プラントにおける流量調整弁が出力流量を維持していると解釈する場合、我々は部品の出口流量のみに注目しており、車の差動装置（ディファレンシャル、デフ）が二つの車輪の回転差を生成していると解釈している場合には、出力媒体である二つのシャフトの回転数の差に注目している。流量調整弁とデフの注目の仕方は次のように表現できる。なお、説明の都合上、P-Focusの値をそのポートに存在する媒体名で表現する。

流量調整弁の場合：P-Focus：（（）（流体））

デフの場合：P-Focus：（（）（シャフト<sub>1</sub> シャフト<sub>2</sub>））

P-Focusは、他のFTとともに振舞いモデルを適切な機能語彙にマップするための情報となる。また、システムを構成するある部品の機能が別の部品の機能に対してどのような経路をたどって貢献しているか、すなわち、機能どうしの照応関係を導出する手続きで中心的な役割を果たす。その説明生成への適用例を3節で示す。

### [3]FuncType：目標状態への指向の形態

Anne M. Keunekeは、機能の概念を達成、制御、維持、防止、の四つに分類した[2-3]。しかし、この分類を行うための視点の議論が不十分である。まず、部品の機能を分類するときにおのおのの部品の機能に注目するのか、部品の機能どうしの関係に注目するのか、という議論がされていない。例えば、ヒータが流体の温度を高める機能を「達成」していることは、ヒータのなかを流れる流体の温度の変化に注目すれば同定できるが、車のラジエータが冷却媒体から熱を取り除くことによってエンジンルームのオーバヒートを「防止」していることは、ラジエータの機能とエンジンルームの機能の関係に注目しなければ同定できない。

さらに、部品の入出力関係に注目するのか、特定のパラメータが時間とともに変動するようすに注目するのか、という議論もなされていない。一般に、定常状態にあって入力値が安定しているために出力値がまったく変動しない部品の機能と、入力値が多少変動しても制御機構によってつねに一定の出力流量を得る流量制御弁の機能は、出力値を維持する機能として混同されがちであるが、前者が維持しているのは入出力関係であり、後者が維持しているのは出力値である。よって、互いに異なる機能として分類されるべきであるが、Keunekeの分類では、これらを区別することができない。

我々は、部品の入力値の変動に対して出力値が変動するかしらないか、出力が入力と同じか異なるか、という二つの軸からKeunekeの分類を再解釈し、おのおのの概念を再定義した。属性FuncTypeは、達成、保持、維持の三つのいずれかを値と



してとる。それぞれの表す意味は次のとおりである。

- (1)達成：入力値に応じて、出力値を望ましい値にする機能。
- (2)保持：入力値と出力値を等しくする機能。
- (3)維持：入力値にかかわらず、出力パラメータを望ましい値にする機能。

達成機能は、入力値に応じて出力値を変動させる。流体に熱エネルギーを与えることによってその温度を高めるボイラ、空気中に熱エネルギーを放射することによって冷却するラジエータ、熱エネルギーから回転力を生成するタービンなどが達成機能に分類される。

保持機能は、出力値を入力値と同じにするが、出力値は入力値に応じて変動する。パイプやシャフトは保持部品の例である。

維持部品は、制御機構を利用することによって、入力値の変動にかかわらず出力値をある一定の値にする。制御機構には、フィードバック制御機構のように人工的なものと物理原理によるものがある。前者を利用した維持部品の例としては流量や圧力の調整弁が、後者の例としては温度に注目した蒸気発生器があげられる。流量制御弁の出口流量は制御機構によって維持されているが、蒸気発生器が出力する蒸気の温度は、水が持つ物理的性質、すなわち飽和状態の水に熱エネルギーを加えてもその温度は変化しないという性質によって100度に維持されている。

Keuneke<sup>[2-3]</sup>は、達成機能、維持機能のほかに制御機能、防止機能を提案している。前者は我々の枠組みにおける維持機能の構成要素である制御機構の機能に対応する。後者を我々は、「ある異常な入力値Xによって故障状態に陥る部品Aが系に組み込まれているとする。入力値がXのときにXではない安全側の出力値を生成する部品の機能」として定義する。維持、達成および保持機能と防止機能の違いは、前者の機能が部品単独で観定できるのに対して、後者の機能はそれが働かなかったときに異常状態に陥る部品の存在がなければ認識・規定できないという点にある。我々の枠組みでは、ある部品が防止機能を果たしていることを直接には記述せず、FBRLによるシステムのモデルから推論エンジンが導出する。

機能タイプを参照することによって、目標状態に至る振舞いを抽象的に説明するための語彙がわかり、例えば流量調整弁について「出力流量を一定に維持する」という抽象的な説明を生成することができる。

#### [4]Necessity：対象物の必要性

部品が入力物から取り出しているものが、系にとって不必要であるかそうでないかによってその解釈が異なる場合がある。例えば、高温の流体の熱エネルギーを低温の流体に伝える熱交換器の機能は、何もコンテキストを考えなければ熱エネルギーを「伝える」と解釈されるが、自動車のエンジンルームで冷却媒体の温度を低くして出力するラジエータの機能は、冷却媒体から熱エネルギーを「除く」と解釈される。前者と後者の差は機能の対象となった熱エネルギーが系にとって不要であるかないか、という観点から捉えられる。PBRLでは、あるポートに所属するあるクラスに属する対象物が系にとって必要であるか不要であるか、またはどちらでもないか

いうことを、3要素のリスト

(必要性ポート対象物のクラス)

によって表現する。第1要素「必要性」は、対象物が必要であるとき“Need”、不要であるとき“NoNeed”、どちらでもないとき“Neutral”をそれぞれ値としてとる。属性Necessityの値は、対象物の必要性を表現するリストを要素とするリストで表現される。例えば、Out<sub>2</sub>ポートから出力される熱エネルギーが系にとって不要であることを、

Necessity: ( (NoNeed Out<sub>2</sub> 熱) )

と表現する。デフォルトでシステムは、部品が注目している対象物を“Need”。他の対象物は“Neutral”とみなす。部品が注目している対象物は、O-FocusとP-Focusによって特定される。モデル記述者がNecessityの値を特に指定しなかったり空リストにした場合には、部品が注目している対象物を“Need”とみなし、それ以外の対象物を“Neutral”とみなす。

Necessityは、他のFTとともに振舞いモデルを適切な機能語彙にマップするための情報を提供する。また、ある機能の出力物にNoNeed指定をすることによって、その機能の副作用を明示的に表現することもでき、さらに故障診断に利用することができる。例として、ある電子回路に副作用として熱を発生する低抗が組み込まれている場合を考える。副作用を考えない診断モードでは、電子回路のなかに熱に弱い部品が組み込まれていても低抗が発する熱では故障しないと考えて診断し、副作用を考えるモードでは熱による故障も考えるというように、故障原因の範囲を変える故障診断を実現できる。

### 2.2.5 FTによる機能概念間の関係表現

我々は部品の振舞いと機能を捉えるためのさまざまな視点を検討し、それらを統合して記述するための言語FBRLを定義した。FBRLにより、振舞いと機能の概念の関係を表現することが可能になる。図2.3は、我々が試みた機能のオントロジーの語彙分類の一部であり、個々のノードはFBRLで表現できる機能の概念を表している。

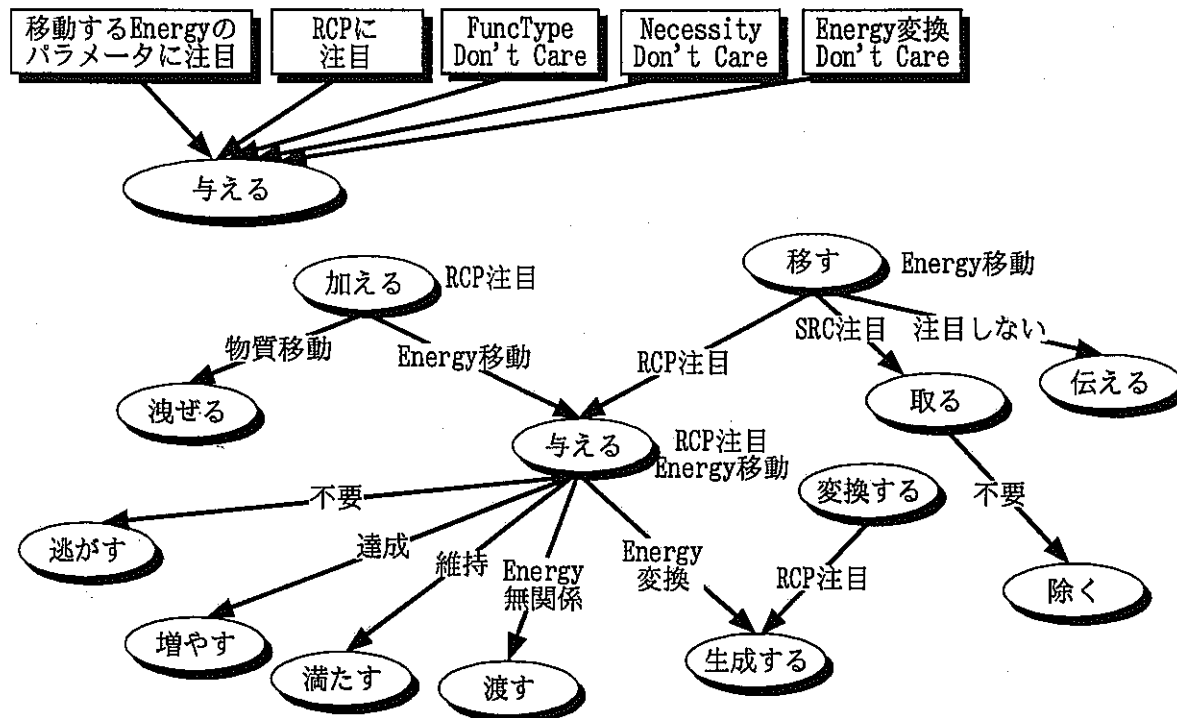


図2.3 機能の概念の関係図 (部分)

あるノードの概念にFTの解釈情報を付加・削除すると、隣接するノードの機能概念になる。エネルギーを「与える」という機能概念は、二つ以上の媒体の間で種類やその変化の仕方は問わないが、エネルギーが移動しており、そのエネルギーを受け取る媒体、すなわちRCPのエネルギーパラメータの入出力値の関係によって目標状態が表現されるもの、として捉えることができる。「与える」機能に、移動するエネルギーの種類を変えない、という解釈情報を加えた概念は「渡す」という機能語彙で表現され、エネルギーの種類を変える概念は「生成する」という機能語彙で表現される。逆に、「与える」機能概念からエネルギーを受け取る側、すなわちRCPに注目するという解釈情報を取った概念は、「移す」という機能語彙で表現され、RCPに与えるものがエネルギーであるという解釈情報を取った概念は「加える」と表現される。

図2.3から推定できるように、機能のオントロジーは全体としてグラフ構造を形成するが、特定の視点からグラフを捉えて再構築することによって、例えば図2.4のようにエネルギーを媒体間で移動させる機能概念の関係を階層構造として表現することもできる。このオントロジーを利用することによって、エキスパートシステムはFBRLモデルを適切な機能概念および語彙にマップすることができるようになる。

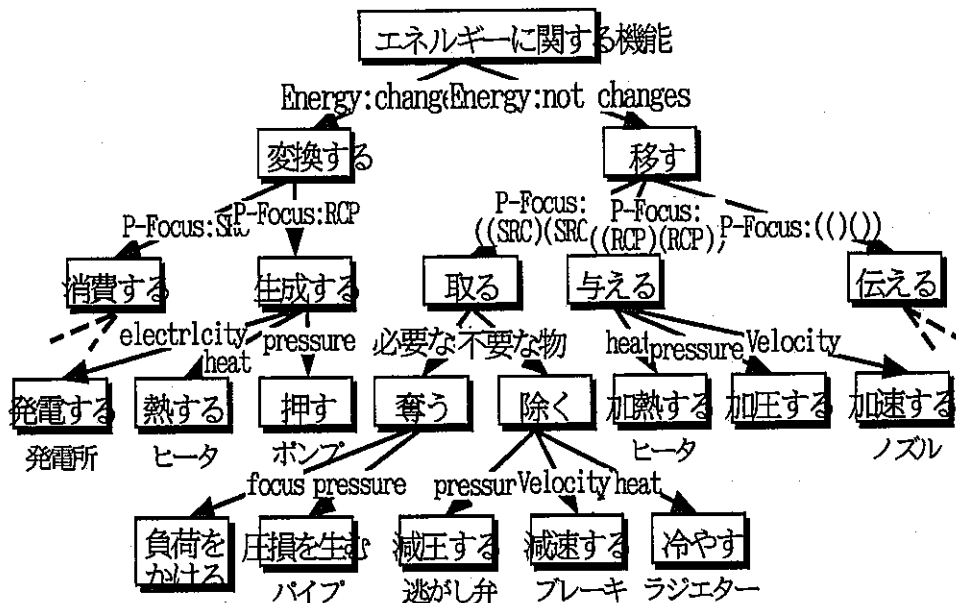


図2.4 機能の概要の階層的組織化 (部分)

2.2.6 FBRLモデルの再利用性

FBRLはさまざまなドメインの対象をさまざまな抽象度で記述できる・ドメインのどのような対象の機能モデルの記述に際してどのような概念記述を再利用できるかを表1に示す。表中の“D”は、“Don't Care”の意味であり、その属性値が何であっても構わないことを示す。ただし、“D”は伝える、与えるといった機能概念のモデルを記述するときだけに利用し、そのインスタンスである部品の機能モデルを記述するときには利用しない。また、説明の便宜上P-Focusの各要素を媒体の名称で記述しているが、インスタンスレベルで実際に記述するのはその媒体が存在するポートである。例えば、「エネルギーを与える」という概念は、属性0-Focusの値として与えるエネルギーのクラス“Energy”をとり、エネルギーを受け取る媒体、すなわちRCPの入出力関係に注目しているので、属性P-Focusは値“( (RCP) (RCP) )”をとる・機能タイプとNecessityは定義に関係しないので、値“D”をとる。「与える」クラスに属し、熱エネルギーを低温の流体に与えるヒータの機能は、0-Focusの値を“温度”にし、P-Focusの値を“( (低温流体) (低温流体) )”、機能タイプを“達成”、特に記述すべき必要な対象物や不要な対象物がないのでNecessityを“( )” (空リスト)とすることで表現される。これらの概念レベルでの機能モデルの記述を具体化し、必要に応じて対象物の量的関係式を付加することによって、対象の機能モデルが記述できる。

機能		O-Focus	P-Focus	FuncType	Necessity
部品名	ドメイン				
伝える		Energy	((())())	D	D
熱交換器	プラント	温度	((())())	達成	()
軸継ぎ手	機構部品	回転力	((())())	保持	()
与える		Energy	((RCP)(RCP))	D	D
ヒータ	プラント	温度	((低温液体)(低温液体)	達成	()
心臓	人体	圧力	((血液)(血液))	達成	()
除く		純度	((SRC)(SRC))	D	((NoNeed ポート 除く物))
脱塩	プラント	純度	((海水)(海水))	維持	((NoNeed 海水の出口 食塩))
フィルタ	油圧回路	純度	((潤滑油)(潤滑油))	達成	((NoNeed 潤滑油の出口 ゴミ))

表2.1 各機能を表現するFTの組み合わせ

### 2.3 FBRLの説明タスタへの適用

筆者らは、FBRLで記述したモデルを説明生成タスクに適用することによって、その有効性を検討した。FBRLによって記述された機能モデルを利用することによって、さまざまなタイプの説明を実現することができる。本節では、モデルベースシステムに実装することが望ましいさまざまな説明に関する検討と、それぞれの説明の実現にFBRLがどのように貢献するかを述べる。

説明生成を検討するための視点として説明に利用するドメイン知識の質、説明を出力するタイミング、生成された表層文の自然さ、説明を受けるユーザへの適応などがあげられる。いずれも重要な視点であるが、本研究は最も基本的であるドメイン知識に注目し、対象の機能と振舞いを適切に捉えて記述し、説明生成に利用するための要素技術の研究開発をその目的としている。

#### 2.3.1 説明生成の枠組み

説明生成システムを含むモデルベースシステム全体の構成を、図2.5に示す。

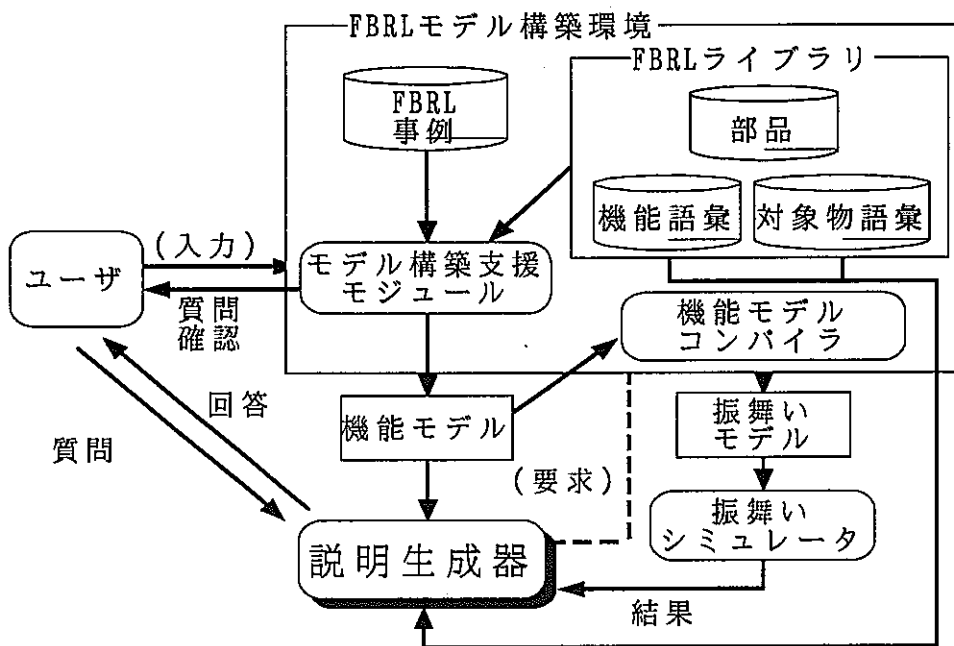


図2.5 説明生成システムの枠組み

まず、ユーザがタスクに応じて対象の機能モデルを構築する。機能モデル構築支援モジュールは、機能モデルのライブラリや機能モデルの事例などを利用してそれを支援する。

説明生成器は構築された機能モデルを用いて説明文を生成する。その際に、機能語彙や対象物語彙のライブラリを参照することによって、ユーザが記述したモデルに対して適切な機能語彙をマップし、それを用いて説明の表層文を生成する。我々の機能語彙に相当するものが従来の機能説明生成方式では対象モデルのインスタンスと直接にマップされており、我々のように機能語彙を独立したライブラリとして用意しておくような枠組みはなかった。

説明文生成のタイミングや方式にはさまざまなものが考えられるが、本研究では、ユーザがさまざまな要求を質問文の形式で入力するとそれにシステムが応えて説明文を生成する、という方式をとる。システムはあらかじめ、さまざまな種類の要求や質問に回答するためのテンプレートを準備しており、ユーザの要求や質問に応じて適切なテンプレートを検索し、必要に応じて対象のシミュレーションを行い、それらを統合して説明文を生成する。対象のシミュレーションをする必要が生じた場合、説明生成器は振舞いシミュレータに振舞いモデルと適当な初期値を与えてそれを実行させる。対象の振舞いモデルは、機能モデルコンパイラがFBRLで表現された対象モデルから生成する。

## 2.3.2 機能レベルの説明生成

FBRLに基づいて機能モデルを説明生成に適用することによって、振舞いモデルに基づく問題解決システムにとって困難であった機能レベルの説明の生成を実現することができる。StevensとSteinberg<sup>[2-4]</sup>は、説明タスクの分類を試みている。筆者らは、その分類を振舞いと機能の観点から再検討し、7通りの説明を実現するための機構と枠組みを設計した。本稿では、これらの一つである「システムを構成する部品の機能の説明」について述べ、FBRLの説明タスクに対する有効性を議論する。

## [1]システムを構成する部品の機能の説明

モデルベースシステムのユーザは、対象としているシステムや構成部品どうしの機能の関係に興味を示し、例えば図2.6に対して、次のような質問をすることがある。

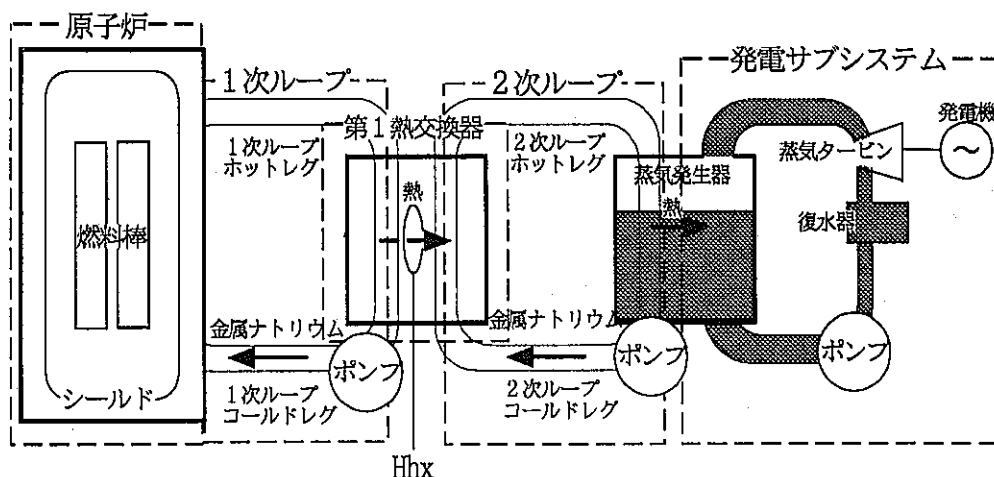


図2.6 原子力発電プラントのモデルの例

ユーザ> “原子炉” はどのように発電に貢献しているのか？

このような質問に対する望ましい説明とは、ユーザの質問中にある二つの機能どうし関係を機能レベルで説明するような回答であると考えられる。

## [2]望ましい説明の要件

ここで図2.6と非常に構成が似ている加圧水型原子炉、Pressurized-water reactor (PWR) の発電プラントにおける機能を実際に説明した文章の例を示す。なお、本節では原著が英文である説明文は翻訳して引用している。

説明文1: Pressurized-water reactor<sup>[2-5]</sup>

これは、最も単純な形式の原子炉で、…<中略>…1次系の冷却水はポンプによって循環させられている。炉心で吸収された熱エネルギーは、熱交換によって2次系に伝えられ、そこでタービンを動かすための蒸気を生成するために利用され、ター

ピンは電気を生成するために発電装置を起動させる。

説明文1は、PWRで発生した熱エネルギーがどのように発電に利用されるかを述べている。この例に見られるように、部品の機能についての望ましい説明とは、説明の対象である部品の入力は何であり、出力がどのような経路をたどり、他の機能の実現にどのように貢献するかを、機能の概念を表す語彙を適切に用いて述べるものであると捉えることができる。

### [3]機能レベルでの説明生成の困難さ

一般に振舞いの知識のみからこれらの要件を備えた説明を実現することは、少なくとも次の二つの理由から困難であると考えられる。第1の理由は、振舞いモデルを機能語彙へマップすることの困難さである。2.4節で述べたように、同じ振舞いをする部品であっても解釈時の視点を変えることによってその機能はさまざまに変わる。適切な機能語彙へのマップを行うためには、どのような視点からその振舞いを解釈したかという情報が必要になる。

第2の理由は、機能が別の機能に貢献する経路を一意に同定することの困難さである。振舞いの知識から、対象のパラメータ間の因果連鎖を生成することはできる。しかし、系の異なる二つの部品に関する機能を与えられたとき、その間の経路を表す因果連鎖は一般に複数存在し、一方の機能が他方の機能に直接的に貢献する経路を一意に同定することは困難である。例えば、図2.6において炉心で生成された熱エネルギーは、各ループを循環する冷却材の温度や流速、それらに加えられる圧力のほか、熱の伝達率など、さまざまなパラメータの影響を受けて発電機の発電に貢献する。さらに、パラメータ間には、ループ構造によるフィードバックを受けるものもあり、全体の因果連鎖は複雑なグラフを構成する。この因果連鎖のグラフから機能間の照応関係を表す経路を導出するには、各部品の機能がどのクラスのパラメータに着目しているのか、また、どの因果の系列に注目して機能を発揮しているのか、といった特別な知識が必要である。FBRLモデルを利用すれば、属性0-Focus、P-Focus、MP-Relations、QN-Relationsの値を参照することによって二つの機能のうち一方が他方に直接的に貢献する経路を導出することができる。

### [4]説明生成手順

図2.6の金属ナトリウムを冷却材とする原子炉を組み込んだ原子力発電プラントを対象として、構成部品である燃料棒の機能の説明を生成するタスクにFBRLモデルを適用することを考える。まず、モデル記述者がプラントのモデルを記述する。記述に際しては、個々の部品に対してそれが発揮する機能をすべてFT-Setsとして記述する。モデル構築の段階で、個々の部品の機能は系の目的に応じてある程度限定される。例えば、図2.6を主に熱エネルギーに注目して記述することによって、第1熱交換器の機能は、原子炉の熱を「除く」というものと、熱エネルギーを2次ループへ「伝える」というものの二つに限定される。



次に、図2.6の燃料棒の熱を生成する機能が発電機の電力生成機能に対してどのように貢献するか、すなわち、機能間の照応関係を導出する。はじめに、燃料棒が出力する熱エネルギーは、1次ループホットレグによって第1熱交換器に伝搬される。第1熱交換器が発揮し得る機能には、1次ループホットレグから出力されてくる熱エネルギーに注目するものが2通りある。一つは、1次ループを流れる流体から2次ループを流れる流体へと熱エネルギーを「伝える」機能、もう一つは1次ループを流れる流体から熱エネルギーを「除く」という機能である。このうち、熱エネルギーを「伝える」機能の注目する熱エネルギーは、O-Focus、P-Focusの記述から2次ループホットレグへ到達し、蒸気発生器の蒸気発生機能によって蒸気に乗せられ、蒸気タービンに伝えられることが推論される。蒸気タービンでは、伝搬されてきた熱エネルギーを原料として回転エネルギーを生成し、発電サブシステムの発電機能に必要な蒸気タービンの回転力の原料となる。一方、熱エネルギーを「除く」機能が注目する熱エネルギーは、そのP-Focusの記述から発電機の方ではなくそのまま原子炉へ戻っていくので、発電機能に直接貢献しているとはいえない。よって、燃料棒から発電機の発電機能へと直接貢献する経路における第1熱交換器の機能は、熱エネルギーを伝えることであると導出できる。

直接貢献する経路を導出することができれば、その経路に沿って説明を生成する。手順1に、複数のサブシステムの組合せによって階層的に表現されたシステムにおける部品Aの機能 $f_A$ が別のある部品Bの機能 $f_B$ にどのように貢献するかを述べる説明を実現するための手順の概略を示す。

手順1：二つの機能の関係を説明する手順

1. 説明対象部品の機能に注目する。初期値は機能 $f_A$ 。
2. O-Focus、P-Focus、MP-Relations、QN-Relationsの値を参照し、機能 $f_A$ と機能 $f_B$ の照応関係を同定する。機能 $f_A$ が機能 $f_B$ に貢献していなければ、それをユーザに示して説明終了。機能 $f_A$ が機能 $f_B$ に貢献していれば、次のステップへ進む。
3. 機能 $f_A$ を述べる。
4. ステップ5から7を、機能 $f_B$ に到達するまで繰り返す。
5. 説明対象部品を含む、最も小さなシステム $s$ を同定する。
6. システム $s$ に属し、説明対象部品と同じ階層に属し、かつ、機能 $f_A$ が機能 $f_B$ に貢献する経路に乗っているすべての部品について、その部品の機能を述べる。
7. システム $s$ と同じ階層に属し、システム $s$ に接続する部品を説明対象部品とする。

手順1によって生成される説明の表層文をより自然な表現に近づけるために次の戦略1を、さらに、流体系のドメインに限定して適用できると考えられる説明を簡略化するための戦略2を導入する。

#### 戦略1：自然な表現にするための戦略

説明しようとしている部品が対象物を出力するまでの機能の説明対は、「部品」を主語にする。それ以降「部品」から生成された対象物がどのようにシステム全体の機能に貢献するかを説明するときには、「対象物」を主語にする。

#### 戦略2：説明を簡略化するための戦略

説明する最初の部品の複数の出力のうち、次の部品にとって必要な対象物がどのような出力媒体に乗って出力されるかを説明する。必要な対象物が違う種類（ISAの値が異なる対象物）に変換されるまで、説明のステップを飛ばす（部品a、b、c、…、nを通過ととする）。

手順1、戦略1、戦略2に従って、燃料棒が発電機能にどのように貢献するかという説明を説明文2のように生成することができる。

説明文2：燃料棒は原子炉サブシステムで、熱エネルギーを生成します。生成された熱エネルギーは金属ナトリウムに乗って1次ループに出力されます。生成された熱エネルギーは1次ループ、第1熱交換器、2次ループを通り、発電システムで変換されて電力になります。

以上述べてきたように、FBRLによる対象の機能モデルを利用することによって、機能どうしの関係に必要な対象物の流れのみをシミュレートすることが可能になり、その結果を利用して機能語彙を用いた説明を生成することができる。

## 2.4 関連研究

[2-6]においてSembugamoothyらは、振舞いとは系の状態の系列であり、機能とは意図された望ましい状態を達成することであると捉えた。彼らの提案した枠組みにおいて、系の機能とは、系によって意図された役割を持つ個々の構成部品の機能と振舞いによって達成されるものであり、どのような振舞いの組合せによって系の機能が達成されるかという視点から機能の概念を捉えようと試みている。大規模な系を機能的にモデル化するためには、このように階層的な記述の枠組みは重要であると考えられる。しかし、1節で述べたとおり、彼らの枠組みではあるグレインサイズで振舞いモデルとして捉えられていたものが、異なるグレインサイズでは機能モデルとして捉えられる。よって、振舞いと機能の本質的な差を捉えてはいない。

FBRLは、システムの機能モデルをその副機能の集合体として捉えることにより、システムの階層的表現を実現しているが、Chandrasekaranらの機能の捉え方と異なり、システムやそのサブシステムを捉えるグレインサイズと機能の概念は無関係であり、システムの機能モデルを分解した結果は副部品の機能モデルを階層的に接続したものになる。逆に、振舞いモデルを分解、接続してできるものはグレインサイズの異なる

振舞いモデルであり、機能モデルではない。さらに、FBRLのほうが振舞いを解釈するためのプリミティブの種類が多く、機能と振舞いの差を説明する能力が高い。これは、5節で示す振舞い理解のタスクにおいて根本的な差となって現れる。

[2-6]の機能表現において、機能とは望ましい状態を達成 (To Make) するものとして記述されていた。Anne M. Keuneke<sup>[2-3]</sup>は、その機能を達成の方法や発揮されるための初期条件、持続する時間などの観点から四つに分類した。Keunekeは、ある機能として振舞いが解釈されるときには、振舞いに対して暗黙の仮定が与えられると考えてそれを捉えるための視点を分類し、記述するためのプリミティブを探すという姿勢を示している。この点で彼女の研究は、我々の研究と最も方針が近いものの一つと考えられる。

我々は彼女の分類した視点を再検討し、機能タイプを部品単独で認識できるもの（達成、維持、保持）と部品間の関係を参照することによって認識できるもの（制御、防止）の二つに大きく分けた。そして、前者をモデル記述者が部品ごとに属性値として与えるものとし、後者を部品のモデルからシステムが推論によって導出するものとして、機能表現見に組み込んだ。

A. Abu-Hannaらは、故障診断のコストを減らすことを目標として、対象の機能モデルを抽象度に応じて三つの階層に分けて記述する方式を提案している<sup>[2-7]</sup>。対象の振舞いを抽象化したり概念化したりすることと機能の概念は、密接に関わっていると我々も考えている。なぜなら、系や部品に対して与えられる目標というものは、振舞いを解釈することができるように、高い概念レベルで語られることが多いからである。FBRLは、目標状態を表現するパラメータとその関係を四つのFTの組合せによって表現できる。一方、[2-7]において抽象化のための視点は明示されておらず、この点で、我々の研究のほうが、完備性はいえないものの、抽象化、概念化を行うために必要な視点をより多く数え上げているといえる。

また、M. Pegahらは、[2-6]の機能表現の枠組みを大規模な系であるF/A-18の燃料系統に適用し、大規模な系の振舞いのシミュレーションとその理解を狙った。我々は、定性的にシミュレートすることが困難である部品間のネガティブフィードバックを含む大規模な系を対象とする故障診断システムに機能記述の方式を適用している。

説明機能に関しては、W. Swartoutらが、設計タスクを行うエキスパートシステムがユーザに提供する説明が含むべき情報の検討を行い、システムの出力の正当性、一般的な法則があるタスクのためにどのように特化されたか、システムが説明に用いる語句の意味、などをあげて、これらに関するユーザの質問に対話形式で解答するための枠組みを構築している<sup>[2-8]</sup>。ユーザに、エキスパートシステムが保持している知識とそれに基づく動作とを説明するための技法とその実現についての検討もなされている。これらの枠組みにおいて、ドメインのモデルが重要な役割を果たしていることはいうまでもないが、ドメインモデルが表現すべき情報が何であり、それがどのように表現されるべきであるかという議論が十分ではない。網羅的ではないが、本論文では説明タスクを分類し、特に機能レベルの説明生成に必要な知識とその表現にFBRLが貢

献することを示している。

## 2.5 むすび

本研究では、対象モデルを振舞いと機能の視点からドメインに依存せずに記述するための語彙、すなわち機能と振舞いのオントロジーについて検討し、その記述言語FBRLを設計した。PBRLは、対象の機能モデルを振舞いモデルと我々がFTと呼ぶ振舞い解釈のための情報の組合せとして表現することによって、対象モデルは振舞いのモデルと機能のモデルを明示的に分離して表現すべきであるという我々の要求を満たしている。さらに、記述のためのプリミティブとしては特定のタスクやドメインに依存しないものを収集したため、FBRLはさまざまなドメインにおける対象をさまざまな抽象レベルで記述することができる性質を持つ。

さらに、FBRLが説明タスクに貢献することを示すために、筆者らはFBRLモデルを利用する7種類の説明を生成する枠組みを設計した。PBRLの利用によって、モデルベースシステムは適切な機能や振舞いの概念を表す語彙による説明生成を実現できることを示した。

現在、FBRLと別途開発した診断システムの枠組みを、モデル構築の支援と説明生成の二つの面から融合させた枠組みの構築を進めている。説明生成に関しては、故障の発生とその影響を機能語彙によって説明するシステムのプロトタイプをCommon LISPによってインプリメントした。プロトタイプは、高速増殖炉のFBRLモデルとKCによる振舞いのシミュレーションの結果を参照して、どのような故障が発生し、その影響がどのように伝搬していくかを機能語彙を利用して説明する。

以上のように本研究では、ドメイン理解の基礎となる機能と振舞いの本質的な相違を「わかる」ことを目的として考察を進め、振舞いを解釈するための四つの視点を得た。機能モデル表現言語FBRLは、振舞いと機能の本質的な違いを明示的に表現し、機能レベルの説明生成タスクに貢献するという点で我々の当初の研究目的が達成されたことを示している。

この成果に基づく次のステップとして、機能と振舞いの違いを「わかる」ことが本質的に貢献するもう一つの課題である、対象の機能理解と再設計支援タスクの研究を計画している。

機能理解は二つのステップからなる。第1のステップは、対象の振舞いモデルと構造の知識に基づいて対象を構成する個々の部品の機能の候補を生成する。第2のステップは、生成された機能の候補を機能レベルで定義された公理系に基づいて検査し、対象の機能を同定する。第1のステップは、振舞いの知識を機能概念の空間へとマップするタスクであると捉えることができる。FBRLのFTは、有限個のプリミティブで機能の概念を表現する。よって、プリミティブを分類した軸の組合せで規定される機能概念の空間は有限の空間となり、ある振舞いモデルに対する解釈の候補も有限となる。しかし、de KleerやB.Chandrasekaranのように、明示的な解釈の軸を持たない表現形式ではこの機能概念空間が大きくなり、そのうえでの機能概念の探索は非常に困難になることが予想される。

第2のステップは、第1のステップでシステムに対して生成された機能の候補を検証し、最も意味のある機能、すなわち振舞いに込められた設計者の意図を同定する。その実現のためには、意味のある機能概念間の関係を整理し、機能の系列からそれを同定するための公理系をつくり、同時にFBRLの拡張を行う必要がある。現在のFBRLモデルは、システムを構成する個々の部品の機能が他の部品の機能にとって必要なものを出力し提供するという関係と、ある部品の機能が他の部品が異常状態に陥ることを防ぐという関係を表現できている。このほかにも機能どうしの関係には、ランキンサイクルの構成要素である過熱器のように、熱エネルギーを余計に与えることによって、タービンの回転エネルギーの生成効率を高めるものや、トランジスタのバイアス電圧の供給源のように、トランジスタを動作領域に入れて増幅機能を可能にする、というものもある。効率向上や機能の切換えをはじめとする機能間の関係を分類し、FBRL表現からそれらを導出するような公理系を整備することでFBRLの枠組みに基づく再設計支援システムを実現できると考えている。

## 2.6 参考文献

- [2-1] de Kleer, J. and Brown, J.S.: A qualitative physics based on confluences, *Artif. Intell.*, Vol.24, pp.783(1984)。
- [2-2] de Kleer, J.: How circuits work, *Artif. Intell.*, Vol.24, pp.205-280(1984)。
- [2-3] Keuneke, A. M.: Device representation: the significance of functional knowledge, *IEEE Expert*, Vol.24, pp.22-25 (April 1991)。
- [2-4] Stevens, A. and Steinberg, C.: A Typology of Explanations and Its Application to Intelligent Computer Aided Instruction, Report no.4626, Bolt Berenek and Newman Inc, 50 Moulton Street Cambridge, Massachusetts 02138(1981)。
- [2-5] Van Amarongen, C. and Amice, M.Sc.: How Things Work Volume II, Granada Publishing Limited(1972)。
- [2-6] Sembugamoothy, V. and Chandrasekaran, B.: Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem-solving systems, J.L.Kolodner and C.K.Riesbeck(eds), *Experience, memory, and Reasoning*, pp.47-73, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J.(1986)。
- [2-7] Abu-Hanna, A. benjamins, R. and Jansweijer, W.: Device understanding and modelling for diagnosis, *IEEE expert*, pp. 26-32(April 1991)。
- [2-8] Swartout, W. Paris, C. and Moore, J.: Design for explainable expert systems, *IEEE Expert*, pp.58-64(june 1991)。

## 第3章 原子力プラントの機能モデル記述言語の説明生成への応用の検討

### 3.1 はじめに

従来の対象モデルに基づいて診断や設計を行なうエキスパートシステムの多くは、対象の振舞いのシミュレーションに必要な知識のみをモデル化していた。筆者らは、さらに知的な処理を行うモデルベースのエキスパートシステムをより容易に構築することを目指して、(1)機能モデルの記述方法論の確立 (2)共有・再利用可能な知識の記述方法論の確立の2つの課題に取り組み、対象の機能モデルを記述するための言語FBRL (Function and Behavior Representation Language) を開発した。FBRLを用いた対象の機能モデルを利用することによって、モデル構築の支援、ユーザに対する高度な説明の生成、故障診断の制御など様々なタスクを支援できると考えられる。このうち本章では、高度な説明の生成の枠組みについて述べる。

### 3.2 機能モデル記述言語“FBRL”

筆者らは、新しい機能モデルの記述方法を提案し、その記述のための言語としてFBRLを設計した。本節では、その言語仕様の概要を示す。

FBRLは、対象の機能モデルを対象の振舞いをシミュレートするためのモデルへと変換することを実現し、それを用いた知的な故障診断や高度な説明を実現するための機能表現言語である。対象を構成する部品の機能モデルをオブジェクト指向に基づいて表現する。機能モデルは、対象の振舞いのモデルと振舞いを解釈するための付加情報からなり、振舞いのモデルは部品に入力される物質やエネルギーとそれらの間の関係からなる。

#### 3.2.1 対象物の記述テンプレート

部品に入力される物（入力物）や部品から出力される物（出力物）、部品内部に存在する物をまとめてその部品の対象物と呼び、図3.1のテンプレートに従って記述する。

Class Name:Compo-Obj

Attribute:

Name: 対象物のID  
 ISA: 対象物の属するクラス  
 例: 水、熱エネルギー、ナトリウム、etc  
 Params: 物理適パラメータの集合  
 E-Flag: 対象物がエネルギーであるときT  
 Location: 対象物が存在するポート: In、out、etc  
 Para-Relations: パラメータどうしの関係式  
 Phase: 対象物の相: Solid、Liquid、Gas  
 Sub-Objs: 対象物の構成要素である対象物  
 Sub-Relations: 対象物の構成要素の間に成り立つ関係

図3.1 対象物記述の為のテンプレート

一般の高速増殖炉の冷却系統は液体金属ナトリウムを循環させて発電のための熱エネルギーを運搬する。図3.2は、対象物クラスのテンプレートを用いて、「部品のポートIn1に存在する混合物(Obj3)、熱エネルギー(Heat Energy、Obj2)を運ぶナトリウム(Sodium、Obj2)」を記述した例である。

```
Name: Obj1
ISA: Sodium
Params: (Mass、質量) (Volume、体積) (Temp、温度) .....
E-Flag: F
Location: In1
Para-Relations:
Density*Mass=Volume
Specific Heat * Volume = Heat Capacity
.....
Phase: Liquid
Name: Obj2
ISA: Thermal Energy
Params: (Amount、量)
E-Flag: T
Location: In
Name: Obj2
ISA: Null
Params: (Mass、質量) (Volume体積) (Temp、温度) .....
E-Flag: F
Location: In1
Para-Relations:
Obj2. Amount=k*Obj1. Temp
Specific_Heat*Volume=Heat_Capacity
.....
Phase: Liquid
Sub-Objs: Obj1、Obj2
sub-Relations: Carry (Obj1、Obj2)
```

図3.2 FBRLによる「熱エネルギーを運ぶナトリウム」の記述例

対象物の記述においては対象物のパラメータ集合、即ちParams : とパラメータ間の関係、即ちPara-Relations : の記述が最も困難と考えられるので、その支援をする必要がある。パラメータ記述の支援方式として、他の比較的簡単に値を記述することが出来るスロットの値をキーにしてパラメータ集合を自動生成する。全ての物質には質量、物質質量、密度、速度、温度といったパラメータが考えられるが、シャフトや歯車のような固体は軸を中心とした回転運動という流体にはない運動の概念が考えられるので、それを表現するために角速度というパラメータを固体には与える必要がある。一方、流体にユニークなパラメータとしては、質量流量が挙げられる。このパラメータの自動生成は対象物の相 (Phase : ) をキーにすることで実現できる。

パラメータ間の関係式についても同様の支援が出来ると考えられる。例えば、ある一定の質量の物質が持つ熱エネルギーの量 $Q$ はその物質の温度Tempに比例すると考えられ、次式が成り立つ。

$$Q=k*temp$$

図3.2の場合、Obj2のISA : の値がThermal Energyであり、sub-Relations : を参照することによってObj1とObj2の関係が熱エネルギーとその媒体であることが推論できる。パラメータ変換公式のデータベースから熱エネルギーに関するものを検索し、各パラメータの意味 (パラメータ集合の各要素の第2項) を参照することによってこれら2つの対象物からなる混合物Obj3のPara-Relations : に

$$Objs.Amount=k*temp$$

を自動生成することが出来る。

一般の物質を表現するためのパラメータの集合やそれら間の変換公式は明文化されているものが多く[2]、これらをデータベースに格納し、対象物の他のスロットの値をキーに検索できるシステムを実現する事によってユーザの機能モデル記述を支援できる。

### 3.2.2 振舞いと解釈情報の記述

入力物と出力物の記述にそれら間の変換式を加えたものを対象の振舞いモデルとよぶ。さらに、振舞いを解釈するための付加情報を振舞いモデルに加えたものが対象の機能モデルである。

機能モデル記述のためのテンプレートを図3.3に示す。



Class Name : Comopnents  
 Attribute : 部品の対象物  
 MP-Relations : どの対象物がどの入力物からできたか  
 SameClass : 部品に固有のパラメータ  
 InherentParams : 部品のポート  
 QN-Relations : パラメータ間の関係式  
 Goal : 目標  
 FuncType : 機能のタイプ：達成・維持・防止・制御  
 Focus : 特定のクラスに対する注目の仕方  
 Needs : 特定のポートにおける対象物の必要性

図3.3 機能モデル記述のためのテンプレート

Objects : からQN-Relations : までの属性値が対象物の振舞いを、残りの属性値が振舞いを解釈するための情報をそれぞれ表現する。

図3.4は、本稿で説明の対象とする高速増殖炉の冷却システムのモデルである。原子炉で発生した熱は、1次系ループを通り、中間熱交換器によつて2次系ループに伝わり、2次系ループを通り、空気冷却器によつて大気中に放出される。

中間熱交換器が単位時間あたりに2次系ループに伝える熱エネルギーは、1次系ホットレグ冷却材と1次系コールドレグ冷却材の平均温度と、2次系ホットレグ冷却材と2次系コールドレグ冷却材の平均温度の差に比例する。1次系ループから2次系ループへ渡る総熱量は、単位時間あたりに2次系ループへ渡る熱エネルギーに比例し、冷却材の流速に反比例する。また、1次系ホットレグと2次系コールドレグの温度差は、1次系ループから2次系ループに渡る総熱量に比例する。中間熱交換器の目標は、2次系ホットレグ冷却材の温度を正常な温度に維持することであり、熱エネルギーに注目して主機能を発揮する。また、2次系ホットレグの熱エネルギーは、発電のために必要である。図3.4における中間熱交換器(IHX)の機能モデルは、図3.5のように記述される。なお、対象物は全て熱エネルギーを持ったナトリウムのインスタンスであるので、その記述を省略する。

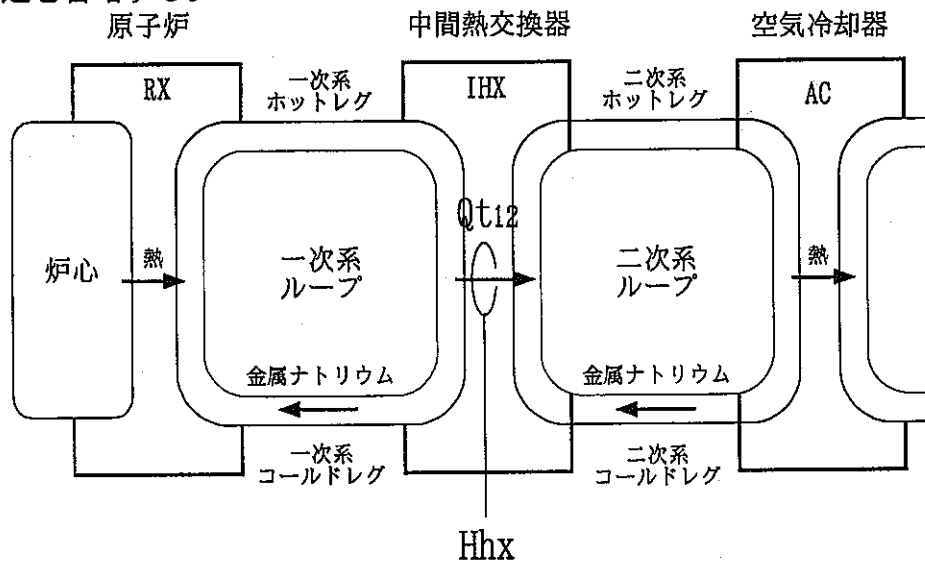


図3.4 冷却システムの概要

## Objects :

```

/* Obj1:1次側ホットレグ冷却剤*/
  [熱エネルギーを持ったナトリウムのインスタンス1]
/* Obj4:2次側コールドレグ冷却剤*/
  [熱エネルギーを持ったナトリウムのインスタンス4]
/* Obj7:1次側コールドレグ冷却剤*/
  [熱エネルギーを持ったナトリウムのインスタンス7]
/* Obj10:2次側コールドレグ冷却剤*/
  [熱エネルギーを持ったナトリウムのインスタンス10]

```

MP-Relations : MP ([Obj11], [Obj2, Obj5])

SameClass : Obj2=Obj11, Obj5=Obj11

InherentParams : (IHx, 熱伝達率)、(Qt12, 単位時間当たり伝熱量)

Ports : In1, In2, Out1, Out2

QN-Relations :

$$Qt12 = H_{ihx} * (1/2 * (Obj1.Params.Temp + Obj7.Params.Temp) - 1/2 * (Obj10.Params.Temp + Obj4.Params.Temp))$$

$$Qt12 / Obj1.Params.Velocity = Q1out$$

$$Qt12 / Obj4.Params.Velocity = Q2in$$

$$Q1out = Obj1.Params.Temp - Obj7.Params.Temp$$

$$Q2in = Obj10.Params.Temp - Obj4.Params.Temp$$

Goal : G (Obj10. temp=[0])

FuncType : ToMaintain

Focus : Focus (Thermal Energy)

Needs : Needs (Out2, Thermal Energy)

図3.5 FBRLによる熱交換器の機能表現

### 3.3 機能モデルの説明タスクへの応用

対象の振舞いのシミュレーションは様々なタスクにおいて利用されている。例えば診断では、対象に故障や病気などの外乱が与えられた結果としてどのような兆候が現れるかを推論するために用いられる。このような振舞いのシミュレーションの結果をエキスパートシステムはユーザに説明する必要がある。しかし、筆者らが研究開発を行っているKC-IIIをはじめとして従来のエキスパートシステムの多くは対象の振舞いの知識のみに基づくモデルを用いて前述のシミュレーションを行なってきたため、システムは次のような対象の状態を表すパラメータ集合の値の組合せがどのように推移していくかを述べるような説明しか生成できない。

「炉心の温度が異常に高くなる故障が起こり、1次系ホットレグの冷却剤の温度が異常に高くなり、中間熱交換器において1次系から2次系に伝播する熱量が異常に大きくなり、2次系ホットレグの冷却剤の温度が異常に高くなり、…」

各部品の機能、即ち入出力関係の意味を熟知している者でなければ、このような説明を解釈し理解するができない。以下では、FBRLによる対象の機能モデルを利用することによって、故障診断システムが対象の振舞いとその意味を述べるような説明を生成できることを示す。

## 3.3.1 機能モデルを利用した説明の枠組

図3.6に機能モデルを利用した、説明生成システムの枠組を示す。

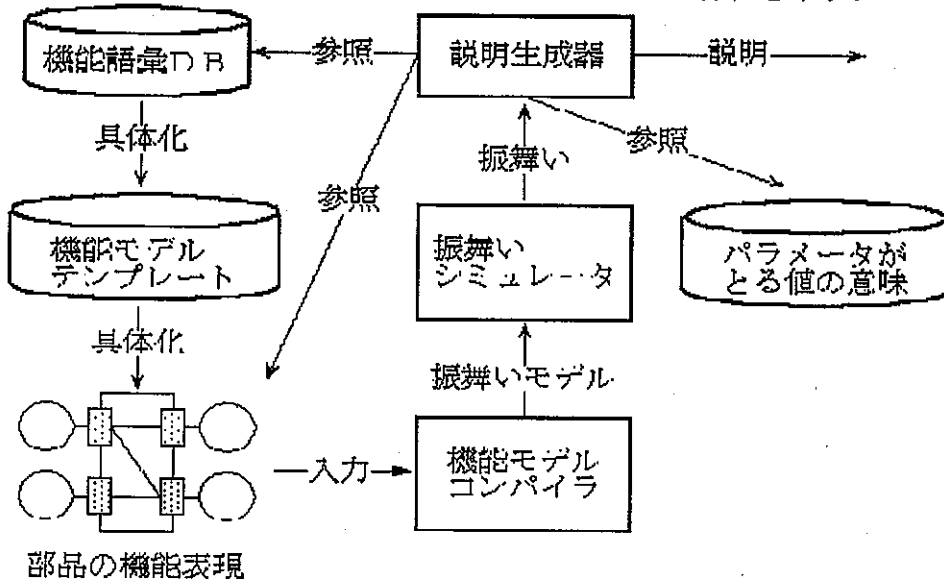


図3.6 説明生成システムの枠組み

まずユーザは、ポンプやパイプなどの機能モデルの事例を修正することによって対象の機能モデルを記述する。適当な例がない場合は、「伝える」「与える」などのより抽象的な機能語彙を表現する機能モデルを具体化することによって記述する。原則として機能モデルは機能語彙と結び付いている。例えば前述した熱輸送系における熱交換器の機能モデルは、「 $\text{ }^{\circ}$ 」を「伝える」という機能語彙と結び付いている。

次に、後述する対象の振舞いのシミュレーションにおいて用いられる各パラメータが「とる値の意味」を記述する。例えば筆者らが以前開発したシステムでは、パラメータがとる値は[0][+][-]の3種類であり、それぞれ正常、異常に大きい、異常に小さい、という意味に対応する。

機能モデルコンパイラは、ユーザのFBRLによる機能表現を振舞いのシミュレーションを行うために必要な表現に変換する。これを用いて振舞い推論エンジンは対象の振舞いをシミュレーシ、対象に与えられた入力から系がある状態に到達するまでの状態の系列を生成する。

説明生成エンジンは、振舞い推論エンジンが生成した対象の振舞い、ユーザが記述した機能モデル、パラメータの意味、および機能語彙のデータベースを参照して、対象の系に与えられた外乱から系が最終的に安定するまでの振舞いをユーザに対して説明する。

### 3.3.2 機能モデルに基づく2種類の説明

故障診断のためのシミュレーションには、次の2種類の説明が必要であると考えられる。

(1)初期状態の系に与えられた入力の説明。

(2)パラメータの変化が伝播してゆき過程の説明。

なお本稿では、(1)を初期状態の説明、(2)を伝播の説明と呼ぶ。

初期状態の説明とは、系または部品に対して与えられた入力の意味である。故障診断システムの場合、その生成のためのテンプレートを次のように定める。

「(故障原因パラメータ)が(異常値)になったため、(目標)を(機能タイプ)することが出来なくなった。よって、(必要な対象物)に(機能語彙)(注目しているクラス)が(異常値)値になる。」

また、伝播の説明は、

- ・注目している部品への入力
- ・注目している部品の機能
- ・注目している部品の最終状態と出力

からなると捉えられ、次のテンプレートに従って生成する。

「(伝播元の部品名)から伝播した(対象物)に(部品名)は(注目しているクラス)を(機能語彙)。すると、(パラメータとその値1)、(パラメータとその値2)....となり、(接続部品名n)に(伝播するパラメータとその値1).....(伝播するパラメータとその値x).....(伝播するパラメータとその値y)が伝播する。」

### 3.3.3 説明生成の例

図3.4において、中間熱交換器の熱伝達率が低下すると高温側である1次系ループから低温側である2次系ループに熱が伝わらなくなり、2次系ホットレグの温度は異常に低くなり、1次系コールドレグの温度は異常に高くなる。この故障に関する振舞いのシミュレーション、ユーザが記述した機能モデルと機能語彙、パラメータの値の意味を参照し、前述のテンプレートを利用して、次のような初期状態の説明を生成することが出来る。

「(Hihx)が(異常に小さい)値になったため、(2次系ホットレグ温度=正常)を(維持)することが出来なくなった。よって、(2次系ホットレグの冷却剤)に(与える)(熱エネルギー)が(異常に小さい)値になる。」

また、前述の中間熱交換器の熱伝達率低下の影響は、冷却剤に熱エネルギーを与える部品として機能表現される原子炉と、空気冷去却器に伝播する。中間熱交換器熱伝達率低下の影響を受けた原子炉についての伝播の説明は、前述のテンプレートを用いて次のように生成できる。

「(中間熱交換器)から伝播した(ナトリウム)に(原子炉)は(熱エネルギー)を(与える)。すると、(炉心平均温度、[+])、(単位時間に1次系に渡る熱量、

[0]) となり、(1次系ループ)に(ホットレグ温度、[+])が伝播する。」

以上のように、機能モデルを利用することによって、対象の振舞いだけでなくその意味も述べるような説明を生成することが出来る。

### 3.4 むすび

本章では機能モデル記述言語FBRLによる機能モデル記述方式を提案し、その説明タスクへの適用について述べた。現在、本章で述べたような機能モデル記述の支援のために、対象物を表現するためのパラメータ集合やパラメータ間の関係式の抽出を行っている。また、機能語彙による機能モデルの検索を実現するために、より多くの機能モデルと機能語彙の組合せを蓄積することが必要である。さらに、機能モデルを利用して生成した説明ものの質を評価するためには、説明タスクを分類し、どのレベルの説明が実現できたのかをみきわめる必要がある。

### 3.5 参考文献

[3-1]小泉袈裟勝。単位の辞典。ラティス株式会社。改訂4版(1992)。

## 第4章 機能モデル表現言語を用いたプラント挙動説明生成システムの開発

### 4.1 FBRLを利用した説明生成システム

筆者らは従来のエキスパートシステムの多くが利用していなかった対象の機能をモデル化することを目標として機能と振舞いの概念に関する検討を行なってきた。そして、タスクに依存せずに機能モデルを表現することを目標として機能モデル表現言語FBRLを設計した。

FBRLによって記述された機能モデルを利用することによって様々なタイプの説明を実現することが出来る。本節では、エキスパートシステムに実装することが望ましい様々な説明に関する検討と、それぞれの説明の実現にFBRLがどのように貢献するかを述べる。

#### 4.1.1 説明生成の枠組

説明生成システムを含むエキスパートシステム全体の構成を、図4.2に示す。

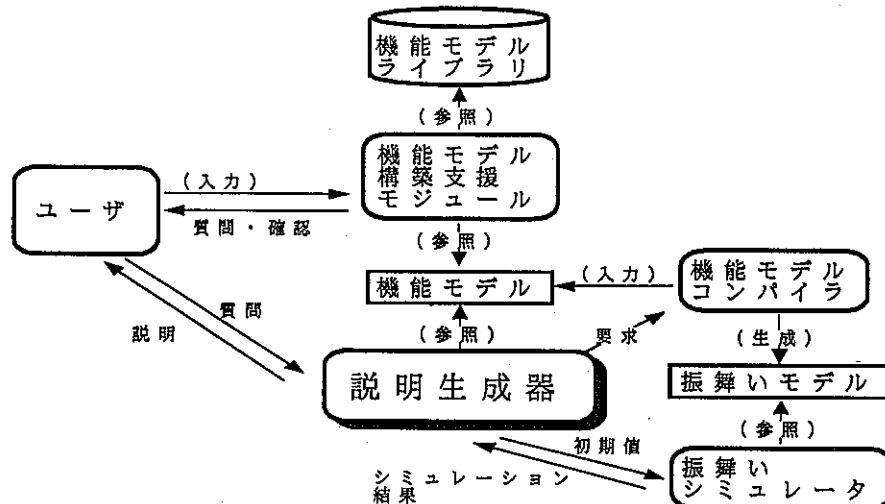


図4.2 説明生成システムを組み込んだエキスパートシステム

まず、ユーザーが対象の機能モデルを構築する。機能モデル構築支援モジュールは、機能モデルのライブラリや機能モデルの事例データベースを利用してそれを支援する。

説明生成器は構築された機能モデルを用いて説明文を生成する。説明文生成のタイミングや方式には様々なものが考えられるが、本章ではユーザーが様々な要求を質問文の形式で入力するとそれにシステムが応えて説明文を生成するという方式について述べる。システムはあらかじめ、様々な種類の要求や質問に回答するためのテンプレートを準備しており、ユーザーの要求や質問に応じて適切なテンプレートを検索し、必要に応じて対象のシミュレータを行ない、それらを統合して説明文を生成する。対象のシミュレートをする必要が生じた場合、説明生成器は振舞いシミュレータに振舞いモデルと適当な初期値を与えてそれを実行させる。対象の振舞いモデルは機能モデルコンパイラがFBRLで表現された対象モデルから生成する。

#### 4.1.2 機能モデルを利用した説明の実現

機能モデルを利用することによって、様々な説明を実現することができる。本節では次の4つのタイプの説明をとり上げた：(1)一般の部品の機能の説明 (2)防止部品の説明 (3)説明の詳細化 (4)故障の発生の説明。これらについて構造を解析し、その実現にFBRLが貢献することを示す。

##### 4.1.2.1 部品の機能とシステムの関わり(1)

エキスパートシステムのユーザは、対象としているシステムや構成部品の機能に興味を示すことがある。そのようなユーザは次のような質問をすると考えられる。

ユーザ>”原子炉”はどのように機能を発揮するのか？

このような質問に対しては、対象を機能レベルで説明するような回答を提示すべきであると考えられる。ここで実際に、加圧水型原子炉Pressurized-water reactor (PWR) の発電プラントにおける機能を説明した文章の例を示す。なお、本節では原著が英文である説明文は翻訳して引用している。

##### 説明文3.1: Pressurized-water reactor

これは、最も単純な形式の原子炉で、水が冷却剤と核分裂で生成される中性子の速度を殺すモデレーターの、両方の役割をはたす。・・・<中略>・・・1次系の冷却水はポンプによって循環させられている。炉心で吸収された熱エネルギーは熱交換によって2次系に伝えられ、そこでタービンを動かすための蒸気を生成するために利用され、タービンは電気を生成するために発電装置を起動させる。

説明文3.1の後半では、PWRで発生した熱エネルギーかどのように発電に利用されるかを述べている。この例に見られるように、部品の機能の説明とは、説明の対象である部品の入力は何であり、出力がどのような経路をたどり系全体の機能の実現にどのように貢献するかを、機能の概念を表す語彙を適切に用いて述べるものであると捉えることが出来る。

振舞いの知識のみからこれらの説明を実現することは一般に困難である。振舞いの知識から、対象のパラメータ間の因果連鎖を生成することは出来る。しかし、系の主機能として入力と出力を与えられた時、その間の経路を表す因果連鎖は一般に複数存在し、どれが主機能を表現しているかを同定することは困難である。例えば説明文3.1が説明しているPWRが組み込まれた発電システムの主機能が達成されるまでの経路を考える。炉心から生成された熱エネルギーは各ループを循環する冷却材の温度や流速、それらに加えられる圧力の他、熱の伝達率など、様々なパラメータの影響を受けて発電機の発電に貢献する。さらにパラメータ間には、ループ構造に

よるフィードバックを受けるものもあり、全体の因果連鎖は複雑なグラフを構成する。この因果連鎖のグラフから主機能を表す経路を導出するには特別な知識が必要である。FBRLのスポットFocusとNeedsは個々の部品が注目しているパラメータや機能の達成に貢献するパラメータを表現することか出来るので、後述するように主機能を表す経路に沿った説明の実現に貢献する。

また、発電プラントに組み込まれている蒸気発生器と表1で述べたラジエータは、高温の流体と低温の流体の間での熱交換という同じ振舞いを行う部品である。一般に前者は低温の流体、即ち水に熱エネルギーを「与える」機能であると解釈され、後者は高温の流体、即ちエンジン冷却材から熱エネルギーを「奪う」機能であると解釈される。このような解釈の差を生み出す知識は2節で述べた通り部品の振舞いの知識ではない。このような解釈の差を説明に反映させるには機能モデルを用いることによって、部品のモデルを適切な機能語彙に対応づけることが必要となる。

次に、部品の機能の説明を実現するための手順を述べる。ある部品の機能を説明する場合、その部品と同じシステムの同じ階層に属している部品の機能を連続的に述べる。ただし、FocusやNeedsに基づいて主機能の流れに沿っていない部品については機能を述べない。そして、その階層での説明が終了したら、次は連結している1つ上位の階層のシステムの機能を述べる。以下、システム全体の出力に到達するまで、この手順を繰り返す。図4.3を例としてこの手順について述べる。



図4.3 階層的な機能モデルの概念

図4.3において、システム全体の機能は部品A、B、Cの機能に分解され、さらにA、B、Cそれぞれ部品の機能が $A_k$ 、 $B_l$ 、 $C_m$  ( $k, l, m$ : 正の整数) で表される部品の機能に分解されるものとする。Aの構成部品である $A_1$ の機能を説明することを考える。その実現の手順は、次の通りである。

- 1)  $A_1$ の機能を述べる。
- 2)  $A_1$ の出力のうち、「次の部品にとって必要である」と表現されているものを入力とする部品、ここでは $A_2$ の機能を述べる。
- 3) 部品Bの機能を述べる。
- 4) 部品Cの機能を述べる。
- 5) 系全体の出力に到達したので説明終了。

さらに、説明をより自然な表現に近付けるために、次の戦略を採用する。

戦略3.1 説明しようとしている部品が対象物を出力するまでの機能の説明文は、「部品」を主語にする。それ以降「部品」から生成された対象物がどのようにシステム全体の機能に貢献するかを説明する時には、「対象物」を主語にする。

以上述べてきた手順と戦略3.1に従って図4.4の金属ナトリウムを冷却材とする原



子炉を組み込んだ原子力発電プラントを対象として、構成部品である燃料棒の機能の説明を生成すると、説明文3.2のようになる。

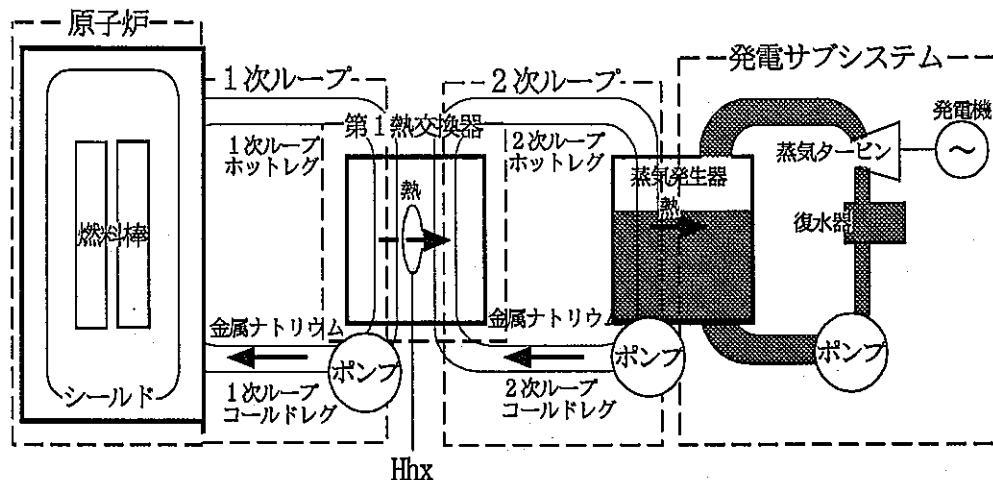


図4.4 原子力プラントのモデルの例

### 説明文3.2：図4.4の燃料棒の機能

燃料棒は、原子炉サブシステムで、熱エネルギーを生成します。

生成された熱エネルギーは金属ナトリウムに乗って1次ループに出力されます。

熱エネルギーは1次ループによって第1熱交換器の金属ナトリウムに伝えられます。

熱エネルギーは第1熱交換器によって2次ループの金属ナトリウムに伝えられます。

熱エネルギーは2次ループによって発電サブシステムの水に伝えられます。

熱エネルギーは発電サブシステムによって電力に変換されます。

説明文3.2の第3文以降を見てみると、熱エネルギーは発電サブシステムまで別の種類のエネルギーに変換されていないことが分かる。熱エネルギーを主に扱う流体系のドメインでは、冷却材を循環させるループや異なったループの間での熱伝達を行なう熱交換器のような機能的側面から見れば熱エネルギーを伝えるだけで熱エネルギーの変換に影響しない部品がシステムに組み込まれていることが多い。このような場合、注目している部品から出力された熱エネルギーが通る部品の機能を述べるのが説明の受け手に対して有益な情報を与えるとは考えにくい。そこで、流体系のドメインに限定して、次の回答簡略化戦略を適用し、有益でない情報を削除する。

**戦略3.2** 説明する最初の部品の複数の出力のうち、次の部品にとって必要な対象物がどのような出力媒体に乗って出力されるかを説明する。必要な対象物が違う種類（ISAの値が異なる対象物）に変換されるまで、説明のステップを飛ばす。

（部品 a、b、c.....nを通過とする）

戦略3.2の採用によって、前述の燃料棒の説明文3.2を次のように簡単にすることができる。

説明文3.3 燃料棒は原子炉サブシステムで、熱エネルギーを生成します。生成された熱エネルギーは金属ナトリウムに乗って1次ループに出力されます。生成された熱エネルギーは1次ループ、第1熱交換器、2次ループを通り、発電サブシステムで変換されて電力になります。

以上、述べてきたように、FBRLによる対象の機能モデルを利用することによって、システムにとって必要な対象物の流れのみをシミュレートすることが可能になり、その結果を利用して機能語彙を用いた説明を生成することが出来る。

#### 4.1.2.2 部品の機能とシステムの関わり(2)

プラントを構成する部品には、逃し弁のように、そのプラントを構成する他の部品が望ましくない状態に移行するのを防ぐ機能を持つものもある。次にあげる例は、油圧回路の内圧が閾値を越えるのを防止する逃し弁の機能を説明した例である。

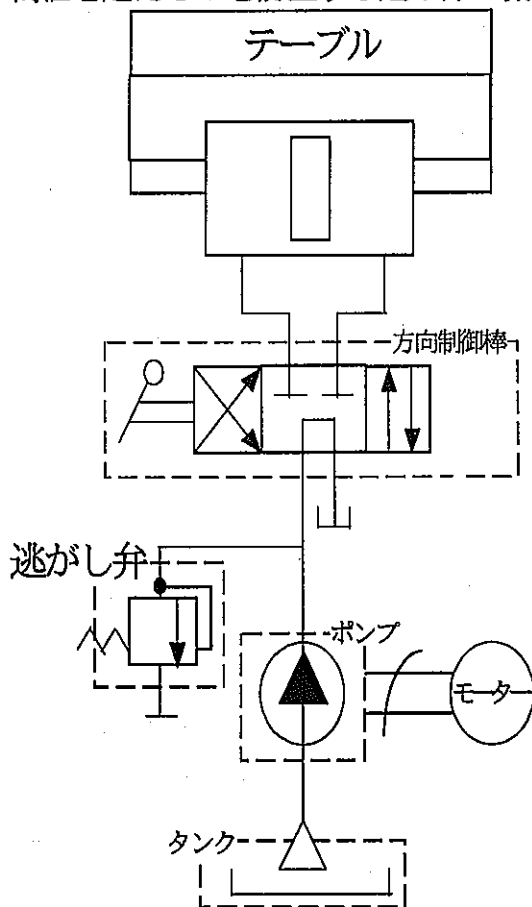


図4.5 逃し弁を含む油圧回路

#### 説明文3.4 : 圧力制御弁1

図4.5で、もしシリングが油圧に押されて、行きつくところまで行って、そこでストップしたとしましょう。このまま放っておく、つまり油かどどん送り込まれようが、知らぬ顔でいたらどうなると思いますか。なにしろ、すごい力持ちの油で

す。ポンプが止まらない以上、油による圧力はどんどん高まっていく計算になるでしょう。その圧力に耐えているうちは、ナニゴトも起こりませんが、どこかに弱いところがあったら、イヤ、なくても同じことです。ついには爆発してしまうこと、ウケアイです。そこで、爆発しないように油の逃げ道を作らなければなりません。この逃げ道を逃し弁とか安全弁とかいいます。

説明3.4は、逃し弁の機能を説明するために、まず逃し弁がない状態で何が発生するかをシミュレートしている。その結果として油圧回路の内圧が異常に高くなり、どこかで爆発が発生することを結論づけている。この説明3.4には、次の3つの知識が利用されている。

- 1) 逃し弁がない時のシステムのモデル
- 2) 逃し弁が起動する状態とその意味
- 3) 逃し弁が防ぎべき状態とその意味

逃し弁の振舞いは、圧力がある値を越えたら動作モードを切り替えて余分な油を逃すというものになる。逃し弁が油圧回路の状態に応じて振舞いを切替えることには設計者が想定した望ましくない状態を防ぐ、という意味が暗黙的に表現されている。しかし振舞いモデルからはそれを読みとることは出来ない。FBRLの機能モデルは部品が到達するべき望ましい状態を目標状態 (Goal) として表現し、その状態に部品かどのような指向性によって到達するかを機能タイプ (FuncType) として明示的に表現する。即ち、FBRLは逃し弁や原子炉格納容器のように防止機能をもった部品の振舞いに設計者が込めた意図を表現しているといえる。よって、FBRLによって表現された機能モデルはそのような意図を表現する説明に貢献する。

逃し弁を含む、一般の防止機能を持った部品の機能を説明するための戦略を示す。

### 戦略3.3

- ① 防止部品の目標状態の否定を表すパラメータ集合と値の組合せを生成する。
- ② 手順1で生成されたパラメータ値をシステム全体に電播し、シミュレーションを行う。
- ③ シミュレーション結果を元に、説明を生成する。テンプレートは次の通り。  
もし、(防止部品名)がなかったらどうなるでしょう？(防止部品名)がなければ、系が(防止部品のGoalの否定)になったときに、(Goalが否定された状態の影響を受ける部品1)が(部品1のシミュレーションの過程)。その結果、(部品1のシミュレーション結果)、または、(Goalが否定された状態の影響を受ける部品2)が(部品2のシミュレーションの過程)。その結果、(部品2のシミュレーション結果)、または、

.....

(部品nのシミュレーションの過程)。その結果、(Goalが否定された状態の影響を受ける部品n)が(部品1のシミュレーション結果n)となってしまいます。このような状態に系が陥るのを防止するのが(防止部品名)の機能です。

なお、防止部品の説明を実現するために、故障解釈知識（IW）と呼ばれる知識を利用する。IWとは、抽象度の高い言葉で表現された故障を解釈してパラメータレベルの表現に変換する故障解釈知識（IW：Interpretation World）のことであり、[4-1]はIWを用いた故障診断の枠組について論じている。

図4.5の油圧回路で、次のように各部品の知識が与えられていたとする。IWと表現されているのは故障解釈知識に分類される知識である。

```

逃し弁Goal : G (圧力 $P_i < P_{\text{threshold}}$ )
パイプIW = if 圧力 $P_i \geq P_{\text{threshold}}$  then 破裂する
ポンプ負荷 =  $k * \text{圧力} P_i$ 
ポンプ駆動電力 =  $l * \text{負荷}$ 
IW : if ポンプ駆動電力 > ポンプ駆動電力threshold then 電気回路焼き切れる

```

説明文3.5 もし、逃し弁がなかったらどうなるでしょう？逃し弁がなければ、系が圧力 $P_i < P_{\text{threshold}}$ になったときに、パイプが圧力 $P_i$ が $P_{\text{threshold}}$ 以上になる。その結果、破裂する。または、ポンプが負荷が異常に高くなり、ポンプ駆動電力がポンプ駆動電力thresholdを越える。その結果、電気回路焼き切れるとなってしまいます。このような状態に系が陥るのを防止するのが逃し弁の機能です。

#### 4.1.2.3 説明の詳細化

エキスパートシステムのユーザは、大規模なシステムの機能がどのように実現されているのかに興味を持つと考えられる。あるシステムの機能をより詳細に述べるには、そのシステムを構成する部品の機能を連結して述べれば良い。

図4.4の発電サブシステムの機能をより詳細に述べると、説明文3.6のようになる。

説明文3.6 蒸気発生器は熱エネルギーを水に与えて水蒸気を生成します。蒸気タービンはその水蒸気の持つ熱エネルギーから回転力を生成します。発電機はその回転力から電力を生成します。

逆に、部品の機能の連続として述べた説明を簡単に述べるには、その機能の連続によって達成されるスーパーシステムの機能を述べればよい。

#### 4.1.2.4 故障の発生

システムの構成部品の1つが故障状態に陥った場合にどのような兆候が現れるか、という知識は故障診断エキスパートシステムにとって重要なものの1つである。部品の故障状態は、機能が否定された状態として捉えることが出来る。FBRLの機能モデル表現を否定すれば故障状態を表現することか出来る。

1.2.2節で述べたIWを用いて故障診断の枠組に機能モデルを適用することによって、

次のような故障の発生とその影響の伝播を述べるような説明を実現することができる。

#### 戦略3.4

- 1) 1Wの知識を用いて、ユーザが入力した故障の解釈を行なう。
- 2) 故障の発生から異常が伝播していく過程をシミュレートする。
- 3) 故障の発生を機能の否定として述べる。

戦略3.4を、図4.4の機能モデルにおける第1熱交換器のパイプが汚れた、即ち第1熱交換器の熱伝達効率が低下したという故障の発生の説明に適用すると、説明文3.7のようになる。

説明文3.7 第1熱交換器熱伝達率が異常に低下します。すると、2次ループホットレグ温度を正常に維持することが出来なくなります。その結果、第1熱交換器が2次ループの金属ナトリウムに与える熱エネルギーの量が異常に小さくなります。その結果、2次ループホットレグ温度が異常に低くなります。2次ループは蒸気発生器に熱エネルギーを伝えます。その結果、蒸気発生器の2次ループ側入り口温度が異常に低くなります。蒸気発生器は熱エネルギーを水に与えて水蒸気を生成します。その結果、水蒸気の温度が異常に低くなります.....

<以下略>

このような故障の説明を与えられることによって、ユーザは故障原因から異常な出力が生成された理由を知ることが出来ると考えられる。

#### 4.1.3 振舞いの知識を利用した説明

説明には振舞いの知識のみを利用すれば十分生成できるものもある。本節ではそのうち3つをとり上げた。以下、それらを実現する方針を述べる。

##### (1) 出力値が生成された理由

ある出力値がなぜ生成されたかという説明は、その出力値を生成した部品の振舞いのシミュレーション結果のうちその出力値を生成した部分を切り出してユーザに提示すれば良い。

##### (2) 期待された出力値が生成されなかった理由

多くの場合、期待された出力値はある知識に基づいて棄却されている。そこでこの説明を生成するには、振舞いのシミュレーション結果のうち出力値を棄却した部分を提示すれば良い。

##### (3) 仮の入力値に基づくシミュレーション

故障その他の理由で異常な入力を与えられた時に、どのような結果になるかを説明する場合である。異常な入力値を与えて振舞いのシミュレーションを行い、結果を提示すれば良い。

## 4.2 むすび

本章では筆者らが開発してきた機能モデル記述言語FBRLによる機能モデル記述方式を概説し、その説明タスクへの適用について述べた。説明文の実例を解析し、FBRLがその実現にどのように貢献するかを考察することによって、説明タスクと機能モデルとの関係について考察を行なった。

機能モデルを利用して生成した説明の質を評価するためには、説明タスクを分類し、どのレベルの説明が実現できたのかを見極める必要がある。そのために現在、さらに多くの種類の説明文を分析し、機能モデルがその実現にどのように貢献するかを検討中である。また、本章では流体系のプラントに関する議論を行なってきたが、電気回路をはじめとする他のドメインにおける考察も行なう必要があると考えている。

## 4.3 参考文献

[4-1]山口、溝口、中村、小澤、鳥越、野村、角所。対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラIIの構築と評価。人工知能学会誌、7(4):663-674、July 1992。

## 第5章 モデルに基づく問題解決のための流体系と時間の言語体系の構築

### 5.1 まえがき

定性的モデリング技法と振舞いの定性推論技術は、モデルに基づいた問題解決の基礎として期待されている<sup>[5-1]</sup>。筆者らも従来からモデルに基づく故障診断エキスパートシステムに関する研究を進めてきた<sup>[5-2]</sup>。問題解決システムのための基礎技術として見た場合、従来行われてきたモデルの記述様式や推論技法に関する研究とともに、モデルに記述すべき知識の内容に関する議論が必要である。モデルベースシステムのDesign rationale（設計意図）の明示的記述である対象オントロジーを記述することで、内容に関する議論が可能になる。対象オントロジーは、対象を捉える際の仮定や決定を明らかにするための「語彙」を提供し、推論エンジンが解くべき問題のクラスや要求仕様を表す「能力記述」を定義する。

本章では流体系に関する対象オントロジーを記述することを通して、対象のモデルに基づく問題解決においてモデルに記述すべき知識の内容について検討する。特に、系の振舞いにおける因果関係を捉えるために基本的な因果性と時間のオントロジーを明らかにする。提案するオントロジーは「何をモデルに記述しておくべきか」、「対象のモデルはどのような性質を持つべきか」、「因果関係を明らかにするために有用な時間概念はどのようなものか」といったことがらを明確にする。オントロジーに対する合意には方法論、内容、用語、公理化の四つのレベルがある。本オントロジーは公理集合による記述に向けた概念の整理が終了した段階であり、本章は概念の内容と用語に対する合意を目標としている。

オントロジーの構築にあたって、まずオントロジーの能力の評価軸を定める必要がある。本章では「因果的説明」、「知識の再利用性と記述の容易さ」、「曖昧さの抑制」の三つに着目している。第1の条件は対象の系の振舞いを認知的な因果性に基づいて説明する能力である。つまり、系の振舞いにおける変化の因果的順序を決定することが必要である。第2に対象オントロジーは再利用可能でなければならず、知識のcomposabilityを維持する必要がある。第3の条件では、実用規模の対象に対して適用できるように推論結果の曖昧さを減らすことが望まれる。

以上の評価軸に沿った対象オントロジーを構築する際には、因果性と因果的な時間について検討する必要がある。次章では、それらについての議論を通して、捉えるべき因果的性質と時間のオントロジーを示す。それらを満たす対象オントロジーとして、3章でプラントなどの流体系に関するオントロジーについて述べる。次に4章でオントロジーのモデルの記述様式を示す。外乱が起こったときの系の振舞いの推論方式について、5章でその能力について述べ、6章で詳細な方式を示す。次に、本オントロジーに基づいた実際のプラントのモデル化と推論の例として、7章で原子力プラントのモデルと専門家の行うものと一致した推論結果の一部分を示す。8章で関連研究との比較を行う。

## 5.2 部品に基づいた因果性と時間

知識の再利用と因果認識の単位としての記述プリミティブは対象オントロジーの根幹である。定性推論の研究において、プロセスに基づくもの<sup>[5-3]</sup>と部品（デバイス）に基づくもの<sup>[5-4]</sup>が提案されている。本章の目的である流体系に関するオントロジーには部品の概念が重要であると考えられるので、本章では部品に基づくオントロジーについて議論する。部品の挙動は物理パラメータの集合で記述されるものとする。以下の節では、部品の因果性と因果的な時間の認識について議論し、部品を単位とした因果関係を導出する能力を持つオントロジーが備えているべき要件と時間のオントロジーを示す。

### 5.2.1 因果的性質の明示的記述

通常の定性推論<sup>[5-6]</sup>におけるモデリングは（定性的な）数学的制約式を中心としているが、数学的制約式だけでは因果関係を表現することはできない。特に、平衡式は因果関係を表現していない<sup>[5-6]</sup>。さらに、部品には固有な因果的性質があり、一般的法則のみからそれらを導くことは難しいと考えられる。したがって、対象オントロジーには何らかの因果的性質の明示的記述が必要である。

本オントロジーでは因果的性質を物理パラメータの因果的役割に対する制約と捉える。因果的役割には「原因」と「結果」があり、何らかの理由により制約されて、パラメータが因果的役割を果たす可能性が事前に決定されていると考える。したがって、因果的性質としてパラメータの果たす可能性のある因果的役割（原因になれる、結果になれない等）を記述する。記述を「因果指定」と呼ぶ。因果指定は起こり得るすべての因果関係をグラフとして記述するのに比べてパラメータへの分解性が高く、記述が容易である。

### 5.2.2 局所性と状況独立性

因果的性質の明示的記述にあたっては、知識のcomposabilityを維持するために局所性（locality）と状況独立性（context-independency）を満たしている因果的性質を捉える必要がある。No-Function-In-Structure原則<sup>[5-4]</sup>は部品の機能が状況に依存しがちであることを指摘し、機能記述の分離の必要性を述べている。筆者らは機能と振舞いは本質的に異なると考えて、本質的な差を表現するプリミティブを振舞い表現に付加することで機能を表現する研究を進めている。本章では、機能レベルに触れずに、振舞いレベルにおける因果性について考察する。振舞いのレベルの因果的性質においても部品の接続トポロジーに起因する依存などが起こり得る。

局所性と状況独立性を満たす因果的性質を捉えることは必ずしも自明なことではない。一般に、人間は部品を系に組み込んだ状態での系全体における因果関係のみを認識していることが多いために、系の状況に依存しない部品単体の因果的性質を把握す



ることは難しい。さらに、原因と結果は相対的概念であるために、因果的性質を捉える際の視点によって混乱が起こることが多い。これら为了避免するためには、局所性を満たす部品の因果性についての分類を行い、捉えるべき因果的性質を明確化する必要がある。

局所的な部品の因果性は表1の3種類に分類できる。表1は任意の二つの事象間の因果関係を、記述の際に注目している構造的範囲（スコープ）と、因果関係の途中の過程がすべて部品内の事象であるかどうかに基づいて分類したものである。孤立内部因果性とは、原因事象が起こったときに同じ部品内の事象のみを経て結果として同じ部品内の事象が起こることをいう。外部因果性は接続された部品間における影響の授受に関する因果性である。部品の入力と出力の概念に（逆の概念として）対応し、入力は結果であり出力は原因になる。連結内部因果性は原因と結果は同じ部品内にあるが、他の部品の事象を経由する因果性である。

それぞれの因果性の観点から関連する物理パラメータの因果的性質を捉えることができ、記述上は局所性を持つが、それらは互いに異なる。例えば、部品にはメカニズムなどの理由でパラメータの値を部品の作用として変化させることができない場合がある。そのようなパラメータの値は他の部品における事象の影響によってのみ変化するため、因果的性質は孤立内部因果性の観点では「結果にはならない」といえる。しかし、外部因果性の観点では「原因にはならず結果になる」である。これは因果性を捉える際のスコープの相違の結果であって矛盾ではない。また、部品内の事象の影響が他の部品を経由してそのパラメータの値を変化させる場合には、連結内部因果性の観点において「結果になる」と捉えることができる。

他の部品における事象と関係する連結内部因果性の観点からの因果的性質は、部品が組み込まれる系の状況に応じて変化し状況独立性を満たさない。また、多くの部品固有の因果的性質は部品内部の構造やメカニズムによって決まっており、外部因果性の外部的観点よりも内部的観点による把握が有効であると考えられる。したがって、モデルに記述する因果的性質は孤立内部因果性の観点から捉えなければならない。オントロジーは、記述された孤立内部因果性に基づいて部品の接続関係に応じた連結内部因果性や外部因果性を推論する能力を持つ必要がある。

### 5.2.3 局所的決定性

ある因果関係が「局所的決定性」があるとは、その関係が部品内の現象のみを経ており、結果が唯一の定性値を取ることをいう。対象オントロジーは、局所的決定性を持つ因果関係を生成できるような適切な因果指定を含むことが望まれる。曖昧な因果関係は直感的理解に不向きであるからである<sup>[5-4]</sup>。

局所的決定性は系の構造を反映した階層を持つものとして扱われる。つまり、ある階層レベルで決定的ではないパラメータの値は階層的に上位の制約によって決定的に値が求められる。部品に基づく場合、階層的に低い局所的な部品とそれを覆う大域的

な制約との間に因果関係が成り立つ。大域的制約の構造は物質やエネルギーなどの一般的な性質と接続トポロジーに基づいて認識できることが多い。このような性質を「大域分節性」と呼ぶ。対象オントロジーの設計においては適切な大域分節性を捉える必要がある。

#### 5.2.4 因果的時間オントロジー

因果関係を導出するオントロジーにおける時間概念は、導出する因果関係の詳細度によって決まる。因果関係の認識には時間の経過の認識が伴うとともに、導出したい因果関係以上に詳細な時間概念は必要ないからである。本章での目的である部品単位の因果関係を導出するためには、まず2.2節で議論した局所的因果性の分類に対応した時間概念が必要である。それによって「どの部品（の変化）が原因なのか？」という質問に答える能力をオントロジーに与えることができる。また、部品の局所的現象ではなく大域的法則に基づく現象があるため、その区別ができる必要がある。このように考えると、部品単位の因果関係を導く能力を持つオントロジーには以下の7種類の因果的時間概念が必要であることがわかる。

##### T1：部品内時間

部品内のパラメータの変化の間の時間。

##### T2：局所的部品間時間

隣接する異なる部品に存在するパラメータの変化の間の時間。

##### T3：大域的時間

異なる部品に存在するパラメータの変化の間の時間。（同時ではない）大域的な現象による場合。

##### T4：大域的同時時間

異なる部品に存在するパラメータの変化の間の時間。大域的に同時な現象による場合。

##### T5：完全充足状態時間

全パラメータが全平衡式を満足する一意な値を取る状態（完全充足状態）になるまでの時間。

##### T6：部分的平衡状態時間

系のある部分が平衡状態に到達するまでの時間。

##### T7：完全平衡状態時間

系全体が平衡状態に到達するまでの時間。

「T1：部品内時間」は孤立内部因果性を表す時間である。次に、部品を単位として対象の振舞いを理解するためには隣りあった部品間で影響を伝播する際に部品間に認知的な距離を考慮し、時間遅れを想定する。「T2：局所的部品間時間」はそのような部品間の認知的時間遅れを表現し、外部因果性に対応する。「T3：大域的時間」は物理法則や物質の性質が大域的に発現する現象のための時間である。例えば、部品集合

がループ構造を構成している場合においては、ループに対して流入する熱量と流出する熱量のバランスによってループ各所の温度が変化する。この温度の変化はループ全体によって引き起こされたものであり、流入する熱量と温度の変化の間の時間差は部品間の距離を表す $T_2$ とは異なり、大域的時間 $T_3$ と認識される。「 $T_4$ :大域的同時時間」は理想化すると大域的に同時に変化すると認知される現象を区別するために必要である。例えば、非圧縮性流体の流量は大域的に同時に変化すると捉えることができる。流体に関する大域的知識については3.4節で詳しく述べる。このような現象による因果関係は後述するように推論エンジンによって他の現象によるものより先行して推論され、またフィードバック時における処理が異なる。「 $T_5$ :完全充足状態時間」は積分規則によって進む時間であり、すべてのパラメータは時間点 $t \in T_5$ においてすべての制約式に無矛盾な一意な値を取る(完全充足状態と呼ぶ)。一方、 $T_1$ - $T_4$ は完全充足状態間の値の決定順序を表し、部分的充足状態の系列である。「 $T_6$ :部分的平衡状態時間」は系の部分的な平衡状態のための時間であり、系のある部分の微分値群が定量的に0に安定し、その部分が平衡状態に到達するまでの時間である。「 $T_7$ :完全平衡状態時間」は系全体の平衡状態のための時間であり、系のすべての微分値が定量的に0に安定するまでの時間である。

$T_1$ - $T_4$ は因果関係のある二つのパラメータの変化の間で経過する時間区間の長さを分類したものである。つまり、 $y=f(x)$ の関係があり時間点 $T$ におけるパラメータ $p$ の値を $p(t)$ と表記するとき、 $x(t_0)$ と $y(t_1)$ の二つの値の変化の間の時間区間( $t_0, t_1$ )の長さを分類したものである。一方、 $T_5$ - $T_7$ はある一つのパラメータの値が変化する時間を分類したものである。つまり、 $x(t_0)$ と $x(t_1)$ の変化の間の時間区間( $t_0, t_1$ )の長さを分類したものである。通常定性推論<sup>[5-5]</sup>における時間は $T_5$ に対応する。因果的時間概念間の相対的長さに関して以下の関係が成り立つ。

$$T_1 < T_4 < T_2 < T_3 < T_5 < T_6 < T_7$$

$T_1$ - $T_4$ の時間概念に基づいた因果関係を導出するためにモデルの数学的制約式に時間遅れを記述する必要はない。本章で述べるオントロジーでは、基本的に時間遅れを表現しない平衡式を用いる。モデルの局所的表現と接続関係に基づいて $T_1$ と $T_2$ や $T_2$ と $T_3$ 、 $T_4$ を区別する。さらに $T_3$ と $T_4$ を識別するために、「現象にかかる時間」を明示的に記述する。現象にかかる時間が「同時である」と記述された大域的制約を「大域的同時制約」と呼ぶ。大域的同時制約による因果関係は $T_4$ :大域的同時時間を意味する。差分による現象や時間遅れを明示したい場合は微分値に関する制約式を記述する。微分値の変化に応じた積分規則(4節で示す)による影響は、通常定性推論と同じように直接的に $T_5$ :完全充足状態時間の経過を意味する。 $T_1$ - $T_4$ の時間はモデルの数学的表現には現れておらず、それぞれの因果的時間における事象の順序は、対象の系における実数表現された時間と厳密に対応するとは限らない。例えば、対象の系においてほぼ同時に起こっている事象の間に因果的順序をつけて理解する現象がある。また、5.1節で詳しく述べるが、 $T_5$ 、 $T_6$ における各事象の順序もモデルの数学的表現に現れておらず、系の接続トポロジーなどによって規定される順序である。

### 5.3 流体系オントロジー

前節で議論した要求仕様を満たす対象オントロジーとして、プラントなどの流体系に関するオントロジーの構築を試みた。なお、流体は非圧縮性であると仮定し、流体の流量、圧力、熱量の関係を対象とした。

#### 5.3.1 流体の全連続性

非圧縮性流体の因果性を捉えるためには、部品の内部を流体が隙間なく流れ、部品に流れ込む流体の全部が連続して出ていくかどうか（流体の全連続性と呼ぶ）について検討する必要がある。全連続性が成り立つ部品を「流体全連続部品」と呼び、流体の分岐機構が含まれているなどの理由で全連続性が成り立たない部品を「流体部分連続部品」と呼ぶ。流体部分連続部品の例としては、タンクやドレーン付きの弁などがある。対象の系を流体部分連続部品の箇所区切ると、全連続性が成り立つ複数の全連続流路に分解できる。つまり、2.3節で述べた大域分節性は非圧縮性流体においては流体の全連続性である。全連続流路は大域的構造単位を構成し、因果的時間の大域的（同時）時間は全連続流路を単位とする。

#### 5.3.2 流量の因果性

流体の全連続性の概念を用いて流量の変化に関する因果性を捉えることができる。ある一つの全連続流路において流体全連続部品で最初に流量が変化すると、一時的にしろ全連続性が維持されない。したがって、流量は流体部分連続部品で最初に変化する。例外的に、ポンプは流体全連続部品であるが流量が最初に変化する。これはポンプは流体を吸い込んでいることから生じる例外である。したがって、対象の系に含まれる部品は、全連続流路において最初に流量を変化させることのできる部品（流量提供部品と呼ぶ）と、それ以外に分類することができる。

**流量提供部品** 全連続流路において最初に流量を変化させることができる部品。流体部分連続部品または流体を吸い込んでいる部品である。

（例）ポンプ、逃がし弁、圧力調整弁（ドレーンありのもの）、分岐・合流パイプ、タンク

**流量受領部品** 流量を最初に変化させることができない部品。流体を吸い込んでいない流体全連続部品である。

（例）パイプ。流量調整弁、逆止弁、熱交換器

つまり、流量受領部品である流量調整弁で起こる事象（例えば、バルブを閉めたことによる開度パラメータの変化）によって、流量調整弁の流量が孤立内部因果性における結果として変化することはない。全連続流路における流量は、ポンプなどの流量提供部品においてのみ孤立内部因果性の結果として変化する。したがって、バルブが

閉まったという事象の流量調整弁の流量への影響は連結内部因果性を持つ。つまり、閉まった影響は他のパラメータ（圧力差）を介してポンプへ伝わりポンプの流量を変化させる。流量調整弁の流量はポンプの流量変化の結果として変化する。したがって、流量受領部品における流量の因果性は孤立内部因果性の観点では「結果になれない」であり、連結内部因果性では「結果になれる」である。さらに、流量の局所的決定性は流量制御弁では満たされず、ポンプにおいてのみ満たされる。ポンプの特性によっては、バルブを閉めても流量は変化しないことがある<sup>[6-7]</sup>。つまり、流量調整弁で孤立内部因果性において流量が決定的に変化するという因果認識は誤っており、本節で述べてきたように、まず圧力差が変化しその連結内部因果性の結果として流量が変化する（または変化しない）という因果認識が正しい。

### 5.3.3 圧力と圧力差の因果性

局所的決定性に従えば、圧力ではなく圧力差がオートロジーのなかで重要な概念となる。圧力は局所的に決まるものではなく、系全体におけるバランスで決まる。例えば、流量制御弁の開度が変化したときには入口圧力と出口圧力の値は局所的には決定できず、圧力差の変化の方向のみがわかる。したがって、開度の変化は孤立内部因果性としては圧力差に影響を及ぼすと捉えるべきである。開度から圧力への影響は連結内部因果性である。流量制御弁の圧力差の変化の影響が全連続流路の流量や他の部品の圧力差を変化させ、系全体における圧力バランスによって流量制御弁の圧力が変化する。もちろん、実際の物理現象においては開度の変化と同時に圧力がいずれかの方向に変化しており、認知的な因果関係ということができる。

### 5.3.4 因果的時間と大域的制約

流量と圧力差は大域的に同時に変化すると捉えることができる。例えば、ポンプで流量が変化したことが下流のパイプやバルブへ伝わるのは理想的には同時と考えられる。また、パイプとバルブにおける流量の変化の間には意味のある時間差はない。したがって、流量と圧力差は大域的同時制約でモデル化され、その変化にはT4：大域的同時時間しかかからない。

一方、熱量は隣接する部品間のみで伝わる。したがって、温度パラメータは局所的に隣接する部品のみで伝播されるようにモデル化される。しかし、流路がループを構成している場合には、ループを循環する単位流体を考えるとループを一周する間に流入する熱量と流出する熱量の差によってループの各部品における流体の温度が変化する。この大域的な熱量バランスによる現象は大域的な制約として表現される（具体的なモデル例が7節にある）。熱に関する大域的現象は流量や圧力差と異なり、流体がループを循環する時間がかかると考えられるので大域的同時制約ではない。

流体における大域的制約は物理法則とループ構造といった一般的なトポロジーにの

み依存している。したがって、対象オントロジーの一部として一般的なトポロジーに対応させて事前に用意できる。以下の四つの法則はループ構造である全連続流路において一般的に成り立つ。

熱量保存則	流入熱量と流出熱量の差の定性値が各部品における温度の微分値の定性値に等しい。
流量保存則	非圧縮性流体の各部品における流量は等しい。大域的同時制約である。
圧力差	流量受領部品における圧力差の総計は流量提供部品の両端の圧力差の総計に等しい。大域的同時制約である。
圧力	各部品における圧力はすべての部品の圧力差によって求まる。大域的同時制約である。

### 5.3.5 部品の因果性の例

本節で述べてきたことをまとめると、流体オントロジーにおける部品の因果性を把握することができる。以下では流量提供部品と流量受領部品の代表的な例として、ポンプとパイプの部品の因果性を示す。

**ポンプ** 流量提供部品である。ポンプでは外部から供給されそ電力、水頭圧、吐出流量の関係が規定される。水頭圧は圧力差に関する大域的制約によって流路の全圧力差に等しい。孤立内部因果性は流量が「結果になれる」、圧力差が「原因になれる」である。電力はポンプが消費する電力量に応じて外部から供給されるため、一般には、「原因かつ結果になれる」である。流路圧力差が変化した際に、電力と流量がどのように変化するかはポンプの特性に依存する。圧力補償型ポンプは電力が一定になるように制御を行うので、電力は「原因になれる。結果になれない」と捉えることができる。この場合、ポンプは「電力と流路圧力差に応じて流量を生成する部品」と捉えられる。流量提供部品といっても流量は流路圧力差によって変化するため、電気回路とは異なり理想流量源と考えることはできない。

**パイプ** 流量受領部品である。両端の圧力差と流量の比例関係がある。孤立内部因果性は圧力差「結果になれる」、流量「原因になれる」、圧力「原因になれる」である。つまり、パイプは流量に応じて圧力差を生成する部品である。

## 5.4 モデルの記述様式

本節では本方式におけるモデルの記述様式について述べる。系全体のモデルは部品のモデルの集合と部品の接続関係で表現される。部品の知識は「パラメータの集合」、「パラメータの間に成り立つ制約条件」、「部品における因果的性質を記述する因果指定」、「接続関係」、「現象にかかる時間」からなる。パラメータは基準値からの逸脱方向を表す三つの定性値[+]、[0]、[-]のうちの一つを値としてとる。[+]（[-]）はパラメータの値が基準値より大きい（小さい）ことを表す。ここで基準値とは、系が正常な状態にあるときにパラメータがとっている値の範囲のことである。系の正常な状態はすべてのパラメータの時間微分値が定量的に0であるような平衡状態であるとする。この仮定は「多くの工学的な目的を持つ系は、継続的な動作を行うために、正常な状態は平衡であり、正常状態では微分値が0になるようなパラメータで系を記述できる」ことに基づいている。

「制約条件」は定性的演算子とパラメータを用いて記述される。特殊な表記として  $D(p)$  は任意のパラメータ  $p$  の微分値であるパラメータを表す。 $D(p)$  は値として[+]、[0]、[-]をとるが、これは基準値として0をとった、定量値の微分値の符号を表す。 $D(p)$  に関して定性的積分規則、 $t \in T_5$ 、 $p(t+1) = p(t) + D(p)(t)$  がつねに成り立つ。また、5.1節で詳しく述べるが、平衡状態のみに興味があるなどの理由で、特にある特定のパラメータ  $p$  が平衡状態に必ず到達することを「 $\exists t \in T_6$ 、 $D(p)(t) = [0]$ 」と指定する。

「因果指定」は、孤立内部因果性を表す以下の二つのフラグを用いたパラメータごとの属性である。

**原因 (Cause : C)** そのパラメータの変化が部品内の他のパラメータの値を部品内の事象のみを経て変化させるかどうか。

**結果 (Effect : E)** 部品内の他のパラメータの変化によってそのパラメータの値が部品内の事象のみを経て変化するかどうか。

因果指定は二つのフラグと否定記号“ $\bar{\quad}$ ”を組み合わせることで表現する。あるパラメータ  $p$  の因果指定を考えると、同じ部品内に  $p$  の値の変化によって（孤立内部因果性の結果として）その値が変化するパラメータが一つでも存在すれば、 $p$  の因果指定として“C”が付加され、一つも存在しなければ“ $\bar{C}$ ”が付加される。同様にその値の変化が  $p$  の値を変化させるようなパラメータ  $p$  の存在によって、 $p$  に“E”または“ $\bar{E}$ ”が付加される。因果指定の値は  $CE$ 、 $\bar{CE}$ 、 $CE$ 、 $\bar{CE}$  のいずれかである。例えば、 $CE$  はパラメータの値が部品内の他のパラメータの影響を受けることがなく、他のパラメータに影響を与えることがあることを表す。例えば、低抗の抵抗値  $R$  のように一定値を保つようなパラメータは因果指定として  $CE$  を持つ。 $CE$  を持つパラメータの値は隣りの部品の影響で変化するか、もしくは故障などの記述対象の系の外部の要因によって変化する。したがって、因果指定が  $CE$  であり、接続関係知識に他の部品への接続が記述されていないパラメータを系の外因的 (exogenous<sup>[5-8]</sup>) パラメータと定義できる。

外因的パラメータは故障診断の際には故障原因の候補となる。

「接続関係」はポートの概念を用いて部品の接続関係を表現する。パラメータは0または複数のポートに所属することができ、因果指定に従って接続先の部品のパラメータと相互に影響を与える。接続関係は階層的であり、複数の部品にまたがって相対的に大域的な制約部品を記述することができる。「現象にかかる時間」は大域的同時制約を表現するためにあり、現象にかかる時間が理想的には「同時」であることが記述される。局所的な部品や大域的な熱平衡を表現する大域的部品には「同時ではない」ことが記述される。

## 5.5 振舞いの推論の能力

本節では前節までに述べた対象オントロジーに基づく推論エンジンとしての振舞い推論の能力について述べる。推論方式の詳細については次節で述べる。本節で述べる推論エンジンは外乱が与えられたときの対象の系の振舞いと因果関係を推論するものである。入力としてパラメータの初期値の集合が与えられる。初期値集合は、対象の系に外乱が与えられた瞬間を意味するものとし、基準値とは異なる値が少なくとも一つ与えられるとする。出力は、対象の系が到達する平衡状態における全パラメータの値とそれに至るまでのパラメータの値の変化の因果関係である。

### 5.5.1 時間に関する能力

本節では、本章で示すオントロジーが扱っている時間の範囲を2.4節で述べた概念を用いて明確にする。本オントロジーは、主に正常な完全平衡状態から異常な完全平衡状態への過渡期を扱っている。特に、正常な完全平衡状態から最初の完全充足状態へ移行する際の部分的充足状態の系列を導出する。部分的充足状態の系列の順序は時間概念T1-T4に基づいた因果的関係を意味し、因果指定で表現された因果的性質と部品の接続トポロジーによって正当化される。通常の定性推論方式では、制約充足によって直ちに完全充足状態が計算されるためそれに至る過渡期は導出されない。

完全充足状態において微分値の値が変化すると積分規則を用いて完全充足状態の系列を導出する。系列はT5における順序を意味するが、すべての順序を生成することは多くの曖昧さの発生を招く<sup>[5-9]</sup>ため、現象にかかる時間や部品の接続トポロジーなどによって決定される一つの順序しか生成しない。

さらに、微分によって平衡状態間の動的変化が記述されている場合でも、特定のパラメータについて平衡状態における値が求めれば十分である場合や平衡状態への過渡期において曖昧さが多い場合のために、T6、T7が表す平衡状態における振舞いのみを推論することができる。前節で述べたように特定のパラメータが必ず平衡状態へ到達することが与えられている場合、最初の完全充足状態の以降については省略されて部分的平衡状態 (T6) における値が求められる。複数の部分的平衡状態があった場合は、



どの部分が先に平衡状態に到達するかは一般に判明しないため、部分的平衡状態の順序は現象にかかる時間や接続トポロジーによって決定される一つの順序しか生成しない。

### 5.5.2 フィードバックに関する能力

フィードバックの解析は、対象の系の理解に不可欠なものである。フィードバックが平衡式で記述されている場合、数学的式のみからでは解析は不可能である<sup>[5-6]</sup>。数学的には単一代入を繰り返すことで解けない式部分集合であり「本質的に連立である (inherently simultaneous)」という<sup>[5-4]</sup>。de Kleerは三つのヒューリスティクスに従って仮定を導入することで、本質的に連立な平衡式で制約されている複数のパラメータの変化に因果的順序を生成できると主張している<sup>[5-4]</sup>。しかし、どのパラメータに仮定を導入するかについては恣意性があり、意味のある順序関係は導出されないとの批判がある<sup>[5-8]</sup>。

本オントロジーでは因果指定に基づいて仮定を導入することで、連結内部因果性におけるフィードバックを解析できる。仮定は部品の因果的性質によって正当化される。ネガティブフィードバック後の値は事象にかかる時間と部品接続のトポロジーに基づいて、以下のようなヒューリスティクスに従って決定できる。

- (1)大域的同時制約 新しい値が曖昧な場合、大域的同時制約によるネガティブフィードバックの影響は無視されてもとの値が維持される。つまり、瞬間的なフィードバックは起こらず、安定すると仮定される。具体的な例を7.3節で示す。
- (2)その他の平衡式 同時ではない平衡式による影響は、影響が一周したことによって時間が経過したと考えるほうが自然であるため、新しい値が求められる。
- (3)積分 積分がフィードバックの経路に含まれる場合は明示的に時間が経過しているので、新たな値が求められる。知識として「必ず平衡に到達する」ことが記述されている場合、平衡状態における値を求める。

### 5.5.3 現象に関する能力

本オントロジーは対象になんらかの平衡状態が存在することを仮定しており、4節で述べたように定性値は基準値との大小関係で表現される。したがって、平衡状態がない現象は扱えない。また、すべての式は連続であると仮定されており不連続変化は扱えない。

## 5.6 振舞いの推論方式

本節では、系に外乱が与えられたときの振舞いを推論する方式の詳細について述べる。推論エンジンは系の状態の系列とそれらの導出過程を保持する。系の状態はパラメータの状態の集合で規定される。パラメータの状態は、定性値、値が定義されているかどうかを表すフラグ、三つの時間カウンタ $T_f$ 、 $T_s$ 、 $T_u$ で表現される。時間カウンタは値の管理を行うためにあり、それぞれ順に2.4節で述べた時間概念である $T_4$ ：大域的同時時間、 $T_2$ ：局所的部品間時間、 $T_5$ ：完全充足状態時間を表現する。 $T_1$ はいずれのカウンタにも差がない場合で表現できるので対応するカウンタがない。 $T_3$ ：大域的時間は値の管理上は $T_2$ と同様に扱えるので $T_s$ で表現される。これらの時間カウンタと保持されている推論過程によって、状態間の時間を七つの時間概念に対応づけることができる。 $T_f$ 、 $T_s$ は部品間推論において値が異なる部品へ伝播されたときに増加する。 $T_u$ は積分規則を用いて微分値の変化によって値が変化したときに増加する。

推論は部品内部での推論と部品間の推論からなる。部品内推論は他の部品から伝播された値を与えられて、その部品における他のパラメータの値を求める推論プロセスである。すべての式について、因果指定として0を持つパラメータの値を用いて、値が未決定である $E$ を持つパラメータの値を求める。このとき、因果指定が $CE^-$ であるパラメータの値が他の部品から与えられない場合、部品内の他のパラメータの影響によっては変化しないので正常値であると仮定することができる。仮定の導入によって、5.2節で述べたフィードバックループの因果順序の導出が可能になる。

部品間推論は接続関係知識に従って、パラメータの値を接続されているすべての部品へ伝播する。大域的同時制約部品へ伝播されたときには $T_f$ が増加し、それ以外のときには $T_s$ が増加する。部品の推論は基本的にはトポロジー上の順番に沿って行われるが、時間的に早いものから推論が行われる。したがって、大域的同時制約のような早い現象が先に推論される。部品の接続関係にループが存在したり、フィードバックの仮定を導入して解くと、伝播パスがループ状になり同じ部品が複数回推論される。5.2節で述べたように現象にかかる時間に基づいて値を決定できる。一つの部品に対して推論された複数の事象において時間カウンタ $T_s$ 、 $T_u$ がともに等しい場合は、大域的同時制約で表現された現象であり極めて短い時間間隔であると考えられるため、5.2節で述べたヒューリスティクスを適用し、新しい推論結果が曖昧になった場合には以前の値が維持される。時間カウンタ $T_s$ が異なる場合は局所的な事象が一周したことを意味するので、時間カウンタ $T_u$ を増加させて新しい値を求める。

## 5.7 原子カプラントへの適用

本節では、提案したオントロジーに基づいた原子カプラント熱輸送系のモデリングと振舞いの推論について述べる。図5.1は、対象とした2系統の原子炉主冷却系の概略である。対象とした熱輸送系は発熱体である原子炉の熱を空気に伝えることを目的としてお

り、冷却材が循環するループを二つ持った熱輸送系統が2組ある。それぞれをA系統・B系統と呼び、両系統にある各部品には系統を表す添字をつける。

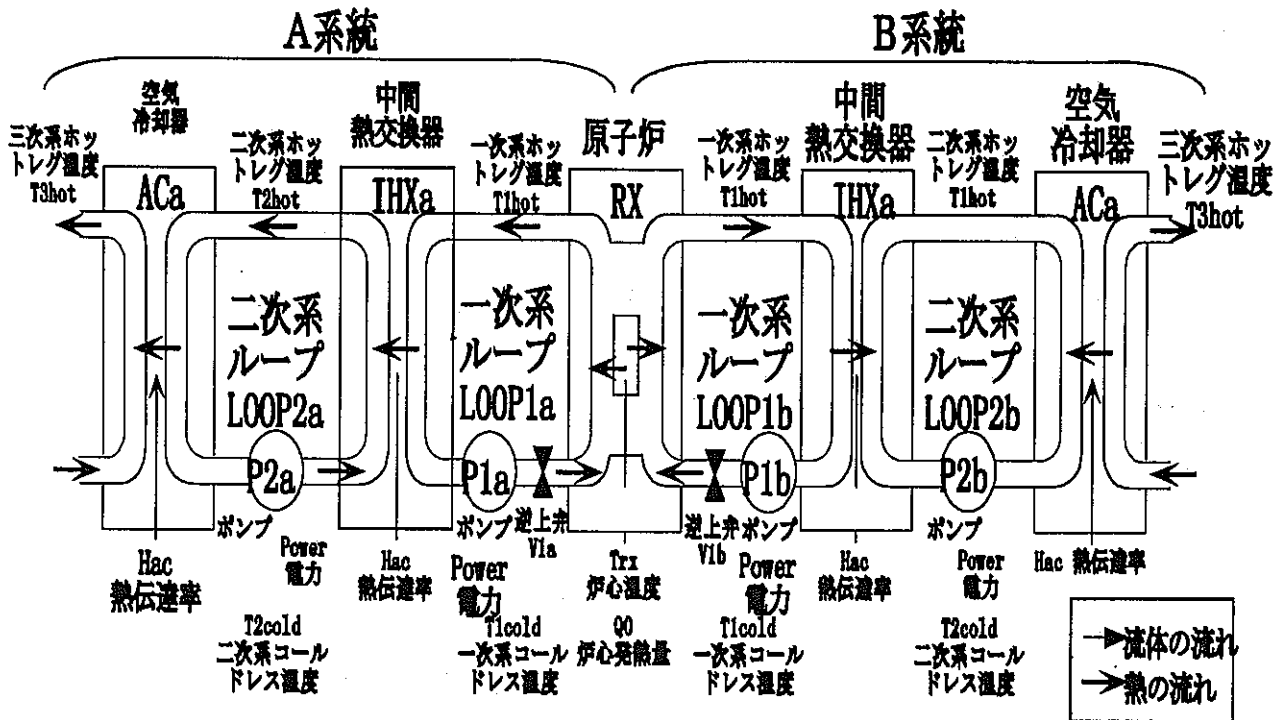


図5.1 2次系熱輸送系の概略

### 5.7.1 モデル記述

熱輸送系全体のモデルは27個の部品、143個のパラメータ、102個の制約式から構成される。局所的部品には原子炉、中間熱交換器、ポンプなどの11個がある。各部品のモデルは部品クラスのインスタンスに接続関係を記述したものである。本熱輸送系では部品クラスとして発熱体、対向流型熱交換器、可変吐出量型ポンプ、逆止弁（流量制御弁の一種）が用いられている。例えば、中間熱交換器と空気冷却器のモデルは同じ熱交換器クラスのモデルに固有な接続関係を記述している。主な部品とパラメータを図5.1に示す。中間熱交換器とポンプのモデルを図5.2と図5.3に示す。

Name: IHXa

Time: not-simultaneous /\*「同時ではない」\*/

Ports:

symbol	connected component:	port	symbol	connected component:	port
in1	RX:	out1a	heat1	LOOP1a_HEAT:	out
out1	PIa:	in	heat2	LOOP2a_HEAT:	in
in2	P2a:	out	flow1	LOOP1a_FLOW:	rst2
out2	ACA:	in1	flow2	LOOP2a_FLOW:	rst1
			dp1	LOOP1a_DP:	rst2
			dp2	LOOP2a_DP:	rst1

Parameters:

causal specification

symbol	parameter		port
T1hot	1ry coolant inlet temp	C~E	in1, heat1
T1cold	1ry coolant outlet temp	~CE	out1, heat1
T2cold	2ry coolant inlet temp	C~E	in2, heat2
T2hot	2ry coolant outlet temp	~CE	out2, heat2
Q12	heat transported	CE	heat1, heat2
Hihx	heat trans. resistance	C~E	flow1
Flow1	Flow rate of 1ry coolant	C~E	flow2
Flow2	Flow rate of 2ry coolant	C~E	dp1
P1io	Pressure drop of 1ry	~CE	dp2
P2io	Pressure drop of 2ry	~CE	

Constraints:

$Q12 = Hihx * ((T1hot + T1cold) / 2 - (T2hot + T2cold) / 2)$   
 $Q12 = Flow1 * (T1hot - T1cold)$   
 $Q12 = Flow2 * (T2hot - T2cold)$   
 $P1io = Flow1$   
 $P2io = Flow2$

図5.2 A系統中間熱交換器 (IHXa) のモデル

Name: LOOP1a\_HEAT

Time: not\_simultaneous /\*「同時ではない」\*/

Ports:

symbol	connected component:	port
in	RX:	heata
out	IHXa:	heat1

parameters:

causal specification

symbol	parameter		port
Q01	Heat transported from RX	C~E	in
Q12	Heat transported to IHXa	C~E	out
T1hot	Coolant Temp (hotleg)	~CE	in, out
T1cold	Coolant Temp (coldleg)	~CE	in, out

constraints:

$D(T1hot) = Q01 - Q12$   
 $D(T1cold) = Q01 - Q12$   
 $\exists t \in T6, D(T1hot)_{\text{in}} = [0]$   
 $\exists t \in T6, D(T1cold)_{\text{in}} = [0]$

図5.3 A系統1次ループポンプ(P1a)のモデル

```

name: Pla
time: not_simultaneous /*「同時ではない」*/
Ports:

    symbol      connected
              component:      port
in           IHXa:             out1
out          Via:              in
flow        LOOP1a_FLOW:      drv
dp          LOOP1a_DP:         drv

parameters:      causal specification
symbol parameter      |      port
Power Power supply    |      CE
Flow  Flow Rate       | ~CE flow
Pio   Pressure difference | C~E dp
Tin   Coolant Temp. (inlet) | C~E in
Tout  Coolant Temp(outlet) | ~CE out

Constraints:
Power = Flow * Pio
Tin = Tout

```

図5.4 A系統1次系ループの熱量保存則(LOOP1a\_HBAT)のモデル

対象とした系を3節で述べた全連続性に沿って大域的構造へ分割すると、両系統にある四つのループを認識できる。それぞれのループを大域的構造とみなし、A系統の一次系ループをLOOP1aなどと表現する。各構造に3.4節で述べた一般的法則を適用すると、16個の大域的制約が生成される。図5.4は、その一つであるA系統の一次系ループにおける熱量保存則を表す大域的制約である。

### 5.7.2 推論結果

表2は推論結果の一部を表したものである。推論エンジンに一つの外因的パラメータで表現される外乱を与えて、系の到達する平衡状態における他のパラメータの値を計算させた。表2の列の項目が外乱を表し、行の項目が他のパラメータの名前である。定性値の横の番号は値の因果的順序を表す。すべての推論結果は専門家によって妥当性を確認されている。二次系ポンプの電力減少時における値がフィードバック後に曖昧になっているが、これは専門家にとっても流量の定量的な値を知ることなしには決定できない。

### 5.7.3 検討

図5.5は一次系ループのポンプ (Pla) に対して供給されている電力が低下した際の因果関係を推論エンジンが生成したものの一部である。電力Powerが低下し[-]になったとき、推論エンジンは因果指定がCE<sup>-</sup>である圧力差Pioを[0]と仮定して、流量Flow: [-]を推論する (図中の番号(2)の箇所を参照)。

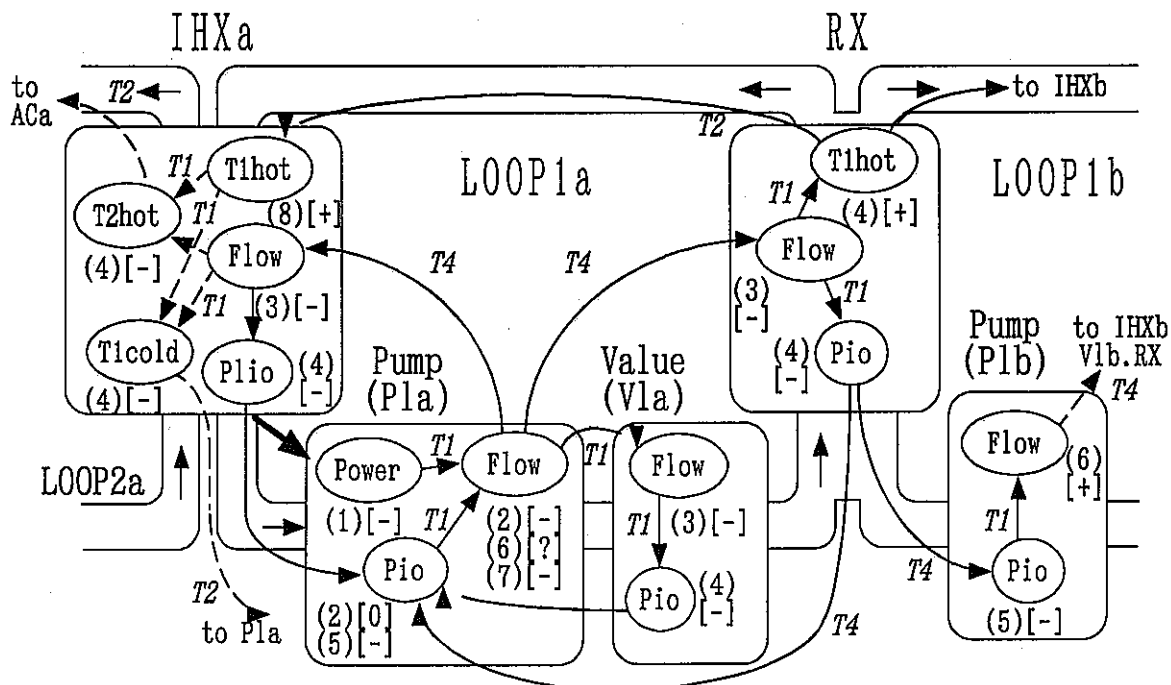


図5.5 ポンプ (Pla) の電力低下時の因果関係 (部分)

ポンプの流量の変化は流量に関する大域的同時制約によって同時に、一次系ループの全部品へ伝播される。つまり、RX、IHXa、Vlaへ時間差T4で伝播される(3)。各部品では流量と圧力損失は比例するので流量[-]から各部品の圧力差[-]が推論される(4)。その結果、圧力差に関する大域的同時制約によって、一次系ループ全体での総圧力差が減少し、ポンプの圧力差Pioへ伝播される(5)。このフィードバックの結果、Pio=[-]とPower=[-]から流量の値を求めると曖昧になる(6)。ここで、フィードバックの経路に沿った時間差はT4+T1+T4+T1であるので瞬間的なフィードバックであることがわかる。したがって、5.2節で述べた大域的同時制約によるフィードバックに関するヒューリスティクスを用いると、Plo=[-]を得ることができる(7)。一方、RXにおける圧力差の低下はB系統一次系ループのポンプ (Plb) へ影響を及ぼし、B系統一次系の流量が増加する(6)。また、RXとIHXaにおいて流量の低下は冷却材の温度を変化させる(4)。温度は同時的な変化ではないので、これらの変化は同時的な変化の後で伝播される(8)。

図5.6は、中間熱交換器 (IHXa) の熱伝達率低下時の因果関係の一部である。

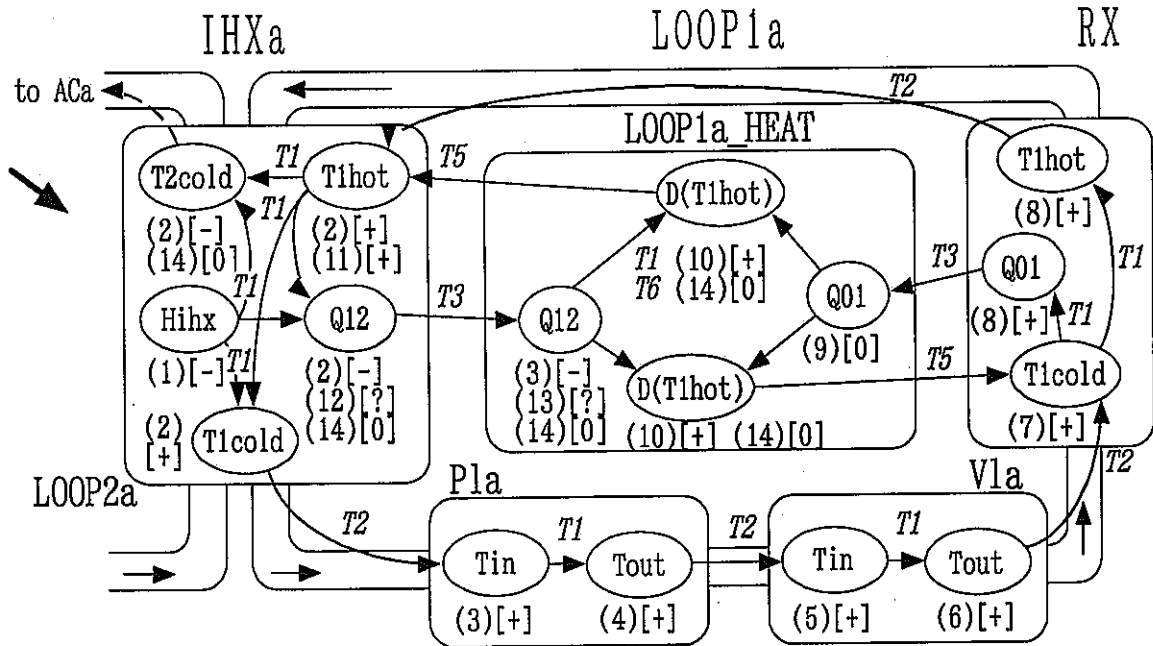


図5.6 中間熱交換器 (IHXa) 熱伝達率低下時の因果関係 (部分)

熱伝達率Hihxが[-]になると、まずIHXaにおいてTlcold : [+ ]とQ12 = [-]が推論される(2)。Tlcoldの値は、Pla、Vlaを経由してRXに伝搬され、Tlhot = [+ ]とQ01 = [0](8)が推論される。このQ01 = [0]とQ12 = [-]が時間差T3で熱量に関する大域的制約LOOP1a HEATに伝搬されると(9)、D (Tlhot) = [+ ]とD (Tlcold) : [+ ]が推論される(10)。これは、ループに流入する熱量 (Q01) と流出する熱量 (Q12) の差によって。一次系ループの温度が増加しつづけることを表している。外乱の発生から十分な時間が経てば一次系ループは熱平衡状態に到達する。したがって、Q12は曖昧な値になるが(12)、推論エンジンは一次系ループの平衡状態 (T6) における値Q12 = [0]を得ることができる(14)。推論結果は一次系ループの冷却材の温度の上昇が熱伝達率低下の影響を補償し、その結果二次系ループの温度が正常に戻ることを示している。

推論エンジンはUNIX Workstation上のCESP言語でインプリメントされている。CESP言語はオブジェクト指向型Prologであり、そのオブジェクト指向的特徴を生かして推論エンジンは実装されている。

### 5.8 関連研究

de Kleerは「架空の時間」に基づいてヒューリスティクスによる仮定の導入を提案している<sup>[5-4]</sup>。本節で示した因果的時間のT1-T4は架空の時間に対応し、それをより精密に細分化したものといえる。また、部品の因果的性質を明示的に記述することにより仮定の導入の任意性をなくしている。

因果指定の一部 (CE<sup>-</sup>) は論文<sup>[5-8]</sup>において系全体に対して行われている外因的パラメータの指定を部品ごとに行ったものに相当する。論文<sup>[5-10]</sup>で議論されているように系全体の因果関係は系の状況に依存するが、局所的であり安定であるような因果的性質を同定し

モデルに記述した。

TQ解析<sup>[5-11]</sup>は積分によるフィードバックを解析する一般的なヒューリスティクスを与えている。Topらはbondgraphを用いた因果導出を示している<sup>[5-12]</sup>。bondgraphは少数の一般的な物理的プリミティブ (source など) を用いてデバイスの因果性を表現するが、本質的に連立なフィードバックに単一の順序をつけることはできない。一般的な知識や数学的手法では、このようなフィードバックに対して単一の因果順序をつけることはできないと考えられる。de Kleerによる部品に基づく定性推論<sup>[5-14]</sup>では構造に関する知識は局所的なcontinuity、compatibility conditionだけであり、複雑な構造については十分ではない<sup>[5-13]</sup>。本節で述べた熱に関する大域的制約はQSIMにおける熱エネルギー保存則を表すGlobal filter<sup>[5-14]</sup>と同じである。さらに、本オントロジーでは流量の変化といった大域的に同時に変化する現象を適切に推論するために、現象にかかる時間を明示的に表現する。現象にかかる時間の把握は新規な概念ではなく、いくつかの研究が行われている。本研究では部品オントロジーにおける因果理解と結びつけ、時間オントロジーとして整理を行ったところに意義がある。論文<sup>[5-4, 5-15]</sup>では、物理原理やプロセスごとに因果連鎖の方向を記述している。本オントロジーはデバイス中心のモデリングである。

本章で示した流体系オントロジーは流体に関係する部品のメカニズムと因果性を同定する試みであり、Hayesが行った液体や流体に関するオントロジーとは対象が異なる<sup>[5-16]</sup>。また、時間そのものに関するオントロジーとしては、論文<sup>[5-17]</sup>等があり、時間そのものを表現するプリミティブが議論されている。本章で述べた因果的時間オントロジーは、部品に基づいた因果関係の導出の観点から、パラメータの値の変化をeventとしたときの、二つのeventの間の時間間隔を認知的に分類したものである。

## 5.9 むすび

部品に基づく因果性と時間についての検討を通して対象オントロジーの満たすべき要件を示し、流体系のオントロジーについて述べた。提案した流体系オントロジーは、部品の因果性を表す因果指定と因果的時間オントロジーに基づいており、フィードバックを含む部品間の因果関係についての質問に答える能力を持つ。また、これらのオントロジーに基づいて原子力プラントの熱輸送系のモデル化と振舞いの推論を行った。推論結果は専門家によるものと一致した。

本章で議論した対象オントロジーが満たすべき要件は流体といった記述対象の種類に依存しておらず、部品に基づくモデリングを行う対象オントロジー全般に有効である。3節で述べた流体における全連続性といった概念は、電気回路や機構部品にも類似の概念が見られる。このことは、流体系オントロジーの概念の一般性を示唆するが、その範囲や記述対象の種類ごとの差異は今後の研究課題である。

本章で示したオントロジーと推論エンジンでは、正常平衡状態の存在の仮定、ネガティブフィードバックに関するヒューリスティクス、積分規則による変化および平衡状態への到達のすべての順序を生成しないことに基づいて、実用性が高く効率の良い推論を実



現している。本章では流体・熱輸送系での適用実験を通して、仮定や前提の有効性を示唆した。今後は、他の対象領域においても適用実験を行い、扱える範囲と限界を明らかにしたい。

また、物質やエネルギーの一般的性質を部品の接続トポロジーにおける大域的な構造に適用することで、大域的制約を導出できると考えられる。本章で示した実際の適用例では、大域的制約は大域的な部品の制約式として直接記述されていた。現在、大域的制約を自動的に生成する機構（構造コンパイラと呼ぶ）について、考察を進めている。

## 5.10 参考文献

- [5-1] 淵一博監修：定性推論、共立出版(1989)。
- [5-2] 山口高平、溝口理一郎、ほか：対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラIIの構築と評価、人工知能学会誌、Vol.7、No.4、pp.663-674(1992)。
- [5-3] Forbus、K.D.:Qualitative Process Theory、Artif.Intell.、Vol.24、pp.85-168(1984)。
- [5-4] de Kleer、J.and Brown、J.S.:A Qualitative Physics Based on Confluences、Artif.Intell.、Vol.24、pp.783(1984)。
- [5-5] Kuipers、H.J.、:Qualitative Simulation、Artif.Intell.、Vol.29、pp.289-338(1984)。
- [5-6] 元田浩：因果理解、認知科学ハンドブック、pp.118-127、共立出版(1992)。
- [5-7] 井上雅弘、鎌田好久：流体機械の基礎、コロナ社(1989)。
- [5-8] Iwasaki、Y.and Simon、H.A.:Causality in Device Behavior、Artif.Intell.、Vol.29、pp.3-32(1986)。
- [5-9] Williams、B.C.:Doing time:Putting qualitative reasoning on firmer ground、Proc.AAAI-86、pp.105-112(1986)。
- [5-10] Skorstad、G.:Finding Stable Causal Interpretations of Equations、recent advances in Qualitative Physics、pp.399-413、MIT Press(1992)。
- [5-11] Williams、B.C.:Qualitative Analysis of MOS Circuits、Artif.Intell.、Vol.24、pp.281-346(1984)。
- [5-12] Top、J.and Akkermans、H.:Computational and Ohysical Causality、Proc.IJCAI-91、pp.1171-1176(1991)。
- [5-13] Schryver、J.C.:Object Oriented Qualitative Simulation of Human Mental Models of Complex Systems、IEEE trans.on Systems、Man、and Cybernetics、Vol.22、No.3、pp.526-541(1992)。
- [5-14] Fouche、P.and Kuipers、B.J.:Reasoning about Energy in Qualitative Simulation、IEEE trans.on Systems、Man and Cybernetics、Vol.22、No.1、pp.47-63(1992)。
- [5-15] 鷲尾隆：物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出、人工知能学会誌、Vol.5、

No.4.pp.94-103(1990)。

[5-16]Hayes、 P.:Naive physics manifesto I:Ontology for liquids、 Formal theories of the commonsense world、 pp.71-107、 Ablex(1985)。

[5-17]Allen、 J.F.:Towards a general theory of action and time、 Artf.Intell.、 Vol.23、 pp.123-154(1984)。