

運転員のメンタルモデル獲得システムの開発(2)
— 正常時／異常時統合手法の研究 —
(共同研究報告書)

1999年3月

大阪大学産業科学研究所
核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section ,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

運転員のメンタルモデル獲得システムの開発（2）

— 正常時／異常時統合手法の研究 —

（共同研究報告書）

来村徳信¹、吉川 信治²、
池田 満¹、溝口理一郎¹

要旨

本報告書は、原子力プラントで生じる不具合についての知識を計算機上に記述する手法の開発について述べる。原子力プラントの安全性、信頼性を維持・向上するためには、運転員や保守員が広範な事象に対して対処能力を有することが望ましいが、その事象全てを教育訓練過程で経験させることは不可能である。しかし、プラントで起こりうることを理解するための、設計仕様や一般的な物理法則に対する知識形成を支援できれば、初めて遭遇する事象に対しても、それらの知識を組み合わせ、原因の同定や適切な対応操作を判断できる能力が高まると考えられる。

原子力プラントで発生すると考えられる異常の多くは、補助的な系にその影響が限られるような、制御室からは観測されないような小さな不具合が発端となり、それが進展して主要系統のプロセスパラメータの変位に至ると考えられる。補助的な系での小さな不具合においては、潤滑油ラインの閉塞が摩擦増大による軸受けの過熱、変質に至る、というような局所的で不可逆な過程を経るものが多い。一方、主要系統での影響の伝播は、たとえば摩擦増大がポンプの回転数減少、冷却材循環流量減少、更には原子炉出口温度上昇に至るように大局的で可逆な経緯を示すものが多い。

本報告書は、局所的で不可逆な過程を対象として、運転員や保守員の理解を支援するための知識を記述するための手法開発について述べる。

1：大阪大学産業科学研究所 電子機器部門

2：核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発 Gr

Development of Operators' Mental Model Acquisition System(2)

- Integration of Knowledge Representation about Normal and Abnormal Plant States -

Y. Kitamura¹, S. Yoshikawa², M. Ikeda¹, R. Mizoguchi¹

Abstract

This report discusses a representation scheme of device failures anticipated in nuclear power plant, to describe related knowledge in a computer software. Coping ability covering a wide range of physical events is desired in plant operators and maintenance staffs, but it is impractical to give them a set of experience to cover the all possible events in the education/training curriculum. However, in case that their knowledge of plant design and of generally-known physical principles are enforced, their ability of cause identification and of appropriate responding actions against inexperienced events are expected to be enhanced, by combining the basic engineering and physical knowledge.

Most of the anomalies anticipated in nuclear power plants are initiated as an incipient failure in some auxiliary equipment initially affecting only within the relative subsystem and hiding from the central control room, and then are propagated to deviate process parameters in the main subsystems to be observed from the control room. Incipient failures in auxiliary subsystems, such as a chemical degrading of an axis holder caused by a blockage of lubricant supply line through increased friction and subsequent extra heating, are typically local and irreversible consequences. On the other hand, deviation propagation in main systems, such as outlet temperature rise by an increased pump rotation friction though decreased coolant flow rate, are typically global and reversible consequences.

This paper describes a methodology development to represent a category of knowledge to support operators' and maintenance staffs' effort in understanding local and irreversible failure consequences.

1:Institute of Science & Industrial Research, Osaka University

2:Beam Technology Development Group, System Engineering Technology, Division,
Oarai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. 緒言 | 1 |
| 1.1 本研究の背景 | 1 |
| 1.2 2次主冷却系補修記録 | 2 |
| 2. 故障オントロジーの構築 | 4 |
| 2.1 オントロジー | 4 |
| 2.2 故障オントロジー | 6 |
| 2.3 故障知識ベースに基づくシステムの能力 | 11 |
| 2.4 故障事象概念に基づいた故障説明システム | 12 |
| 2.5 故障クラスに基づいた段階的推論 | 16 |
| 2.6 検討 | 18 |
| 2.7 参考文献 | 18 |
| 3. 「常陽」2次主冷却系純化系の保守記録の分析 | 20 |
| 4. 考察とまとめ | 41 |
| 5. 結論 | 42 |

図リスト

| | |
|-----------------------------|----|
| 図 2-1 認知的故障原因と物理的故障原因 | 8 |
| 図 2-2 故障発生過程を表現する概念 | 10 |
| 図 2-3 故障クラス | 11 |
| 図 2-4 GDEの故障診断範囲 | 12 |
| 図 2-5 タービンのオブジェクトモデル | 12 |
| 図 2-6 推論例：形状の異常の故障原因 | 17 |

表リスト

| | |
|--|----|
| 表 2-1 故障事象モデルの例 | 14 |
| 表 2-2 異常伝播事象モデルの例 | 15 |
| 表 2-3 段階的故障推論のための選択軸 | 18 |
| 表 3-1 コールドトラップ風量制御ダンパの改造に関する記述 | 21 |
| 表 3-2 仮説コールドトラップの解体検査結果等に関する記述 | 22 |
| 表 3-3 オーバーフロータンクでのアルゴンガス巻込みに関する記述 | 23 |
| 表 3-4 主系統汲み上げ位置に於ける温度差に関する記述 | 24 |
| 表 3-5 コールドトラップ予熱ヒータの分割に関する記述 | 25 |
| 表 3-6 コールドトラップの低温運転に関する記述 | 26 |
| 表 3-7 ナトリウム純化特性試験(仮説コールドトラップによるフラッシング)に関する記述 | 27 |
| 表 3-8 ナトリウム分析試験(サンプリング操作確認)に関する記述 | 28 |
| 表 3-9 電磁ポンプ汲み上げラインサイフォンブレイク機能に関する記述 | 29 |
| 表 3-10 2次ナトリウムサンプリング装置出入口等の不具合現象に関する記述 | 30 |
| 表 3-11 2次純化系コールドトラップ予熱保持に関する記述 | 31 |
| 表 3-12 2次ナトリウムサンプリング入口側既設配管部スウェージロック締め付け不良に 関する記述 | 32 |
| 表 3-13 2次ナトリウムサンプリング装置ナトリウム漏洩検出器の劣化に関する記述 | 33 |
| 表 3-14 主プラグ計冷却ブロウ軸受け部からの異音に関する記述 | 34 |
| 表 3-15 2次ナトリウムサンプリングチューブ中のボイド分析に関する記述 | 35 |
| 表 3-16 2次ナトリウムサンプリング装置の改造に関する記述 | 36 |
| 表 3-17 電磁ポンプ制御用電磁接触分解点検結果に関する記述 | 37 |
| 表 3-18 2次コールドトラップエコノマイザバイパス運転経験に関する記述 | 38 |
| 表 3-19 第3の不純物究明試験に関する記述 | 39 |
| 表 3-20 2次ナトリウム純化系制御計器等の中央制御室への移設に関する記述 | 40 |

1. 緒言

1-1 本研究の背景

原子力プラントの安全性・信頼性を運転や保守の面から向上するために、診断、対応操作、補修計画立案に関する意思決定を人間に代わって行う、あるいは支援するシステムの開発が精力的に行われている。しかしながら、このような情報処理システムに意思決定を依存することには強い抵抗がある。また、このようなシステムの現在の技術的境界は将来克服できると仮定しても、プラントにおいて発生する事態を人間が十分に把握し、最終的な意思決定も人間に委ねられるべきであることは論を待たない。

原子力プラントの運転員や保守員の対処能力を広範な事象に対して確保・向上させるためには、教育訓練や通常の経験伝承のみに依存せず、内部の物理現象に沿って、観測情報を解釈したり、不具合の進展の阻止や機器の補修について判断するための知識形成を支援する必要がある。大規模プラントの診断や保守のためのモデル化研究は多数あるが、その大部分は主要システムを対象にした、言い換えれば現象の把握や再現が数学モデルを用いても可能なものに関するものである。プラントの安全性や信頼性を効果的に向上させるためには、異常事象の発端となる、局所的で不可逆な不具合の進展が主要なプロセスパラメータの変位として現れる以前にこれを検知し、原因を同定してその進展を防止し、補修作業計画を立てることが望ましいが、そのために把握すべき現象は数値モデル化されておらず、再現性に乏しく、事前の予想や定式化も困難である。従って、設計仕様に加えてシステムに記述可能な情報としては不具合の検知や補修に関する経験しかない。

高速増殖実験炉「常陽」においては、不具合の発見、修復に関する経験を系統立てて蓄積するために、定められた様式に従って記録に留めており、その記録の多くは単なる事実の記述に留まらず、異常の修復に携わった担当者による不具合現象の物理的な解釈が添えられている。観測されうる兆候から、その原因となり得る事象の候補を推定し、その候補から真の原因を絞り込むための作業を計画し、得られた原因に基づいてその進展の抑制と再発の防止のための手段を講じるために有用な知識ベースをこの記録を基に構築することがこの研究の目的である。また、今後新たに得られるであろう不具合の検知、補修経験によって柔軟に拡充できるような枠組みを沿えることも重要である。ソフトウェアによってこのような理解形成を支援するためには、そのソフトウェアの使用者、即ち学習者の現状での理解状況を自動的に把握する機能が不可欠であるが、その理解状況を計算機上に表現するためにも、個々の知識要素が如何に関連付けられればその対象とする不具合を「分かっている」ことになるのかを定式化

して、その枠組みをソフトウェアに組み込む必要がある。このような考えに沿って平成9年度に、「人工物が如何に壊れるか」を記述する属性の整理を実施したが、本年度は、高速炉特有の領域への適用を目指して、さらに具体的な知識表現手法を開発することとした。

本報告書においては、工学一般を対象に、「人工物の壊れ方」を計算機上に記述するために、人工物に生じる不具合を我々人間が論じる際に用いる言語体系を詳細に考察し、厳密に定義できる概念に分解し、それぞれに名前を付けて相互の関連を定義することによって、「故障オントロジー」を提案する。さらに、高速炉特有の機器に関する既存の不具合補修記録である、「常陽」2次主冷却系純化系の補修記録を対象に、そこに記載されている情報を本研究で目指すシステム構築の視点から分析を加える。最後に、将来構築すべきシステムについて考察を加える。故障オントロジーの提案を第2章に、「常陽」の保守記録の分析を第3章に記して、最後の考察を第4章に述べる。

1-2 2次主冷却系補修記録

緒言で述べたように、局所的で不可逆な不具合事象に対する理解を支援することは重要であり、残された膨大な記録を基に知識ベースを構築することが望ましいが、本研究の目的に適うような知識ベースの構築法、具体的に言えば個々の知識要素を互いにどのように関連付ければ目的を達することができるのか、その記述法を開発することが、知識ベースの規模を拡充することに先だつ課題である。この記述法開発にあたって、将来知識ベースの範囲が拡充された場合でも十分な汎用性を維持するためには広い範囲の記録を参照することが望ましいが、投資できるマンパワー上の制約から、本研究では高速炉特有のある1系統を対象を絞った。

「常陽」に関する上述の記録の対象となる系統の内、比較的記載が豊富でかつ高速炉特有のものに2次主冷却系の純化系がある。この純化系の系統を図2-1に示す。「常陽」で用いられる冷却材は金属ナトリウムであるが、運転温度が凝固点よりも十分な余裕を持って高く設定されているために、主循環系から分岐させたループ内で温度を下げることにより、効果的に不純物を析出させることができる。析出した不純物を含んだナトリウムをステンレス製の網を通すことにより、不純物粒を捕獲した後、再び主系統温度まで昇温する

この純化系の動作プロセスから想像されるように、運転や保守において経験される不具合も、機械、機構力学、流体力学、熱力学、化学等、多くの工学分野にまたがるものとなる。また、析出した不純物粒の形状、ステンレス網での捕獲等、不確定性が強く第一原理に基づく数値モデルの構築が困難な要素が強

い。このことから、本研究の目的に適った例題として採用した。

また、この研究を開始した当初は、運転員の診断や対応操作における対処能力を向上支援の対象として限定していた。しかし、高速増殖炉は、先行例を参照することが困難で、生産（建設）数が少なく、現在では発電そのものよりもむしろそのための技術開発が建設目的である。このようなシステムでは、運転を始めた後に得られる経験に基づいて機器や部品を新たな仕様のものに交換したり、監視、操作や点検保守の方法を変更したりするが多い。このようなハードとソフト双方の不具合発見とその解決の経験にも、診断や対応操作に劣らず継承される必要の高い知識が豊富に含まれることが明らかになった。むしろ、「常陽」のような対象では、一度経験された不具合に対して、完全に元の状態即ち改良を一切施さない復旧のみを行って運用を再開する場合に考察の対象を限定することの方がむしろ不自然である。従って、昨年度に実施した故障語彙に関する検討に加えて、本年度では、プラントのハードの改良や人間の作業に関するソフトの見なおしについても考慮に入れることとした。「異常」発生の際について知識が、このような改良や見なおしに関する立案とその実施後に得られる「正常」状態の運転や監視に反映され、実用に耐える工学的知見が蓄積されるのは言うまでもない。

なお、本報告書は平成10年度の核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構：旧動力炉・核燃料開発事業団）と大阪大学産業科学研究所との共同研究の成果報告書である。研究に当たっては、大阪大学が従来提唱していたオントロジー工学の概念に添って、人工物の故障に関する概念の整理と記述を担当し、サイクル機構は所有するプラントについて現在まで実際に蓄積・運用されている故障発見、補修記録の分析とソフトウェア化を想定した場合の技術課題の整理を担当した。

2. 故障オントロジーの構築

2-1 オントロジー

本研究では、大規模な系の補助的な系における不可逆な不具合を中心に、それに対する人間の理解を支援するシステム構築を目的としている。このような目的に添った同様の研究は他にも散見されるが、システムそのものに対する人間の理解可能性については議論されることが少ない。特に故障診断については、システムが診断している対象が自明であるとの認識が動かしがたく定着していることから、これを改めて考察しようとする姿勢は極めて稀にしか現れないのが実情である。しかしながら、「故障」、「原因」といった概念は、診断のアルゴリズムに関する論点を浮き立たせるために設定されるような例題においては定義が明確であるが、原子力プラントの運転において、真に技術開発が望まれているような、多様な機器からなる系統で生じうる広範囲の事象を対象にした問題では、曖昧であることが多い。人間同志の意思疎通においては、多くの場合背景にある文脈が共有されているために、このような言語は個々の状況において異なる意味を持ち、その意味が情報の発信側と受信側で一致しさえすれば支障は無いが、ソフトウェアを構築するためには更なる厳密化が要求される。

工学物を正常、安全に維持、運転するという目的に照らせば、「原因」とは、それを取り除けば同じ不具合の発生可能性が否定されるものでなければならない。しかし、現実には我々は「原因」という言葉を様々な意味で用いる。例えばあるポンプの故障の原因として「材質の劣化した軸受け」という部品と、そのさらなる原因である「潤滑不良による発熱」という影響の2つを考えることができる。前者の原因-結果関係の解釈は機能階層関係に基づいた時間を伴わない認知的な関係であるが、後者のそれは物理的な因果関係に対応しており時間の経過を伴う。このように、2つの故障原因は単なる相対的關係ではなく、まったく種類が異なっているにも関わらず、同じ故障原因という言葉で表されている。本章では前者を認知的故障原因、後者を物理的故障原因と呼び、両者を明確に区別する。

このように曖昧である「故障原因」概念などを明確化することで初めて、故障知識ベースの能力を明らかにすることができる。例えば、従来の多くのモデルベース故障診断システムは故障している部品を同定しており、結果として認知的故障原因を推論しているとみなすことができる。しかし、本章で示すように物理的故障原因を推論する能力はなく、故障している部品のさらに深い故障原因は隠れたままになる。そのため、同定された部品を交換するだけでは、故障が再発する可能性を否定できない。

故障知識ベースの能力や性質に関する従来の議論は、その無矛盾性等の論理

的性質や多重故障の診断の可否のような論理的レベルにもものに留まっている。しかし、「故障」を対象とするソフトウェアの研究の初期で Davis[Davis 8 4]によって指摘されているように、診断システムは特定の物理的意味を持つ仮定に基づいて限られた範囲の故障しか扱っていない。例えば、多くのシステムでは部品間の接続関係が変化するような故障は扱っていない。このような能力の限界を表現できるような概念に関する議論は不十分で、知識ベース、さらにはそれに基づくシステムの能力や性質は暗黙的なままである。

このような知識ベースシステムの能力の明示化の鍵として注目されているのが「オントロジー」である[Mars95, 溝口 96, 溝口 97]。オントロジーは概念化の明示的な規約であり、概念体系である。知識ベースシステムの問題解決の能力・仮定・解法を表現する概念を定義するオントロジーはタスクオントロジーと呼ばれる[溝口 97]。タスクオントロジーに基づいて記述された、ある知識ベースシステムの問題解決に関する記述をタスクモデルと呼ぶ。タスクモデルは知識ベースシステムを設計した際の合理的判断の根拠とその結果を表しており、「設計意図」を表現している[溝口 97]。知識ベースシステムの設計意図の明示的表現は、知識の再利用、システムの協調動作に本質的に貢献する。

本章では、故障に関するオントロジーを示し、その利用と効果について述べる。まず2-2-1節において前述した故障原因の2種類の概念についてさらに詳細に議論する。次に2-2-2節において故障の発生する物理的な過程を考察し、物理的故障原因や故障箇所といった概念に故障事象という概念に基づいた明確な定義を与える。これらの概念に基づいて、2-2-3節において故障を様々な観点から分類し、故障のクラスを概念化する。

故障オントロジーは以下のように用いることができ、用い方によってそれぞれの効果を生む。

| 用い方 | 効果 |
|-----------------|---|
| 能力を表現する語彙 | 故障診断システムの扱える故障の範囲を明確に記述できる |
| システム設計・モデル記述の指針 | より広い範囲の故障を扱える故障事象に基づく故障仮説生成システムを実現できる |
| システムを制御する際の語彙 | 物理的概念に対応した故障クラスを用いて、疑わしい故障から段階的に推論を行える。 |

まず、オントロジーに定義された故障クラスはこれに基づいたシステムの「能力を表現する語彙」として用いられ、そのシステムの扱える語彙の範囲を物理的意味をもった概念を用いて明示化することができる。明示された特徴や限界

によって、利用者が各自の要求に適したシステムを選択することが可能になる。2-3において、代表的なモデルベース故障診断システムである General Diagnostic Engine (GDE)[de Kleer 87]を例として取り上げ、GDE が限られた範囲の故障しか扱っていないことを明らかにする。

次に、ある能力を持った故障知識ベースに基づいてシステムを設計したり、モデルを記述する際に、対象を捉える際の視点や記述の際の語彙とガイドラインを与える[溝口 97]。まず、従来のモデルベース故障診断システムで扱うことのできる事象範囲の限界を打破するという目標に照らせば、オントロジーで定義された故障事象概念が故障発生過程を推論するための基本的要素となる。この概念に基づくことで、より広い範囲の故障仮説を生成するシステムの実現が可能になることを2-4で述べる。さらに、オントロジーで示される故障原因の網羅的な分類がモデル記述に対する指針の役割を果たすことで、広い範囲のモデルの記述が可能になる。

最後に、オントロジーはシステムを制御する際の語彙を与える。ユーザとの対話的な問題の扱いや推論結果の理解のためには、信頼度といった数値ではなく問題に特有の概念を用いてシステムを制御できる必要がある。ここでは、広い範囲の故障を効率良く推論するために段階的に故障を扱う際に、その推論範囲を指定する語彙として故障クラスを用いる。信頼度といった数値ではなく、構造変化や時間経過といった物理的概念に対応する故障クラスを用いることで、故障の疑わしさに関する、経験や知識に根ざしたユーザの感覚との照合が可能になる。

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4つのレベルがある[Skuce 95]。本オントロジーは公理集合による記述に向けた概念の抽出と組織化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。

2-2 故障オントロジー

2-2-1 故障原因

本節では、人間がどのような概念を故障の原因と感じているかということを議論し、人間のナイーブな理解としての故障原因を定義する。本節での議論は（人間またはシステムが）故障診断を行う方法や順序とは独立である。本節で述べる概念間の関係を図2-1に示す。概念は図中に示す識別番号を持ち、本文中では記号bを付けて示す。

故障b1概念には故障が起こった後の対象の系の状態である故障後状態b2（図2-1の右の平面）と、それへの遷移を表す故障発生過程b2（図2-1の2つの平面の間）の2つの意味がある。認知的故障原因b6は故障後状態b

2における機能階層関係（図の垂直方向）に注目している。故障診断が終了した後でその結果を解釈したとき、副機能 f_1 の機能不全が上位機能 f_0 の機能不全をもたらしたという機能レベルにおける認知的因果関係 b_4 の認識ができる。その認識に基づいて、下位部品 c_1 が上位部品 c_0 の故障の認知的原因 b_6 であると言える。このように、認知的原因は部品（故障箇所 t_{26} ）を示す。認知的原因を考慮する際には、その根底にあるはずの機能不全の間の物理的因果関係 b_5 は意識されず、機能の階層関係のみに基づいていると考えられ、原因と結果の間に時間に対応しない。

一方、物理的故障原因 b_7 は故障発生過程 b_3 に注目しており、故障後状態 b_2 を物理的に生起させた状態のことを言う。物理的因果関係 b_5 は時間軸（図の水平方向）に沿っており、認知的故障原因 b_6 の部品が故障後状態 b_2 であることのさらなる原因を説明する。

定性推論システムが扱う因果関係は時間概念と対応しており物理的因果関係 b_7 を意味している。一方、Cobj::nsobj::lidatiobj::n 理論[Bylander 85]は対象の理解として認知的因果関係 b_6 を推論する試みであるが、両者は区別されていない。

多くのモデルベース故障診断システムは後で述べるように、故障している部品を同定している。機能階層知識に基づく診断方式（例えば、[Larssobj::n 96]）では、階層をトップダウン的に探索し、故障している部品を同定する。定性推論や制約に基づく診断システム（例えば、[de Kleer 87]）は、部品の正常時の振る舞いを表す制約に基づいて推論しているが、診断結果は故障している部品である。つまり、従来の多くのモデルベース故障診断システムは、結果として認知的故障原因 b_6 を推論していると解釈することができ、物理的故障原因 b_7 については推論していない。部品の機能不全は物理的因果連鎖の途中の状態であり、さらなる原因が存在する。故障の再発を防ぐためにはそのような深い故障原因に対処する必要がある。

以下では、故障発生過程 b_3 について検討することで、物理的故障原因 b_7 についてさらに明確な定義と分類を行う。以降で単に故障原因と述べた場合は物理的故障原因 b_7 を指すものとする。

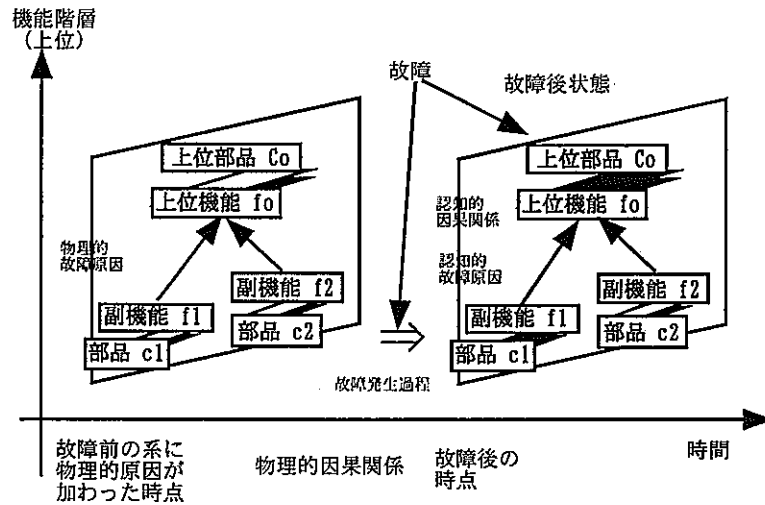


図 2 - 1 : 認知的故障原因と物理的故障原因

2 - 2 - 2 故障発生過程

故障発生過程 b 3 を状態 t 1 の間の物理的因果連鎖として分析し、表現するための概念を同定した結果を図 2 - 2 に示す（本文中では記号 t を付けて示す）。状態はひとつまたは複数のパラメータとその値の組で表される。パラメータのうち、意図されている状態を表すパラメータを意図パラメータ t 3、そうでないものを意図外パラメータ t 4 と呼ぶ。正常な振る舞いのシミュレーションを行えるという条件で作っている故障診断システムでは、モデル化されているものが意図パラメータであり、そうでないものは意図外パラメータである。また、物理的数値と直接対応する物理パラメータ t 5 とそうでない概念パラメータ t 6 に分類することができる。例えば、物が存在するといった状態は物理量では表現しにくく、概念パラメータである「存在」として表現される。一般に、意図パラメータは物理パラメータである。

故障発生過程を何らかの原因による部品の状態の遷移（事象 t 2 と呼ぶ）の連鎖として捉える。事象は 4 つ組（原因 t 7、結果 t 8、箇所 t 9、時間 t 10）で表現される。遷移の原因 t 7 としては部品外部からの影響 t 3 1 や時間の経過による経時効果 t 3 2 などが考えられる。影響はさらに意図されているかどうかで入力 t 3 8 と外力 t 3 9 に分類され、また伝わり方から構造間影響 t 4 0 と空間影響 t 4 1 に分類される。

本オントロジーでは不可逆な状態遷移を故障事象 t 4 3 と呼び、原因 t 7 の

状態（多くの場合は影響 t_{31} ）を故障原因 t_{13} 、結果 t_8 の状態を故障状態 t_{17} と呼ぶ。状態遷移が可逆な場合は準故障状態 t_{19} と呼び、内部状態が変化していない場合は伝播事象 t_{44} による異常状態 t_{20} と呼ぶ。

診断対象の系全体における故障の発生過程は、故障事象 t_{43} と伝播事象 t_{44} の連鎖として捉えることができる。つまり、故障事象は他の故障事象または伝播事象を引き起こし、結果として徴候が観測される。与えられたモデルの中での因果関係においてそれ以上遡れない最上流の故障原因を絶対故障原因 t_{34} と呼ぶ。一般に絶対故障原因は経時効果 t_{32} であるか、または現在考慮している対象モデルの外からの影響 t_{31} である。後者の場合は実世界においてはそのさらなる原因が存在する場合があります、それらを究極故障原因 t_{35} と呼ぶ。

一方、伝播事象の原因を異常原因 t_{14} と呼び、伝播事象の連鎖のなかで最上流の原因を絶対異常原因 t_{37} と呼ぶ。絶対異常原因より上流の因果連鎖にかかる時間を故障時間 t_{29} 、下流を故障後時間 t_{30} と呼ぶ。故障原因が故障時間における故障事象の原因を説明するのに比べて、異常原因は故障後時間において異常値の発現している状態を説明する。その意味で、観測された徴候を説明する徴候原因 t_{42} と呼べる。

2-2-3 故障クラス

これまで述べてきた故障に関する概念を用いて、呼称を様々な観点から分類し、故障クラスを同定することが出来る。図 2-3 は故障クラスと斜字体で書かれた例を示している（本文中では記号 f を付けて示す）。故障クラスの分類は、図 2-2 の概念に対応している。例えば、設計者によって意図されているパラメータ t_3 で表現できるバルブの固着といった機能不全を表す故障は、部品の正常な振る舞いを表現するモデルの否定で表現できるので正常否定故障 f_{13} と呼ばれる。一方、汚損や付着のように意図されていないパラメータ t_4 が必要な故障は、意図外状態故障 f_{14} と呼ばれる。また、物理量に直接対応するパラメータ t_5 で表現できる故障をパラメトリック故障 t_{15} と呼び、変形や付着といった概念パラメータ t_6 で表現される故障をノンパラメトリック故障 f_{16} と呼ぶ。結果状態 t_8 に関しては、例えば結果として変化する属性によって、質や強度などの部品の性質の変化 t_{23} が起こる性質故障 f_{10} 、破損などの形状が変化 t_{24} する形状故障 f_{11} 、漏れや接触などのように部品の構造的な位置関係や接続関係が変化 t_{25} する構造故障 f_{12} に分けることができる。

故障クラス分類は、図 2-2 の概念そのものよりも概念を区別するために用いた概念 (分類観点) に基づいている。一般に、ある概念 C を分類する際には分類の観点となるような C の属性とそのとりうる値の集合を同定することが重要である。図 2-2 は故障概念の重要な part-obj::f 要素である原因・結果などを分類しているため図 2-3 と構造が似ているが、本質的には分類観点属性とその値の列挙という役割を果たしている。

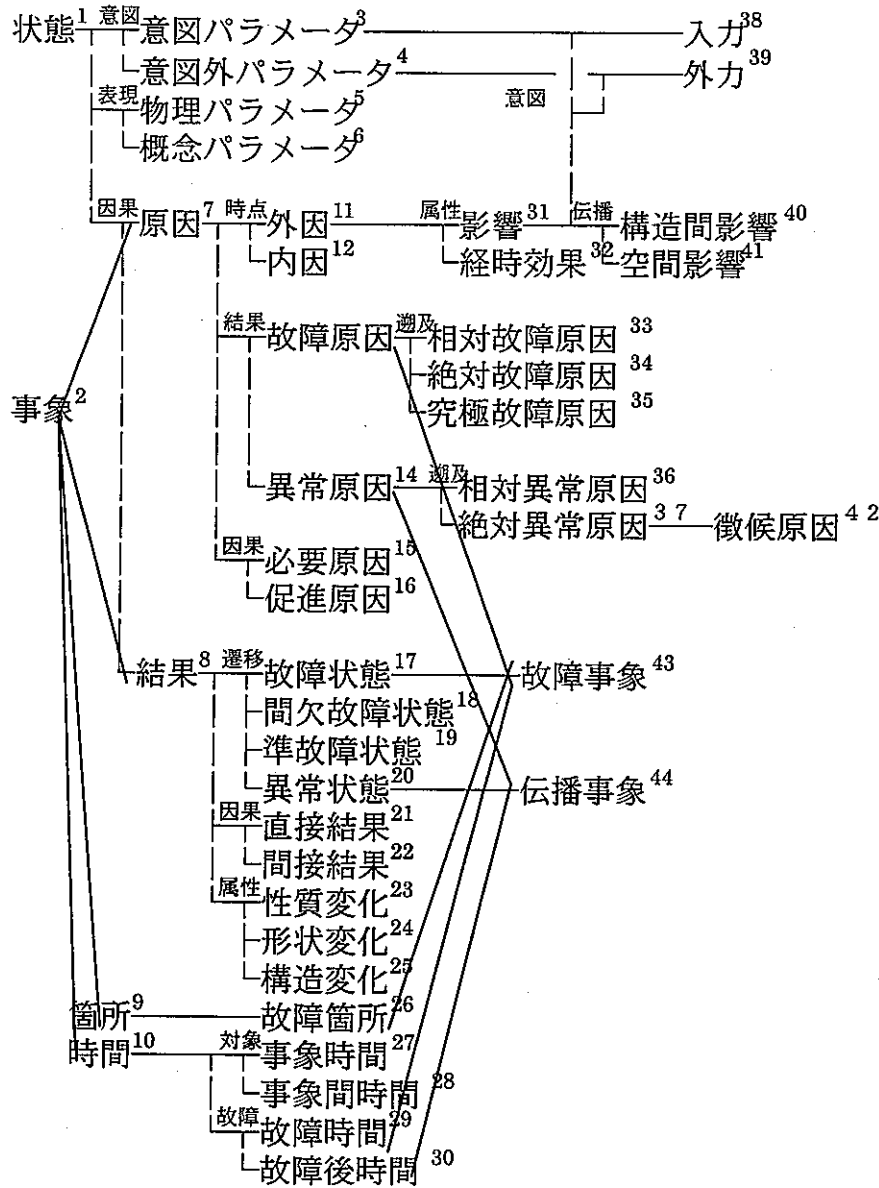


図 2-2 故障発生過程を表現する概念

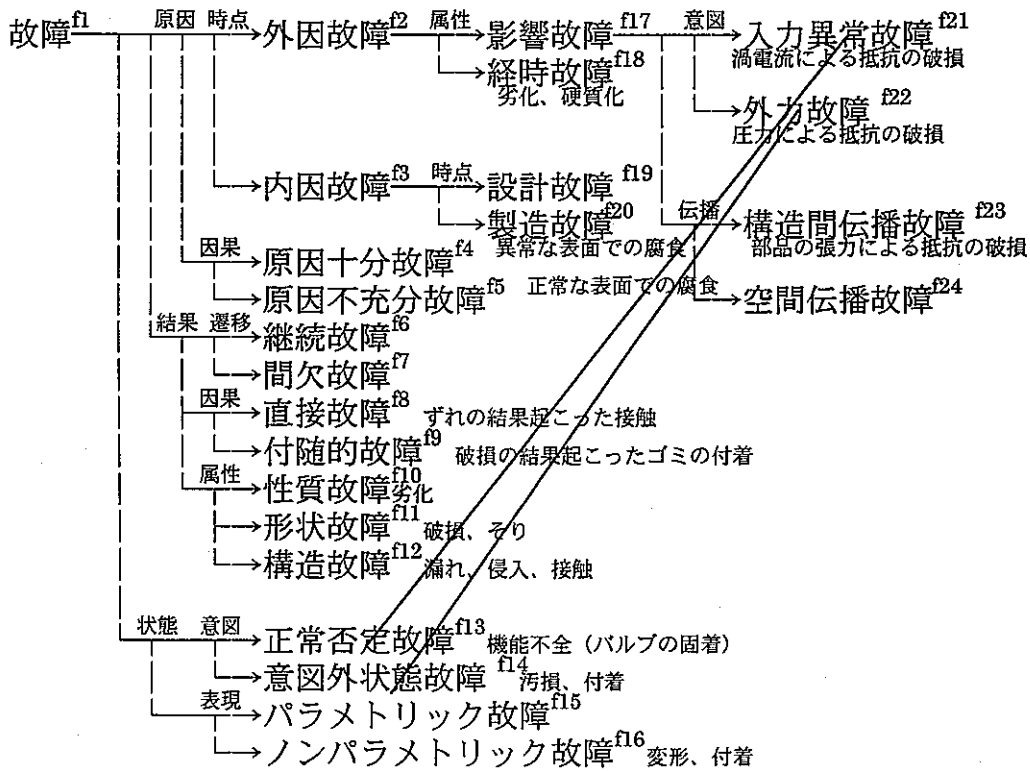


図 2-3 故障クラス

2-3 故障知識ベースに基づくシステムの能力

故障オントロジーが提供する語彙を用いて、故障を説明するシステムが扱える故障の範囲を記述できる。ここでは記述例として代表的な、制約に基づくシステムである GDE[de Kleer 87]を取り上げる。

まず同定可能な故障原因を検討すると、GDE は故障後時間(t30)に基づいて伝播事象(t44)を推論することによって、故障箇所(t26)及び徴候原因(t44)を同定しており、結果的に認知的故障原因(b6)を同定していると言える。故障時間(t29)について推論しておらず、物理的故障原因(b7)を同定することが出来ない。

次に診断できる故障の範囲について検討すると、GDE では故障は「正常でない振る舞い」と定義されるので、正常否定故障(f13)を扱っていると言える。しかし GDE のモデルは意図されている物理パラメータから構成されるので、意図外状態故障(f14)やノンパラメトリック故障(f16)は表現できず扱えない。

さらに、部品間の接続関係は変化しないと仮定され、構造故障(f12)、外力故障(f22)、空間伝播故障(f24)のような正常とは異なる部品間の関係を推論することはできない。従って、これらの故障が発生したときには、故障していない部

品が故障していると判断されたり、故障している部品が同定されないことが起こりうる[Davis 84]。

以上の考察結果を図示すると図4のようになる。GDE は正常否定故障(f13)かつパラメトリック故障(f15)の故障後状態(b2)のみを推論している。このため、GDE で診断された故障箇所のほかにさらに因果連鎖の上流の故障原因(箇所)が存在することがある。そのような深い故障原因に対処できないため、同様の故障が再び起こる可能性がある。

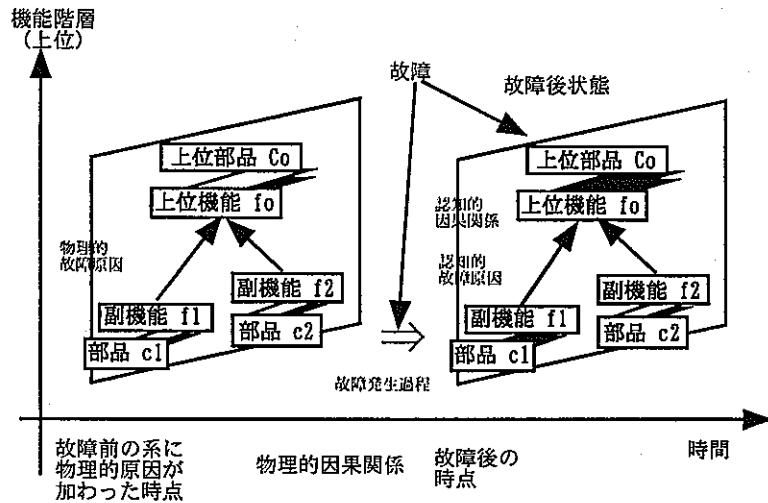


図2-4 : GDEの故障診断範囲 (網がけ部分)

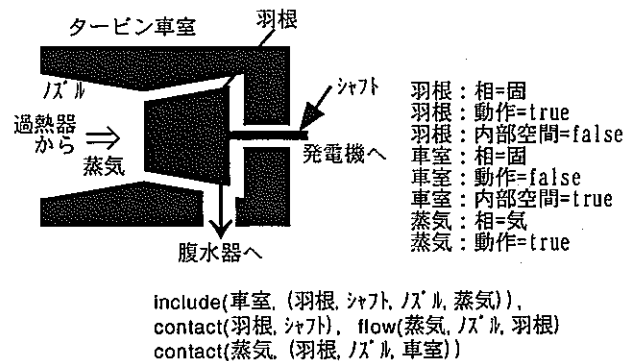


図2-5 : タービンのオブジェクトモデル

2-4 故障事象概念に基づいた故障説明システム

前節で示したように、従来の故障知識ベースに基づいたシステムは物理的故障原因を同定していないため、故障の深い原因を突き止めることができなかった。我々はこのような深い故障原因を網羅的に数え上げることを目指して、故障仮説生成システムを開発した。人間による診断行為は常識や経験に基づいて

おり効率が良いが、それにとらわれて可能性のある故障原因を見落とす場合があるため、計算機による網羅的故障仮説生成はそのような見落としに気づかせる効果があると考えられる。したがって、より広い範囲の故障原因を数え上げることを目標とした。

前述したようにこのシステムの実現にあたって、故障オントロジーは設計指針を与える役割を果たす。第一に、故障オントロジーで定義された故障事象概念をシステムの中心的概念とした。第2に、故障の原因と結果の網羅的分類に基づいて、広い推論範囲を実現するためのモデルを記述した。

2-4-1 モデル

故障事象に基づいた故障推論では、対象の系をオブジェクトの集合として捉えて、オブジェクトで起こる状態遷移（故障事象）やその間での異常値の伝播（異常伝播事象）を推論する。以下ではまずオブジェクトモデルについて説明し、次に故障事象モデルについて述べる。

オブジェクトモデルは対象の系を構成する物の正常時における属性と位置関係を表す。オブジェクトは故障する主体となるものであり、タービンといった装置としての部品とともに蒸気や油などの媒体等も含む。例として発電プラントのタービンのオブジェクトモデルは図2-5のようになる。オブジェクトの属性としては故障事象を弁別するために必要なものとして、相、正常時において運動するかどうか（動作）、内部・外部を区切る境界があるかどうか（内部空間）を記述する。それ以外の形状や強度等の属性は、値として正常時と比較した「正常」または「異常」という定性値をとる。ここでは、一般的な定性推論システムに相当する定性的推論機構のみについて議論し徴候検出などについては議論しないので、これらの属性の値は推論の初期状態では（徴候として外部から与えられる異常値を除き）正常値をとるものとする。したがって、正常時の値を表すモデルには定性値は明示的には記述されない。オブジェクト間の位置関係としては、接触している関係(cobj::ntact)や包含関係(include)などを記述する。また、位置関係の一種として流体の流れる向き(flobj::w)を記述する。

故障事象モデルはオブジェクトにおいて一般的に起こりうる故障事象(t43)を表現する。故障事象モデルは故障原因(t13)、動作、故障状態(t17)の3つの要素からなる。図2-2に示すように、ある対象における故障発生過程(b3)を構成する事象(t2)は4つ組（原因(t7)、結果(t8)、箇所(t9)、時間(t10)）で表現される。つまり、故障事象モデル f は、その故障原因 f c の条件にあるオブジェクト o が一致したとき、f の故障状態を f e、動作にかかる時間（後述）を f t とすると、事象 e1= $\langle fc, fe, obj::, ft \rangle$ が起こる可能性があることを意味している。

故障原因と故障状態は4つ組<主体、属性、関係、値>で記述される。主体に

はオブジェクト（モデルでは”obj”と表記される）または環境(“env”)のいずれかが記述される。環境は部品の近傍の領域をさす。本章では obj1 の機能領域を env1 と表記し、添え字では対応関係を表す。環境の属性には「温度」「圧力」「物」などがある。属性「物」は「存在」または「存在しない」を値としてとり、水滴やゴミなどの小さな浮遊物等が部品の環境に存在する（しない）ことを表す。動作はその動作の主体、動作を表す動詞、長期・短期・瞬間でのいずれかである事象時間(t27)で記述される。

これまでに55個の故障事象モデルが同定されている。表1にその一部を示す。表のなかで*がついている状態は、状態遷移にとって必須ではないがそれを促進する効果のある促進条件(t16)、または、必ずではないが付随して起こる可能性のある間接結果(t22)である。例えば、付着現象では、ある個体オブジェクトの周りに小さな浮遊物が存在することが必要原因(t15)となって、「物が付く」という短期動作が起こり、直接結果(t21)としてオブジェクトの表面に物が付いた状態になる。さらに、間接結果(t22)として形状が正常でなくなり、摩擦係数が正常より増減することが記述されている。

さらに伝播事象(t44)の一部を表す異常伝播事象モデルを表2のように記述する。異常伝播事象は異なるオブジェクトの環境の間での伝播として表現される。あるオブジェクトの環境の圧力は、接している異なるオブジェクトの環境にしか伝わらないが、物と熱はそのほかにも近傍や流体の下流のオブジェクト、または囲んでいるオブジェクトの環境にも伝わることをモデル化されている。これらのモデルが空間影響(t41)や外力(t39)を扱うことを可能にする。

表1：故障事象モデルの例

| 語彙 | 故障原因 | 故障動作 | 故障状態 |
|----|---|------------|---|
| 付着 | env.物=存在 and obj相=固 | 物付く(短) | obj物=存在*obj形状≠正常*obj摩擦係数>正常 |
| 混入 | env.物=存在 and (obj相=液 or 気) | 物まざる(長) | obj物=存在 obj質≠正常 |
| 劣化 | *env.温度≠正常 | obj変化する(長) | obj強度<正常 obj質≠正常 obj表面≠正常 |
| 腐食 | obj相=固 and *obj表面≠正常 | obj腐食する(長) | obj強度<正常 obj形状≠正常 |
| 膨張 | env.温度>正常 | obj膨張する(長) | obj体積>正常 obj形状≠正常*obj表面≠正常 |
| 磨耗 | obj相=固 and *obj位置≠正常 and *obj動作=true | obj磨耗する(長) | obj形状≠正常*env.温度>正常*env.表面≠正常 |
| 衝突 | env.物=存在 and obj相=固 and *flow(obj1,obj2,obj) | 物ぶつかる(短) | e.圧力>正常 and *e.表面≠正常 |
| 接触 | obj位置≠正常 and obj相=固 and *near(obj,obj1) | objぶつかる(瞬) | e.圧力>正常 contact(obj1,obj) |
| 破損 | (obj強度<正常 or env.圧力>正常) and obj相=固 | obj壊れる(短) | obj形状≠正常*env.物=存在 |
| ずれ | env.圧力>正常 and obj相=固 | obj動く(短) | obj位置≠正常 |
| 侵入 | (obj相=液 obj相=気) and contact(obj1,obj) and obj1内部空間=true and obj1形状≠正常 | obj入る(瞬) | env(in).物=存在 and include(obj1,obj) |
| 漏れ | (obj相=液 or 気) and include(obj1,obj) and obj1形状≠正常 | obj漏れる(瞬) | env(out).物=存在, (include(obj2,obj1) and include(obj2,obj)) |

表 2：異常伝播事象モデルの例

| 語彙 | 必要原因状態 | 故障動作 | 直接結果状態 |
|---------------|--|----------|-------------------------|
| 圧力が伝わる | env1:圧力>正常 and contact(obj1,obj2) | 圧力伝わる(短) | env2:圧力正常 |
| 接しているものに物が流れる | env1:物=存在 and contact(obj1,obj2) | 物:流れる(短) | env2:物=存在 |
| 近傍に物が流れる | env1:物=存在 and near(obj1,obj2) | 物:流れる(短) | env2: 物=存在 |
| 流体によって物が流れる | env1:物=存在 and flow(obj1,obj2) | 物:流れる(短) | env2: 物=存在 |
| 包含関係に物が流れる | env _{in} 1:物存在 and include(obj1,obj2) | 物:流れる(短) | env2: 物=存在 |
| 物が侵入する | env _{out} 1:物=存在 and 内部空間=true and obj1:形状≠正常 | 物:入る(瞬) | env _m 2:物=存在 |
| 近傍に熱が伝わる | env1:温度>正常 and near(obj1,obj2) | 物:伝わる(短) | env2:温度>正常 |

2-4-2 故障事象推論方式

これらのモデルを用いた推論には結果を推論する順行推論と原因を推論する逆行推論の2つがある。逆行推論へ入力として与えられた状態を起こす異常な状態（原因状態(t7)）を特定する。順行推論は入力として与えられた状態が起こす異常な状態（結果状態(t8)）を特定する。故障診断タスクでは前者が故障仮説の生成、後者が仮説検証のための徴候生成に用いられる。

推論プロセスはマッチングと評価の2つのステップからなる。逆行推論のマッチングステップでは、現在状態とマッチする結果状態を持つ事象を探す。選ばれた事象は現在の状態を起こした可能性があり、現在の状態の因果連鎖の一部である。複数の事象が選ばれた場合はそれらの間の関係は OR である。次に評価ステップはその事象の原因状態の記述に従って、新しい現在状態を作る。そして、さらなる原因を探すための次のマッチングステップが始まる。

故障事象モデルを用いた逆行推論は、オブジェクト状態遷移の物理的な相対故障原因(t33)として、主に部品の周りの環境の異常を推論する役割を果たす。一方、故障伝播事象モデルは、異なる部品（の環境）間の伝播事象を推論し、逆行推論の結果は相対異常原因(t36)である。

順行推論は逆行推論とは逆方向に推論を行う。マッチングステップでは現在の状態と一致する原因状態を持つ事象を探し、評価ステップでは事象の結果状態の記述に従って新しい現在状態を作る。

2-4-3 推論例

ここでは、タービンの羽根の形状が異常であるという徴候に対する故障原因仮説を生成する逆行推論について説明する。推論の結果を図2-6に示す。

まず、(obj:形状≠正常)を結果状態に持つ故障事象を探すと、羽根の「磨耗」「破損」などが推論される。破損の原因状態は強度の低下または圧力が加えられたことであるので、次に、破損の原因として「劣化」による強度の低下や、

なんらかの浮遊物が「衝突」したこと、さらには圧力が接触状態にあるシャフトから「伝わった」ことなどが導出される。羽根に衝突した浮遊物については、「流体によって流れる」事象を推論することで上流の過熱器から蒸気とともに流れてきた可能性が推論される。

2-5 故障クラスに基づいた段階的推論

一般に人間が故障診断を行う際にはある程度なにが疑わしいかを経験などによって決めて、まずその範囲内で推論を行うと思われる。その範囲で故障原因が発見できない時に初めて、範囲を拡大する。このような段階的推論は推論効率の向上に貢献する。また、いわゆる「思わぬ故障」とは人間が当初考慮しなかった範囲に発見された真の故障原因を指すと考えられる。人間にとっても考慮に入れにくいような故障を含む広い診断範囲を段階的に診断することによって、「思わぬ故障」を扱えるようになると考えられる。

この段階的推論システムでは、推論対象とする故障の範囲を指定するために、表2-3に示す7つの制御軸を同定し、それぞれ2つの選択肢を用意した。選択肢は故障クラスを語彙として用いており、物理的な概念と対応させることができる。選択肢Bによって形成される探索空間は選択肢Aによるものを含んでおり、広い範囲の故障をカバーすることになる。すべての選択肢をAにしたときの診断範囲は、多くの制約に基づく故障診断システムが扱える範囲と同じになる。

ユーザは制御軸のそれぞれの選択肢を選ぶことによって、システムの探索空間を制御することができる。一般的には、まず選択肢を全てAにして最も狭い診断範囲で推論を行わせる。推論結果を検証した結果故障原因が見つからなかったとき、どの故障クラスが疑わしいかを経験などに基づいて決定し、その選択肢をBにして再度推論を行わせることになる。診断システムは探索空間をその指定に応じて動的に変化させて推論を行う。

例として、さきほどの推論例と同じ徴候からの段階的推論を行った場合を考えてみる。最初の推論において、ユーザが全ての選択軸において選択肢Aを選択したとすると、従来のモデルベース推論システムと同じレベルの推論システム[来村 97]によって推論が行われる。軸 6,7,8 をBにすると、故障事象を用いた推論が始まるが、図2-6に示す故障事象のうち影がついている2つの事象は推論されない。次に、「軸3：変化属性」で「B：構造故障(f12)を含む」を選択すると、構造的な位置関係や接続関係が変化する故障を扱うモードになり羽根が車室に接触したことで破損した可能性が推論される。また、「軸4：影響伝播」で「B：空間伝播故障(f24)を含む」を選ぶと、過熱器から流れてきた

可能性が推論される。

この推論方式は、故障事象モデルに基づいているため構造変化を伴う故障などの可能性が非常に低い故障までを推論できる。また、故障オントロジーで定義された物理的概念に対応した故障クラス概念を用いて、探索空間を動的に拡大する仕組みを実現している。このような推論システムを用いることで、人間の経験を活かした故障の評価を行うことができる。また、当初考慮されていなかった故障を表現できることから、「思わぬ故障」までを不十分ながら扱っていると言える。

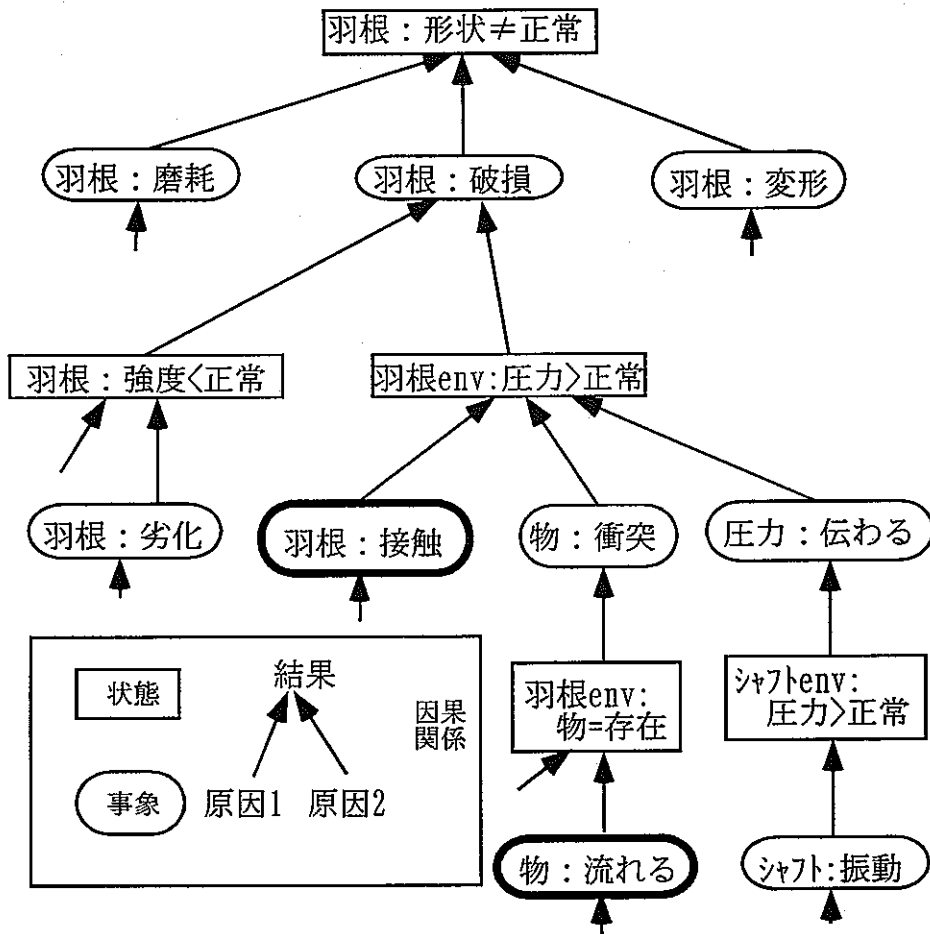


図 2 - 6 : 推論例 : 形状の異常の故障原因

表 2-3 : 段階的故障推論のための選択軸

| 軸 | 軸の名前 | 選択肢 A | 選択肢 B |
|---|---------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 原因十分性 | 原因十分故障(f4)のみ | 原因不十分故障(f5)も含む |
| 2 | 結果直接性 | 直接故障(f8)のみ | 付随的故障(f9)も含む |
| 3 | 変化属性 | 性質故障(f10)、形状故障(f11)のみ | 構造故障(f12)も含む |
| 4 | 影響伝播 | 構造間伝播故障(f23)のみ | 空間伝播故障(f24)も含む |
| 5 | 経時効果 | 影響故障(f17)のみ | 経時故障(f18)も含む |
| 6 | 意図パラメータ | 正常否定故障(f13)のみ | 意図外状態故障(f14)も含む |
| 7 | 物理パラメータ | パラメトリック故障(f15)のみ | ノンパラメトリック故障(f16)も含む |
| 8 | 故障時間 | 故障後時間(t30)のみ | 故障時間(t29)も含む |

2-6 検討

故障事象を用いた推論エンジンを実際に実装して、タービン及び変圧器を例題として動作が確認された。タービンについては専門書[関西電力 67]に挙げられた全ての故障原因を推論できた。この専門書に記載のない故障原因も推論されたが、そのいくつかは専門家によって実際に可能性がある、つまり妥当であると評価された。これは前述したように、「思わぬ故障」に対する能力が現れたものと言える。

段階的故障推論は故障仮説を疑わしいクラスのものに制限する役割を果たす。本システムでは推論範囲の決定はユーザの判断に任されている。これは、故障クラスの発生確率（またはその順序関係）といったものを一般的に記述することが困難だからである。しかしながら、軸によっては対象の状態や置かれている環境によってある程度決定できる。例えば、対象物が新しいことが既知であれば経時故障(f18)を疑う必要はない。

本章では述べなかったが、故障事象に基づく推論方式は制約式に基づいた推論方式[来村 97]と統合されて用いられることが適切である。

2章の参考文献

[Davis 84]:Davis, R: Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.347-410(1984).

[de Kleer 84] de Kleer, J., and Brown, J. S.:A Qualitative Physics Based on Confluences, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.7-83(1984)

[de Kleer 87] de Kleer, J., and Williams, B. C. :Diagnosing Multiple Faults, Artificial Intelligence, Vol.32, pp.97-130(1987).

[関西電力 67]関西電力神戸支店技術研究委員会：新版 火力発電用語辞典、オーム社、1967

[来村 97] 来村徳信、他：モデルに基づく問題解決のための流体系と時間のオントロジーの構築とその評価、人工知能学会誌、Vol.12, No.1, pp.132-143(1997)

[溝口 96] 溝口理一郎：形式と内容—内容指向人工知能研究の勧め—人工知能学会誌、Vol.11, No.1, pp.50-59(1996)

[溝口 97] 溝口理一郎、池田満：オントロジー工学序説、人工知能学会誌、Vol.12, No.4, pp. 559-569(1997)

[Skuce 95] Skuce, D.:E-mail communication on July 24th, 1995 at srkb@cs.umbc.edu

3. 「常陽」 2次主冷却系純化系の保守記録の分析

次ページ以降に、高速実験炉「常陽」の2次主冷却系純化系に関する、問題点の発見、対策の検討、解決に関する記録と、その記載内容の簡略な分類の結果を列記する。2章に記した、故障に関するオントロジーは、「物は如何に壊れうるか」という知識を、操作可能な形で人間と計算機が共有するための言語体系とも言えるものであるのに対し、この記録は、ある程度専門的な知識を有した利用者を想定したものである。従って、記述の枠組みも簡素で、個々の事例について、強調の必要性、必要な詳細度、理解の容易な記述法等を記入者が柔軟に判断できる形式で作成されており、現状では効率的な知識や経験の伝承に適していると考えられる。しかしながら、今後において、ここに記載された情報を用いた診断、保守支援ソフトウェアを目指すためには勿論、経験の少ない保守員、運転員への効率的な情報伝承を目指すためには、個々の記載内容が背景知識にあまり依存せずとも正確に把握されるような記述方式を考慮する必要があると考えられる。そのために、以下の分析においては、[題目]、[問題点の経緯]、[対策]、[得られた成果]の各々の記載内容の更なる分類を試みた。2章で論じた故障オントロジーに加えて、正常時に想定される物理プロセス、原因究明の手順、安全確保上のマンパワーの評価、事象の観測性、コスト評価、一過性の対策、等多様な内容が見出された。

表 3-1 : コールドトラップ風量制御ダンパの改造に関する記述

| | |
|--------|--|
| 題目 | コールドトラップ風量制御ダンパの改造 <対象機器><行為> |
| 問題点の経緯 | コールドトラップ風量制御はコールドトラップ内部温度を設定値に合わせるため給気ダンパ（1 段）によって制御しているが 1 段だけのダンパでは、ほとんど締め切り運転になり必要とする特性が得られない。そのため、給気口を仮のシートで覆い給気量の低減を図った上で風量制御をしている。 __部：対象機器の物理プロセスの説明 __部：現状の性能の限界 __部：現状の対応策 |
| 対策 | 給気量低減のために給気口に 2 段のダンパを設置した。1 段目は手動ダンパとし 2 段目を自動ダンパにより微調整を行うとしている。この改造により上記不具合は改善された。また、プロア駆動モータの絶縁劣化を防止するためにモータを開放型から密閉型に変更した。 __部：実施した改造 __部：改良の結果 __部：問題点に直接関係無い改造 |
| 得られた成果 | |
| 設計への反映 | コールドトラップ内部冷却に必要な風量を考慮した上でプロア風量を選定する必要がある。 |

表3-2：仮設コールドトラップの解体検査結果等に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 仮設コールドトラップの解体検査結果等 問題点の解決策実施後得られた情報 |
| 問題点の経緯 | <p>「常陽」の2次系は、これまで経験したことのない大きさと、長期の建設期間に加え、系統配管にフェライト鋼や炭素鋼を採用したため、初期純化には大容量のコールドトラップを必要とした。従って、これを全て本設コールドトラップでカバーするには、機器据付スペースが不足するという問題や機器製造費が高くなるという問題があった。</p> <p>__部：従来の背景 __部：従来の方法 __部：従来の方法の問題点</p> |
| 対策 | <p>本設コールドトラップには設けているコールドトラップ内エコノマイザを省略した仮設コールドトラップを設置して初期純化を行った後、本設コールドトラップと交換した。</p> <p>__部：ハードの改造 __部：ソフトの改造</p> |
| 得られた成果 | <p>(1) 仮設コールドトラップによる初期純化でプラグ温度 150℃まで下げることが出来、仮設コールドトラップの採用が、本設コールドトラップの負荷軽減の面から極めて有効であることを確認できた。</p> <p>(2) コールドトラップの取り換え、解体、サンプリング作業等に関し貴重な経験を蓄積することが出来た。また、捕獲不純物元素及びこれらのコールドトラップ内分布等コールドトラップの性能評価に関しても多くのデータを得ることができた。</p> <p>__部：問題点の解決の結果 __部：得られた知見</p> |
| 設計への反映 | |

表3-3：オーバーフロータンクでのアルゴンガス巻込みに関する記述

| | |
|--------|--|
| 題目 | オーバーフロータンクでのアルゴンガス巻込み |
| 問題点の経緯 | <p>オーバーフロータンクからナトリウムがオーバーフローする際には、同時にアルゴンガスを巻込むが、オーバーフローナトリウム流量すなわち純化系の汲上げ流量が増加すれば、このガス巻込量も増加する。このため、純化系流量とガス巻込量との関係等を調査した結果、純化系を 6m³/h で運転している時のガス巻込量は、ダンプタンクのバックアップフィルタの下流側までナトリウムベーパー及びミストを運び、アルゴンガス系に不具合を引き起こす量になっていることが確認された。また純化系電磁ポンプを 6m³/h で運転するとキャビテーション気味になり、時々配管振動を起こす等の不具合も生じていた。</p> <p>__部：問題点1 ...部：問題点2</p> |
| 対策 | <p>当初決定した通常運転時の純化系流量 6m³/h を 4m³/h に変更して運転を行い、オーバーフロー系としての機能、ユールドトラップの温度制御性及び純度管理の面で問題のないことを確認した。このため、この後、通常運転時の純化系流量を 4m³/h とした。また、弁やバックアップフィルタのアルコールによる洗浄を行う一方、取合い配管及び弁を 1B から 3B に変更しナトリウムベーパーの付着による配管閉塞等を起こさないようにした。</p> <p>__部：改造案の成立性確認作業報告 __部：改造案決定 ...部：付随改造（ソフト） __部：付随改造（ハード）</p> |
| 得られた成果 | <p>純化系流量を 6m³/h から 4m³/h に変更したことにより、アルゴンガス巻込量は 1/7 程度に低減し、アルゴンガス系への悪影響を抑えることができた。また、純化系電磁ポンプのキャビテーションも発生しなくなった。</p> <p>__部：改造の評価 __部：改造の目的達成度 ...部：問題2の解決</p> |
| 設計への反映 | |

表 3-4 : 主系統汲み上げ位置に於ける温度差に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 主系統汲み上げ位置に於ける温度差 |
| 問題点の経緯 | <p><裕度減少により不具合が懸念されるパラメータ名></p> <p>原子炉出力上昇に伴うナトリウムの昇温時、2次純化系の主系統汲み上げ位置に於ける温度差、即ち2次主冷却系コールドトラップナトリウム温度と、2次純化系出口ナトリウム温度との差が制限値 60℃を超え(50MW 出力上昇試験時 約 70℃)、汲み上げ配管の健全性が懸念された。</p> <p>この問題は純化系運転状態の変更(汲み上げ流量 6 ? /h→4 ? /h、コールドトラップ設定温度 150℃→120℃)及び主系統汲み上げ位置に於ける温度差制限値の見直し(60℃→50℃)により、さらに厳しいものとなった。</p> <p>___部：現状 ___部：可能性のある不具合 ___部：裕度の減少</p> |
| 対策 | <p>(1) コールドトラップを一時的にバイパスさせる</p> <p>(2) <u>ダンプタンク内装ヒータ (60kW) を投入する</u></p> <p>(3) <u>主系統汲み上げ位置に於ける温度差が制限値を超える場合、系統昇温率を制限する</u></p> <p>___部：対策案1 ___部：対策案2 ___部：対策案2</p> |
| 得られた成果 | <p>(1) <u>コールドトラップをバイパスさせることにより温度差を25℃～30℃低減できる。しかし純度管理上望ましくない。</u></p> <p>(2) <u>ダンプタンク内装ヒータを投入することにより温度差は減少した。</u> さらに、内装ヒータの投入時期を早めること(系統の昇温開始 12時間前)により、<u>最大温度差は50℃以内となり汲み上げ配管の健全性が確保できた。</u></p> <p>___部：案1の評価 ___部：案2の試行結果 ___部：案2に併せて行うソフト上の改良 ___部：案2+ソフト上の改良による問題の解決</p> |
| 設計への反映 | |

表3-5: コールドトラップ 予熱ヒータの分割に関する記述

| | |
|---------------|---|
| <p>題目</p> | <p>コールドトラップ 予熱ヒータの分割</p> <p>改造案の要約</p> |
| <p>問題点の経緯</p> | <p><u>メンテナンス作業などのため長時間純化系を停止する場合、コールドトラップは内部にナトリウムが満たされた状態で電気ヒータによる予熱保持がなされる。この時、コールドトラップは捕獲した不純物を放出しないよう、ナトリウムが凍結しない範囲で出来るだけ低温に均一予熱されることが必要である。</u></p> <p><u>しかし、コールドトラップの予熱ヒータは軸方向に沿って施工されているため、上部程予熱されやすくコールドトラップ内部に軸方向の不均一な温度分布が生じ、純化系再起動時一部捕獲不順物の溶出が見られた。</u></p> <p>___部：プロセス ___部：回避すべき不具合 部：不具合回避のための条件 ___部：施工 ___部：条件の不達成 部：不具合発生</p> |
| <p>対策</p> | <p><u>コールドトラップの予熱時における不均一な温度分布を解消するため、ヒータの施工をコールドトラップ軸方向に対して分割して行い、予熱制御も、分割した各ブロックごとの制御が行えるようにする。</u></p> <p>___部：解消したい現象 ___部：ハード上の改造案 部：ソフト上の改造案</p> |
| <p>得られた成果</p> | <p>実際の改造は実施していない。</p> |
| <p>設計への反映</p> | |

表3-6: コールドトラップの低温運転に関する記述

| | |
|--------|--|
| 題目 | コールドトラップの低温運転 新たに達成すべき条件 |
| 問題点の経緯 | <p>「常陽」に於けるナトリウムの純度管理及び監視は純化系のコールドトラップ及びプラグ計、サンプリングナトリウムの分析により行い、その制御対象は従来、<u>構造材のナトリウムによる腐食を抑えることを目的とし主にナトリウム中酸素量だけを定めてきた。今後の運転に於いてはCP等によるメンテナンスへの影響、ナトリウムの環境放出量の低減化を考慮した場合、純化系コールドトラップの制御温度を「常陽」運転値の150℃よりも更に低い温度で運転する必要がある。</u></p> <p>__部：プロセスの説明 __部：従来の状況 ...部：新たな要求 ...部：新たな制御条件</p> |
| 対策 | <p><u>2次純化系コールドトラップ設定温度を150℃より120℃に変更し、プラグ温度、サンプリングナトリウムの分析結果よりコールドトラップの性能を確認する。その後、連続運転を行いコールドトラップの低温運転の健全性を確認する。</u></p> <p>__部：試行ステップ1 __部：試行ステップ2 ...部：試行ステップ3</p> |
| 得られた成果 | <p><u>(1)コールドトラップの低温(120℃)運転は安定して行え、また純化系各部の温度について主系統汲み上げ位置に於ける温度差も含めて問題となる箇所はなかった。</u></p> <p><u>(2)プラグ温度はコールドトラップ設定温度に追従して下がり、またサンプリングナトリウムの分析結果でもわかる通り、コールドトラップの低温運転により系統ナトリウムの高純度管理が行えることが確認された。</u></p> <p>__部：他に問題を発生しないことの確認 __部：所定の目的を達成することの確認</p> |
| 設計への反映 | |

表 3-7 : ナトリウム純化特性試験 (仮説コールド・トラップによるフラッシング) に関する記述

| | |
|--------------------|--|
| <p>題目</p> | <p>ナトリウム純化特性試験 (仮説コールド・トラップによるフラッシング)</p> <p>実施内容 (具体的内容)</p> |
| <p>問題点 の経緯</p> | <p><u>2次系機器、配管内等へ混入した不純物を除去するため仮説コールド・トラップを用いてフラッシングを行い、最終的にはナトリウム中の不純物濃度も管理基準以内に保てることを確認するための試験を行った。</u></p> <p>___部：目的1 ___部：手段部：目的2</p> |
| <p>対策</p> | <p><u>試験はダンプタンク内純化、主系統純化及び補助系純化の3段階に分けて実施した。試験は、先ずダンプタンク内ナトリウム温度を約300℃まで昇温し、この高温ナトリウムにより、配管等をフラッシングしながらコールド・トラップ設定温度を徐々に下げ、最終的にはプラグ温度150℃まで純化する方法で行った。</u></p> <p>___部：実施手順概要 ___部：ステップ1部：ステップ2部：ステップ3</p> |
| <p>得られ た成果</p> | <p><u>主系統ナトリウム循環フラッシングに19日間、補助系ナトリウム循環フラッシングに8日間、純化系及びダンプタンクの循環フラッシングに約65日間をかけて行い、試験開始前約5.7ppm(酸素)であった不純物濃度も、一旦約22.5ppmまで上昇後最終的には約3.2ppmまで低下し、十分その目的を果せた。</u></p> <p>___部：各ステップの所要日数 ___部：各ステップ後の純度部：目的達成</p> |
| <p>設計へ の反映</p> | <p></p> |

表3-8：ナトリウム分析試験（サンプルリング操作確認）に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | ナトリウム分析試験（サンプルリング操作確認） |
| 問題点の経緯 | <p>サンプルリング装置内の可着脱継手（スウェージロック）に取付けられたサンプルリングチューブ内にナトリウムを閉じ込め、冷却した後、継手によりサンプルリングチューブを外し試料が得られることを確認するため実際に外して操作性を確認した。またサンプルリング試料を分析し、純度管理値を満足することを確認し併せてナトリウム純化試験へ反映させた。サンプルリング操作はその非放射性ということから、これまで大洗工学センターに於いて十分な実績があり、ほとんど問題はない。しかし、運用面において以下の経験を得た。</p> <p>①フェルール（継手金具の一つ）の挿入方向を反対にしたため、ナトリウム漏洩を経験した。また、このとき漏洩検出器が作動せずサンプルリングボックスを開放するまで漏洩が検知できなかった。</p> <p>②①に付随してサンプルリングボックスの気密性が不十分なことが指摘された。</p> <p>③サンプルリング操作に関して、1次系と同様48時間フラッシング完了後出入口弁同時「閉」とすることとし実施した。</p> <p>__部：問題点が抽出された作業1 __部：問題点が抽出された作業2 ___部：問題点1 ___部：問題点2 ___部：問題点3 ___部：運転の改善</p> |
| 対策 | <p>①のフェルール挿入方向反対、漏洩検出器不作動については、操作手順への反映とともに検出系の改善を図った。</p> <p>②についてはサンプルリングボックスの気密性を向上するよう改善した。</p> <p>__部：問題点1へのソフト上の対策 __部：問題点1へのハード上の対策 ___部：問題点2へのハード上の対策</p> |
| 得られた成果 | <p>・サンプルリングチューブフラッシングについては、当初計画していたフラッシング時間1時間を48時間に変更したが、ほぼ妥当なものと考えられる。</p> <p>・サンプルリングチューブ冷却特性については、チューブ内ナトリウム偏析を防止するには約4分以内にナトリウム冷却固化が必要だが、本設備はサンプルリング終了後ファンによる強制冷却を行っている。このときの冷却特性は、ナトリウム凝固点と考えられる。100℃まで約2分、冷却速度は64℃/minで、偏析防止に十分な特性を有している。</p> <p>サンプルリング試験では比較的取り扱いも容易であり分析結果も特に問題なかった。また純度管理値を満足し、ゴールドトラップ温度と酸素濃度分析値との対応はEichelbergerの溶解度曲線に近い値が得られた。</p> <p>__部：運転の改善の評価 __部：偏析防止性能の確認 ___部：取り扱い性 ___部：純度管理目標の満足</p> |

表3-9：電磁ポンプ汲み上げラインサイフォンレク機能に関する記述

| 題目 | 電磁ポンプ汲み上げラインサイフォンレク機能 |
|--------|--|
| 問題点の経緯 | <p>2次系ダンプタンクと純化系電磁ポンプ間の配管には、サイフォン効果をブレイクさせる機能が設けられていない。このため、純化系汲み上げライン（特に電磁ポンプ）にナトリウム漏洩が発生した場合2次系ダンプタンクからの無制限なナトリウム流出を止める直接手段が無い。</p> <p>___部：対象箇所 ___部：設備の仕様 ___部：想定上の不具合 ___部：進展が予想される事象</p> |
| 対策 | <p>ダンプタンク設置場所の床及び壁（床面から約30cm高さ迄）に鋼板ライニングを実施し漏洩ナトリウムとコンクリートが接触しないようにした。また万一ナトリウム漏洩が発生した場合にはダンプタンクを真空引きすることによりサイフォンレクさせることにしている。</p> <p>___部：対策実施箇所 ___部：ハード上の改善 ___部：目標とする状態1 ___部：対策の対象となる事象 ___部：ソフト上の改善 ___部：目標とする状態2</p> |
| 得られた成果 | <p>真空引きによってサイフォンレクさせる方法の妥当性が確認できていないこと、及びダンプタンク内ナトリウムが全て漏洩した場合に備えて壁面を鋼板ライニングするのは、鋼板量も多くなり大変である等の理由からサイフォンレクまたは仕切りの機能を有する遠隔操作弁を設けておくことを提案する。</p> <p>部：ソフト上の改善 部：ソフト上の改善の評価 部：ハード上の改善 部：ハード上の改善の評価 部：さらなる改善の提案</p> |

表3-10：2次トリムサンプリング装置出入口等の不具合現象に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 2次トリムサンプリング装置出入口等の不具合現象 |
| 問題点の経緯 | <p>2次トリムサンプリング操作時サンプリング装置の入口弁、出口弁について以下の不具合が発生した。</p> <p><u>入口弁：ハンドル操作と共に弁棒が回転し上下動しなくなった。</u></p> <p><u>出口弁：ハンドル操作中、弁が固着して開閉不能となった。</u></p> <p><u>これらの原因は共に、弁棒の廻り止めネジが外れたために廻り止めの機能がなくなったものである。</u></p> <p>__部：問題1の発生箇所</p> <p>__部：問題1</p> <p>___部：問題2の発生箇所</p> <p>__部：問題2</p> <p>___部：両問題に共通の不具合</p> |
| 対策 | <p><u>入口弁、出口弁ともに予備弁と交換し、弁棒の廻り止めを強固にするために、止めネジ穴をドリルにて追加工し、穴を弁棒の中心部近くまで深くしてネジの外れを防止した。更に止めネジは6角穴付ボルトを使用して、これをロックナットにてゆるみ止めを施した。</u></p> <p>__部：ハード上の改善1</p> <p>__部：ハード上の改善1、2の目標</p> <p>___部：ハード上の改善2</p> <p>__部：ハード上の改善1、2の結果</p> <p>__部：ハード上の改善3</p> <p>__部：ハード上の改善4</p> <p>___部：ハード上の改善3、4の結果</p> |
| 得られた成果 | <p><u>以後同様の不具合は発生しなくなった。</u></p> <p>__部：再発防止の確認</p> |

89年

表3-11: 2次純化系コールドトラップ予熱保持に関する記述

| 題目 | 2次純化系コールドトラップ予熱保持 |
|--------|---|
| 問題点の経緯 | <p>コールドトラップは内部のナトリウムをドレンしにくい構造のため、純化系ナトリウム流量停止、コールドトラップバypass、純化系ナトリウムドレン等によりコールドトラップ内ナトリウム流動を停止した場合には残留ナトリウムに対し予熱をしなければならない。一方、コールドトラップは、メッシュ内に不純物を析出させて除去するメッシュ内析出型であり、メッシュ内温度が上昇すると析出した不純物がメッシュ内を移行、またはメッシュ外への溶出が起これ、それらをナトリウム流動再開とともに純化系外に放出してしまうことが考えられる。そのためナトリウム流動停止後も通常運転時と同様にコールドトラップの制御点であるコールドトラップ第4メッシュナトリウム温度(コールドトラップ制御温度)を一定に制御できるようにコールドトラップ入口ダンプ(冷却用手動ダンプ)を頻繁に調節していた(自然通風の方法)。しかし、それでもコールドトラップ予熱ヒータ制御用熱電対が空気ジャケット部にあるため、自然通風の影響により、熱電対が冷やされ予熱ヒータ移動時間が長かった。これらの対策と操作の省力化、省エネの点から改善が望まれていた。</p> <p>___部：問題点1に関わる仕様 ___部：問題点1の対象の状態 ___部：問題点1 ___部：問題点2に関わる仕様 ___部：問題点2 ___部：従来の運転 ___部：従来の運転に関わる仕様 ___部：総合問題点</p> |
| 対策 | <p>コールドトラップの予熱保持方法をコールドトラップ出入口ダンプ全閉状態で予熱ヒータのみで行う方法で温度制御させた。</p> <p>___部：ソフト上の改善</p> |
| 得られた成果 | <p>コールドトラップ内部温度の差はほとんどなく、150℃から173℃において変動を繰り返すが、自然通風の方法のように高温とならず省操作で長期間の低温予熱保持が可能であった。又、コールドトラップ予熱ヒータ制御用熱電対に与える影響が少ないため予熱ヒータ稼動時間を短縮でき、約6000円/月(電気料金は13円/Kwhで計算)の省エネとなった。従って、コールドトラップ停止時、低温で予熱保持する場合、予熱ヒータのみによる保持方法が最も有効であることがわかった。</p> <p>___部：改善策によるプラント状態の向上 ___部：改善策による経済性の向上 ___部：総合評価</p> |

表 3-12：2次ナトリウムサンプリング 入口側既設配管部スウェッジ ロック締め付け不良に関する記述

| | |
|------------|---|
| 題目 | 2次ナトリウムサンプリング 入口側既設配管部スウェッジ ロック締め付け不良 |
| 問題点 の経緯 | <p>2次ナトリウムサンプラー入口側スウェッジ ロック付近からチューブ 下部側に亘って黄緑色析出物の付着が発生した。成分確認の結果ナトリウムの反応生成物であり、漏洩の原因はスウェッジ ロックの締め付け状態の不具合であることが判明した。</p> <p>__部：対象箇所 __部：観測症候 __部：原因</p> |
| 対策 | <p>①スウェッジ ロック取り付け時、ゆるやかにゆすりながらの芯合わせとナットの締め付け操作を実施する。</p> <p>②ロックナットの締め付け完了位置をマーカにより明確にした。</p> <p>__部：施工上の対策1 __部：施工上の対策2</p> |
| 得られた成果 | <p>スウェッジ ロックの継込みが確実に行われ、ナトリウムの漏洩が防止できた。</p> <p>__部：対策の直接の効果 __部：プラント運用上の評価</p> |

表 3 - 1 3 : 2 次ナトリウムサンプリング装置ナトリウム漏洩検出器の劣化に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 2 次ナトリウムサンプリング装置ナトリウム漏洩検出器の劣化 |
| 問題点の経緯 | <p>「常陽」2 次冷却系設備には通電式及び煙式のナトリウム漏洩検出器が設置されている。今回、2 次ナトリウムサンプリング装置に設置されている通電式のナトリウム漏洩検出器のガラスファイバテープが劣化しているのが確認された。本検出器が設置されている雰囲気温度は比較的厳しく、サンプリング時約 200℃、サンプリング時以外常温と室温が変化すると共にサンプリング時は約 200℃からの急速な冷却も行われている。</p> <p>__部：問題に関わる仕様 __部：観測症候 部：環境の評価 __部：環境</p> |
| 対策 | <p>既設ナトリウム漏洩検出器を撤去し、<u>同タイプ</u>の新しいナトリウム漏洩検出器を布設した。</p> <p>__部：対策手順 1 __部：対策手順 2</p> |
| 得られた成果 | <p>ナトリウム漏洩検出器の点検頻度を 1 回 / 年 (定検毎) とした。</p> <p>__部：対策の継続実施要領</p> |

表3-14：主ﾌﾟﾗｸﾞ計冷却ブロワ軸受け部からの異音に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 主ﾌﾟﾗｸﾞ計冷却ブロワ軸受け部からの異音 |
| 問題点の経緯 | <p>主ﾌﾟﾗｸﾞ計冷却ブロワ軸受け部より異音が発生しているのが確認された。<u>分解点検を行ったところ主モータ反負荷側、及び相対する軸受けに回転すべり跡が確認された。</u></p> <p><u>軸受け部の寿命は、一般的に 10,000 時間といわれ、冷却ブロワ運転開始後約 11 年を経過していることから根本的原因は寿命といえる。</u></p> <p>__部：観測症候 __部：調査結果 ...部：判断根拠 ...部：第一原因</p> |
| 対策 | <p><u>運転時間、異音の程度から、その運転継続は不可能と判断し、冷却ブロワ及び軸受け部を予備品と交換した。</u></p> <p>__部：判断根拠 __部：判断結果 ...部：対策</p> |
| 得られた成果 | <p><u>ﾌﾟﾗｸﾞ計冷却ブロワの点検頻度を 1 回／年（定検毎）とした。</u></p> <p>__部：対策の継続実施要領</p> |

表3-15：2次ナトリウムサンプリングチューブ中のボイド分析に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 2次ナトリウムサンプリングチューブ中のボイド分析 |
| 問題点の経緯 | <p><u>2次ナトリウムサンプリングチューブ内にボイドが発生しナトリウム中酸素同定に不具合を生じた。</u></p> <p>__部：対象箇所 __部：発生事象 部：発生した問題</p> |
| 対策 | <p><u>サンプリングチューブ内ボイド発生とサンプリングシステム上の因果関係を実験的に確認し、最適サンプリング手法条件を明らかにした。</u></p> <p>__部：発生事象 __部：事象が進展したと思われる箇所 部：対策決定のための提案作業 部：ソフト上の提案改善</p> |
| 得られた成果 | <p><u>①サンプリングチューブ内へのナトリウム充填フラッシング終了後、急冷するほど、ボイド発生量が多い。</u></p> <p><u>②サンプリングチューブ内へのナトリウム充填フラッシング終了後、サンプリングチューブ出口弁を閉じ、入口弁を開けた状態で自然冷却した場合、最もサンプリングチューブ内でのボイドの残留が小さいことが確認された。</u></p> <p><u>③偏析、ボイド発生の影響のないサンプリング法(オーバーフロー法、ディップカップ法、その他)の採用を検討する。</u></p> <p>__部：実験ケース1 __部：実験ケース2 部：対策方針</p> |

表3-16：2次ナトリウムサンプリング装置の改造に関する記述

| | |
|--------|--|
| 題目 | 2次ナトリウムサンプリング装置の改造 |
| 問題点の経緯 | <p>2次ナトリウムサンプリング装置には、<u>保温カバー及び表面側扉を有するステンレス鋼製BOX内にエレクトロニクス継手付きサンプリングチューブが取り付けられ、サンプリング時は扉を閉鎖し、アルゴンガス置換を行い、外部側からの弁操作により実施される。</u>これまでの装置では装置内部が見えないことや、扉の着脱操作性、サンプリングチューブの冷却効率が悪かった。</p> <p>__部：対象機器 __部：対象部品 部：取り扱い方法 __部：問題点</p> |
| 対策 | <p>①<u>ドアの固定をボルトナット方式からカバー方式にした。</u> ②<u>ドアに内部観察窓を取付けた</u> ③<u>冷却用の専用送・排気ダクトを設置した。</u> ④<u>ドア開口部を○型から□型とし、面積を拡大した。</u></p> <p>__部：対策1 __部：対策2 部：対策3 __部：対策4</p> |
| 得られた成果 | <p><u>装置全体の操作性やナトリウム漏洩発生の有無を目視で確認できるようになり、安全性が向上した。</u></p> <p>__部：改善項目 __部：総合評価</p> |

表 3-17：電磁ポンプ制御用電磁接触分解点検結果に関する記述

| 題目 | 電磁ポンプ制御用電磁接触分解点検結果 |
|--------|---|
| 問題点の経緯 | <p>電喪時の電磁ポンプ再起動時、電圧調整用 CS を中立位置に戻しても電磁ポンプ電圧が最大電圧まで昇圧されるという不具合が発生した。降圧操作を行っても降圧できなかったが、約 10 秒後に降圧可能となり、その後の昇・降圧は正常に行えた。これらの原因は制御回路にある電磁接触器（上昇制御側）の開放操作不良（開放時間の遅延）に依るものであることがわかった。分解点検により電磁接触器の鉄心接触面に製造過程で塗布された防錆油が塵埃を含み、さらに鉄心の開・閉により、それらが練り合わされ粘着性を増し、その励磁電流を遮断しても可動側鉄心が開放されなかったためと考えられる。</p> <p>__部：観測症候 1 __部：観測症候 2 部：同定された原因 __部：経緯 1 __部：経緯 2 部：経緯 3 __部：経緯 4</p> |
| 対策 | <p>電磁接触器を新しい型の電磁接触器（化成皮膜防錆処理タイプ）と交換した。</p> <p>__部：ハード上の改善</p> |
| 得られた成果 | <p>防錆油塗布タイプの電磁接触器をすべて化成皮膜防錆処理タイプに交換したことにより、設備保全の面からは信頼性が向上した。</p> <p>__部：対策 __部：効果</p> |

92年

表3-18:2次コールドトラップイコマイザバハス運転経験に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 2次コールドトラップイコマイザバハス運転経験 |
| 問題点の経緯 | <p>2次系ナトリウム充填後のプラグ温度は系統温度に等しい210℃であった。その後250℃までの系統昇温に伴い、プラグ温度も約250℃に上昇した。このように、プラグ温度が高い状態でコールドトラップに通液すると、不純物の析出点がイコマイザ領域となるため、イコマイザ部に優先的に不純物が析出し、<u>局部閉塞を起こす恐れがあった。</u></p> <p>___部：注目するパラメータ ___部：観測症候 ___部：予測される現象 ___部：懸念される不具合</p> |
| 対策 | <p>2次コールドトラップイコマイザバハス運転による純化運転を実施した。<u>プラグ温度250℃に対しコールドトラップ設定温度を210℃としてイコマイザバハス運転を開始し、その後プラグ温度が約220℃となったところでバハス運転を終了した。</u></p> <p>___部：対策概要 ___部：実施要領1 ___部：実施要領2</p> |
| 得られた成果 | <p><u>バハス運転中は、プラグ温度よりコールドトラップ設定温度を下げることにより、コールドトラップメッシュ部に不純物を析出させることができた。又、バハス運転終了後は、プラグ温度が250℃から210℃となったことにより、析出点がコールドトラップメッシュ部に移り、イコマイザ部での局所閉塞を防ぐことができた。</u></p> <p>___部：効果1 ___部：効果2 ___部：評価</p> |

表3-19：第3の不純物究明試験に関する記述

| | |
|---------------|---|
| <p>題目</p> | <p>第3の不純物究明試験</p> |
| <p>問題点の経緯</p> | <p>従来、<u>冷却材ナトリウムの純度管理</u>と言え、<u>酸素と水素が主な対象不純物であった。</u>しかし、<u>高速実験炉「常陽」2次主冷却系のナトリウム純度を監視するプラグ計に、酸素及び水素以外の「第3の不純物」が析出し、安定なプラグ温度測定が困難となる現象が見られた。</u>この「第3の不純物」は、<u>系統外からの混入経路がないことから系統構造材から溶出するものと考えられ、構造材の健全性評価を行うためにも究明する必要があった。</u></p> <p>__部：従来の知見 __部：新たな発見 部：新事実に関する推測 部：関連する安全項目</p> |
| <p>対策</p> | <p>特殊な<u>プラグ方法</u>を考案し、この方法を用いて「第3の不純物」を捕獲することにより、「第3の不純物」の元素及び化学形態の究明を行った。</p> <p><プラグ方法概要> <u>コールドトラップを模擬した特殊プラグ用チューブを用い、チューブ内を流れるナトリウムの温度を調整してチューブ出口部に内装したステンレスメッシュに「第3の不純物」のみを粒状物として析出させる。</u></p> <p>__部：対策概要 __部：調査分析用のハード施工 部：調査分析用の手順</p> |
| <p>得られた成果</p> | <p>(1) <u>不純物成分として、Siが確認された。</u>この他にはAl, Ca, Clも確認できた。</p> <p>(2) <u>不純物成分の大半はSiであり、他は微量であった。</u>このことから、「第3の不純物」はSiであると推察された。</p> <p>(3) 又、<u>ナトリウム中にはNaSiO3及びSiO2のいずれも存在することが推察された。</u></p> <p>部：調査分析結果概要 部：目的に照らした結果の評価1 部：目的に照らした結果の評価2</p> |

表 3-20 : 2次ナトリウム純化系制御計器等の中央制御室への移設に関する記述

| | |
|--------|---|
| 題目 | 2次ナトリウム純化系制御計器等の中央制御室への移設 |
| 問題点の経緯 | <p>2次ナトリウム純化系の運転監視用のスイッチ及び計器類は現場制御盤に設置されている。このため、電喪時等の対応操作で再起動が大幅に遅れると電磁ポンプへのガス巻き込み及び温度制限を逸脱してしまう等の時間制限により、再起動を断念せざるを得なくなる恐れがあった。</p> <p>___部：仕様 ___部：想定状況部：予想される困難部：懸念される問題</p> |
| 対策 | <p>主冷却機建屋(S-402)の現場制御盤に設置されていたスイッチ、計器等を中央制御室の2次系制御盤(#425)制御盤に移設した。その主要なものを以下に示す。</p> <p>(1) 2次ナトリウム純化系電磁ポンプ制御用スイッチ、電流電圧計 (2) 2次ナトリウム純化系温度・流量記録計 (3) 2次ナトリウム純化系充填元弁A、B調節計 (4) コールドトラップ冷却ファンスイッチ (5) コールドトラップ内部温度記録計</p> <p>___部：対策概要 ___部：対策項目</p> |
| 得られた成果 | <p>中央制御室において、2次ナトリウム純化系の運転状態が常時監視でき、異常時の対応を迅速に行うことができるようになったため、運転員の労力が大幅に軽減できると共にプラントの安全な運転に寄与できる。</p> <p>___部：直接効果 ___部：運転性向上部：安全性向上</p> |

4. 考察とまとめ

これまで、2章において工学一般を対象にした故障オントロジーの構築を試み、システムの試作によって故障の記述能力を原因同定タスクを例題として具体的に評価した。さらに、3章においては、既存の保守記録を分析し、知識や経験の伝承を目的として、極めて緩やかな形式の制約下で人間がマニュアルに記載して生成された文書に内在する情報を観察した。以下ではこの両作業を通して、今後取組むべき課題について考察する。

- 1) 2章で述べられた故障オントロジーは、人工物に生じる不具合の物理的な側面を記述するという目的からは極めて適切である。これは、3章で扱った、「常陽」2次主冷却系の純化系に関する保守記録の中の、不具合発生過程に関する部分がほぼこのオントロジーで記述しなおすことができたことにより裏付けされた。
- 2) 一方、3章の分析からは、実際にプラントの保守を行う人間に必要な知識として、不具合の発生過程に対する知識に加えて、情報が不十分な時点で、原因の同定に必要な情報を獲得する手順に関する知識、不具合を生じた部品を、仕様の異なる部品に交換することの適否を判断するための知識等が重要であることがわかった。言い換えれば、不具合の発生についての理解に加えて、「ではどうすれば良いか」に関する知識が保守記録の相当部分を占めているのである。
- 3) 上記の項目とも関係するが、故障オントロジーで定義するところの「故障原因」の粒度を制御する必要がある。金属疲労という現象が知られていない時に、いくら検査をしても瑕疵の無い航空機が相次いで墜落した、という事例のような場合には、極めて細かい粒度での原因同定が必要であるが、経時劣化が原因であることが自明な場合には、部品さえ同定できれば十分である。
- 4) 本研究で構築した故障オントロジーは、一般にソフトウェアによる診断が論じられる際に用いられる用語に比して、その数と定義の厳密さが著しく上回っており、そのために故障を扱う際の記述と推論に関する高い能力を発揮するが、実際にこのオントロジーに基づくシステムのユーザは、プラントの運転や保守の専門家である。彼らがこのシステムを用いる際に、自身の知識や思考とオントロジーを照合するためには、かなりの認知的負荷が発生すると思われる。この問題の解決には相当の労力を要するものと思われる。

5. 結論

本研究を通して、局所的で不可逆な不具合進展過程に対する運転員、保守員の理解の促進のために、故障に関する諸概念とそれらの関係を明確に定義して名称を与え、オントロジーとしてソフトウェア上に記述することが有効であるとの見通しが得られた。未解決な課題としては、テキストの形で保管、運用されている膨大な情報を効率良くオントロジーによって書きなおす手法、オントロジー内で定義された多数の概念やその厳格さがシステムのユーザに負担を生じないための方策、あるいは実際にプラントと直接関わるユーザーを有する部署にオントロジーの必要性、有用性を認識させる方策、等の確立がある。

これらの解決は困難なものと予想されるが、プラントの正常時、異常時の知識に対して融合した形で理解の促進を図るためには、従来重んじられている数学モデルによるシミュレーションのみではなく、本研究のように工学的な意味を直接処理しようとする技術が不可欠である。今後、実際に運転員や保守員の教育を担当する部署で、具体的な系統を対象にオントロジーに基づくシステムを実際に構築しながら上述の課題を解決していくことが望まれる。