

運転員のプラント知識モデルの可視化に関する研究

(共同研究報告書)

1999年3月

東京大学工学系研究科
核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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大字村松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

運転員のプラント知識モデルの可視化に関する研究 (共同研究報告書)

菅野太郎¹、吉川信治²、古田一雄¹

要旨

原子力プラントは非常に複雑な上にその運転に対して極端に高い安全性を要求される。運転員の教育訓練過程に起こりうる全てのシナリオを含むことが不可能であるため、運転員が想定外事象に対するナレッジベース (KB) 行動を可能にするようなプラントへの理解を醸成することが望ましい。このような理解を支援するためのソフトウェア構築技術の開発を目的として、運転員のプラント知識モデルの研究を進めている。本報告では運転員知識モデルとして、構成、因果、目標、状態の4空間で構成される包括的運転員知識モデルを提案した。

この知識モデルの妥当性を検証するとともに、計算機上にモデル化した運転員の知識モデル、およびこれを用いたKB行動における思考プロセスを視覚的に表示することによって、プラント理解支援システムを試作し、KB行動能力向上のための教育訓練支援法としての可能性を検討した。

1. 東京大学 工学系研究科システム量子工学専攻 近藤研究室

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グループ

Visualization Study of Operators' Plant Knowledge Model

Tarou Kanno¹, Shinji Yoshikawa², Kazuo Furuta¹

Abstract

Nuclear plants are typically very complicated systems and are required extremely high level safety on the operations. Since it is never possible to include all the possible anomaly scenarios in education/training curriculum, plant knowledge formation is desired for operators to enable them to act against unexpected anomalies based on knowledge base decision making. The authors have been conducted a study on operators' plant knowledge model for the purpose of supporting operators' effort in forming this kind of plant knowledge. In this report, an integrated plant knowledge model consisting of configuration space, causality space, goal space and status space is proposed.

The authors examined appropriateness of this model and developed a prototype system to support knowledge formation by visualizing the operators' knowledge model and decision making process in knowledge-based actions with this model on a software system. Finally the feasibility of this prototype as a supportive method in operator education/training to enhance operators' ability in knowledge-based performance has been evaluated.

1: Kondo Lab., Dept. Quantum Engineering & Systems Science, The University of Tokyo

2: Beam Technology Development Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目 次

1	研究の概要	1
1.1	目 的	1
1.2	実施内容	1
2	知識モデルの妥当性検証	2
2.1	はじめに	2
2.2	実 験	2
2.3	行動発話分析	3
2.4	分析結果	4
2.4.1	状 態	4
2.4.2	目 標	7
2.4.3	因 果	9
2.4.4	構 成	10
2.4.5	4空間の相互関連	12
2.4.6	経時的分析	14
2.5	考 察	14
2.5.1	語られなかったこと	14
2.5.2	関連研究	16
2.6	まとめ	18
3	知識モデルと思考プロセスの可視化による学習支援	19
3.1	はじめに	19
3.2	プラント運転に必要な知識	20
3.3	支援システムの概要	21
3.3.1	知識の可視化手法	21
3.3.2	思考プロセスの可視化とその他の学習支援機能	25
3.4	まとめ	29
4	結 言	30
	参考文献	31

1 研究の概要

1.1 目的

想定外事象に対するナレッジベース (KB) 行動を含めた運転員知識モデルとして、構成、因果、目標、状態の4空間で構成される包括的運転員知識モデルを提案した。この知識モデルの妥当性を検証するとともに、計算機上にモデル化した運転員の知識モデル、およびこれを用いたKB行動における思考プロセスを視覚的に表示することによって、KB行動についての理解を深めるとともに、KB行動能力向上のための教育訓練支援法としての可能性を検討する。

1.2 実施内容

(1) 知識モデルの妥当性検証

すでに「もんじゅ」シミュレータを用いて行われた認知実験のデータを包括的運転員知識モデルの視点から分析する。発話データを元に利用された知識をモデルの4空間に分類し、被験者の知識モデルを再構成することによって、包括的運転員知識モデルが必要十分な表現力を有するかを検討する。

(2) 知識モデルの可視化

知識モデルを仮想3D空間で可視化する手法を開発する。4つの知識空間のうち、構成空間についてはミミック表示がプロセス系のインタフェースで定着しており、またシステム構成の把握の点で妥当な表現であると考えられる。そこで、この対象システムのミミック表示を基礎とし、その上に因果空間、目標空間、状態空間に属する不可視な概念と関係を、各々が弁別可能な形に重ねて表示することを検討する。

(3) 思考プロセスの可視化

つぎにこうして視覚化した知識モデルの上で、思考プロセスの動画化を行う。すなわち、知識空間の遷移、知識モデル内での注視点の移動、知識処理(推論)などを、関連するプラント状態変化と平行に画面表示する。「もんじゅ」実験の被験者の思考プロセスを具体的に可視化するとともに、教育訓練法としての可能性を被験者を用いて検討する。

2 知識モデルの妥当性検証

2.1 はじめに

工学システムが複雑化・巨大化するにつれて、その仕組や振舞いが人間に理解しにくくなりブラックボックス化する問題が生じている。プロセス制御分野ではこの問題を解決するためにその運用管理を支援するための様々なシステム、たとえば診断支援、運転支援、保守支援、教育支援などのシステムが研究・開発されてきたが、これらの支援システムが新たなブラックボックスとなって人間の理解を一層困難にしないためには、支援システムが単に正しい応答をするばかりでなく、人間とのコミュニケーションを可能とするための工夫が必要である。人間の思考・行動のモデルであるヒューマンモデルの研究は、人間行動の予測による設計評価のためだけでなく、人間とコミュニケーション可能な支援システムを開発するためにも重要な基礎を提供すると考えられる。

ヒューマンモデルはプロセスモデル、知識モデル、制御モデルの3つの要素で構成されるが[1]、本研究ではこのうち工学的な知識モデルを扱う。知識モデルは、人間が認知過程で扱う情報の内容や形式に関するモデルであるが、中でも人間が利用する知識の内容、すなわち思考や行動に際してどのような概念、関係、語彙を扱っているのかを問題にする。したがって、知識工学におけるオントロジーと同様の意味を持つ[2]。また人間が対象システムにどんな心的イメージを抱いているかを表すので、認知心理学におけるメンタルモデルとも重なる。しかし以下では、ヒューマンモデリングの立場から知識モデルという用語を用いることにする。

我々はすでにプロセスプラントを対象とする実験によって、タスク階層 (TH: Task Hierarchy) と定性因果 (QC: Qualitative Causality) の2層からなる知識モデルが自由形成されることを示した[3]。この2層モデルは、目標-手段関係によって運転操作に関する知識を表すTH層と、局所的定性因果関係によってプラントの振舞いに関する知識を表すQC層で構成され、両層の相互関連によりQC層の知識がTH層の知識に裏づけを与える形になっている。我々はさらにこの知識モデルを運転訓練支援システムにおける学習者モデルの表現に適用し、その知識モデルとしての有用性を確認した[4]。しかしこの2層モデルは、認知過程のうちの行動計画側に着目したモデルで状態認識側を考慮しておらず、またシステムの構造に関する知識がQC層に混在しているなど、包括的な知識モデルとしては不十分な点が多い。そこで本研究では、工学、特にプロセス制御に関する包括的な知識モデルを、実際の人間行動観察に基づいて構築することを目的とする。

2.2 実験

プロセス制御の現場に近い状況で知見を得るために、実験は高速増殖原型炉「もんじゅ」の訓練用フルスコープシミュレータを用いて行った[5]。被験者は実機の運転員3

人で構成される2組の運転チームにお願いし、別にもう1人の運転員がシミュレータ制御室で現場要員の役を演じた。被験者の行動は制御室に設置された4台の遠隔操作ビデオカメラ、8台のワイヤレスマイク、および2台のビデオ装置によって録画した。

実験では2通りの実験シナリオが用いられた。第1のシナリオは冷却系からの2重ナトリウム漏洩で、3ループあるうちの同一ループの1次冷却材循環ポンプ出口配管付近と中間熱交換器 (IHX) 伝熱細管がほぼ同時に破損するというものである。ナトリウム漏洩量がポンプ出口よりも IHX 細管が多いために、IHX 細管の漏洩ナトリウムが1次系に流れ込んでポンプ出口の漏洩で観測されるはずの異常徴候の一部を相殺してしまう。このシナリオの発生確率は極めて低いため、運転員の訓練シナリオには含まれていない。第2のシナリオは抽気喪失で、この事象は高圧タービンから抽出した蒸気を給水加熱器に供給するラインの逆止弁が突然閉弁することによって始まる。この事象では異常の進展が緩やかで、事象開始より何分間も警報が発報しない。したがって緊急性は低いものの、異常の根本原因を同定するために運転員は曖昧な徴候を頼りに心的操作を繰り返さなければならない。このように実験に用いられた2つのシナリオは、かなり性質の異なる心的負荷を被験者に与えるものである。実験は被験者が正しい異常原因を同定し、対応操作を開始した時点で終了したが、所要時間は何れのシナリオも約40分であった。

2.3 行動発話分析

録音された発話の書き下し、前後の文脈や状況、発話時の被験者の行動を考慮しながらどんな内容の知識が被験者の行動・発話の形成に用いられているのかを分析した。当初、適当と思われるある判断基準を設定し、分析者の専門的判断によって発話から読み取れる知識内容を分類することを試みた。しかしこのような素朴な手法では分析の信頼性や精度が十分保てないと思われたので、より制約の強い分析手法を採用することとした。すなわち、観測された被験者の行動・発話が形成された認知過程を論理式で記述する手法である。これは被験者の行動・発話のシミュレーションを手作業で行うようなものであるが、推論制御は分析者が観測データを頼りに決定している。このような手法を使ったとしても、状況解釈や発話に直接現れていない知識の推測に分析者の主観が入る余地があり、また発話から聞き取れる微妙なニュアンスなどを全て論理式で記述できるわけではない。しかし、形式的に記述しなければならないことから生ずる厳密性や信頼性の向上が期待されるので、メリットの方が大きいと判断した。

このような分析法では、各被験者の信念世界を現実世界と区別して記述することが必要となる。そこでこのようなき標準的に用いられる様相記号 BEL を用い、「被験者 A は命題 P を信じている」を A BEL P と表すことにした。この記号は再帰的に用いることができ、A BEL B BEL P は「B が P を信じていると A は信じている」を意味する。次に被験者の目標やプランを表すために、様相記号 WANT を用いる。被験者 A が目標

状態として P が達成されることを欲しているか、プランとして P を実行しようとしている場合は A BEL A WANT P と表す。BEL や WANT に関しては

$$A BEL P \rightarrow A BEL A BEL P$$

等の公理があるが、ここではあまり重要でない。命題の真偽に対する可能性と必然性の区別も必要となるので、様相記号◇を用いて可能的真を、これが前置されていない場合は必然的真を表すものとする。

被験者は訓練を積んだ実機の運転員なので、基本的に合理的プランに従って行為や発話を行うと仮定する。合理的プランニングの原理によれば、観測される行為はその効果、選択条件、前提条件、具体的内容によって定義される作用素が実行された結果である。行為主は達成したい目標を効果に含み、選択条件を満足する作用素を選択してプランに加える。その時点で前提条件が満足されていない場合には、それを達成することがプランの副目標となる。こうして事前に作成されたプランに従うのが合理的行為の仮定であるが、前提条件を満足する状況が出現したことを契機に実行される状況駆動型の行動も考慮する。

発話に関しては、発話は聞き手の信念に話し手が期待する変化を与えることを目的に行われる行為であるとする発話行為理論の考え方に従って分析する[6,7]。これによって被験者の行為と発話が全く同様の枠組で記述・分析できるが、ここで対象領域に依存しない人間の常識レベルに属するプランと、領域レベルに属するプランを区別しておく。発話行為の代表的な作用素には、話し手の信念を聞き手に情報を伝達する Inform 発話行為や、聞き手に行為の実行を依頼する Request 発話行為がある。プロトコル中に Inform 発話行為や Request 発話行為のインスタンスがあった場合、作用素を逆向きに適用することによって話し手の意図と状況認識を推論することができる。なお分析に用いた作用素の定義は、主に文献[7]を参考にした。

2.4 分析結果

以上に説明した表現を使って被験者の行動・発話が形成された認知過程を時系列にそって演繹的に記述した後、利用された領域レベルの知識を書き出し、さらに各知識を内容のタイプに従って分類した。現場要員役を除く3人の被験者が行った発話を、背景にある知識のタイプに従って分類した結果を表1に示す。以下ではこうして抽出した知識の4つの主要タイプと、その間の相互関連について述べる。

2.4.1 状態

被験者の言動に頻繁に現れた認知過程の一つは、観測されたある対象システムの属性パターンから対象システムの状態を同定することである。たとえば、2重漏洩シナリオ開始直後の次のような発話とその典型例である。

表1 行動発話分析の結果（発話数）

分類	実験シナリオ	
	2重漏洩	抽気喪失
状態	74	29
目標	28	47
因果	24	19
構成	8	54
状態 → 目標	11	8
因果 → 状態	16	13
因果 → 目標	2	6
目標 → 因果	5	15
構成 → 因果	13	7
その他の分類	12	19
分類不能	209	137
合計	402	354

C：ナトリウム漏洩（警報）

B：はい…警報確認します。

C：ちょっと…レベルの変化と…A君、あっそれで雰囲気温度ちょっと見てくれる？

図1はこのときの被験者Cの発話行為の形成過程を推論した結果で、「1次系Aループ漏洩警報」の観測から「1次系Aループ漏洩」の仮説が生成され、さらに「レベル低下」と「雰囲気温度上昇」の可能性が推論されて仮説検証のための観測行動を誘発している。ここで用いられているのは、leak(Loop1A)という異常に分類される状態と{alarm(leak(Loop1A)) is on, level is low, atm_temp is high, …}という観測可能な徴候集合との関係である。この例では導出段階を示唆する発話がなく短時間のうちに次の発話が行われていること、またこの事象が訓練シナリオにあるもので被験者が熟知しているはずであることから、状態と徴候集合の関係が他の知識からの導出ではなく、この形で存在していたと考えられる。観測済み徴候集合から対象システムの現在の状態を同定する場合、この知識は「徴候 → 状態」の方向に用いられ、システムの振舞いを予測する場合や、状態についての仮説を検証するための観測行動を計画する場合には同じ知識が「徴候 ← 状態」というように逆方向に用いられる。

このような徴候パターンと観測徴候との照合による状態同定は、異常診断法としてごく基本的であるが、異常事象に限らず徴候集合によって連想されるのはシステムのより

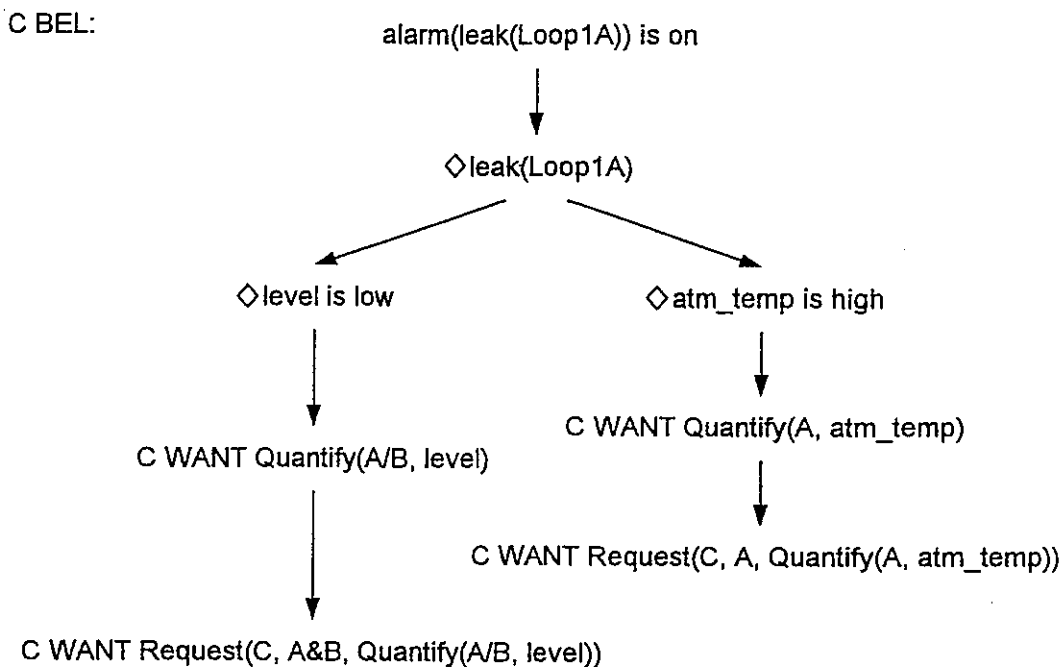


図1 状態に関する推論の例

一般的な状態である。ここでいう状態はいわゆる状態空間探索における形式的・網羅的な状態ではなく、運転員のタスクから見て意味のある状況の分類といった概念である。被験者の発話記録からいえることは、何も異常がない「正常状態」や、厳密な意味で異常原因を特定しない「給水系異常」のような曖昧な異常、あるいは特定の行動を開始しなければならない状態などが区別されていることである。

徴候集合はこれらの状態を規定し、運転員が状態を分類・同定するための基準である。徴候集合の要素である個々の徴候は、特定パラメータの観測値あるいはその定性的解釈であるアトミックな状態により表される。2つの実験シナリオの各々において徴候に関する発話は143/102回あり、そのうち129/97回が定性的表現であるのに対し、定量的表現はわずかに22/18回であり、しかもそのほとんどが定性的表現との併用であった。この結果から、徴候の表現では定量的表現よりも定性的表現が支配的であることがわかる。

こうした徴候集合上で定義される状態に関する知識を記述する領域を、状態空間と呼ぶことにする。図2は2重漏洩シナリオの発話記録から抽出した被験者の状態空間を图示したものである。ここに示すように、一般的で曖昧な状態の下位概念としてより限定的な状態があり、状態空間は階層構造をなしている。一般的な状態は比較的少数の曖昧な徴候集合によって規定されているのに対して、その下位状態は上位状態の徴候集合を継承、精緻化した上で新たな徴候を加えており、下位に行くほど徴候集合のサイズが大きくなる。

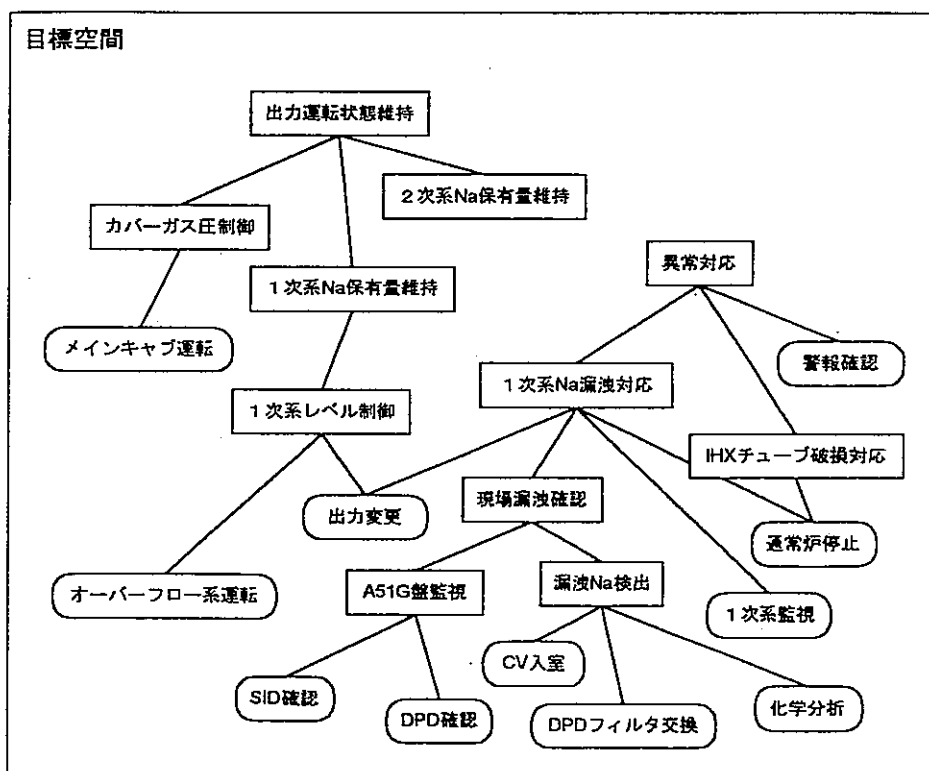
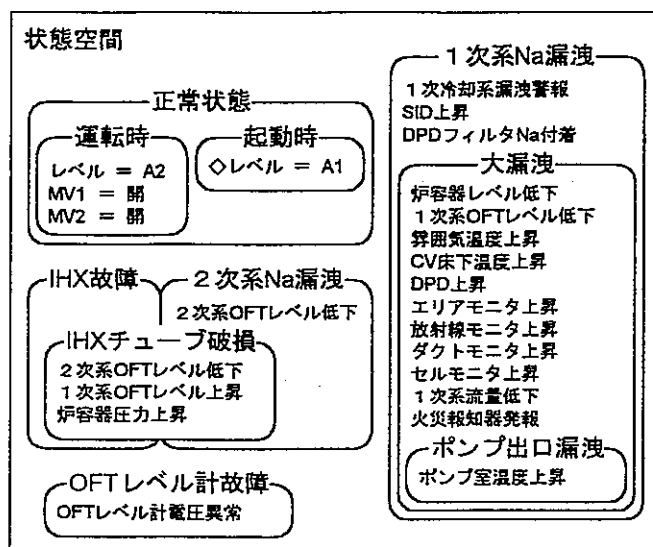


図2 被験者の状態空間と目標空間（2重漏洩）

2.4.2 目標

被験者は対象システムに関する知識ばかりでなく、自分たちが行うべきタスクに関する

る知識を使ってとるべき行動を決定している。以下はこのような知識を用いて行動計画が行われたことを示す発話の例で、図3はこの間の認知過程を推論した結果である。

B : えーと, SID だけですわね。low だけですわね。えーと DPD のフィルタ外して化学分析
 ですわね。

C : はい。

B : そっちの方とりあえず付いているかどうか。

C : それ見てもらいますか？

・・・中略・・・

B : とりあえず課長に連絡して, CV の中に入って DPD フィルター外しの…

1 次系 A ループで漏洩が起ると DPD フィルタにナトリウムが付着する可能性があるの
 で, これを現場要員 F に検出してもらうことがナトリウム漏洩を確認する有力な方法
 である。そして, 格納容器内に入って DPD フィルタを外し, 化学分析によって付着ナ
 トリウムを検出するというのがその具体的手順である。単独の 1 次系ナトリウム漏洩は
 訓練シナリオにあること, 行動計画の詳しい過程が発話されていないことから, やはり
 この手順は基本的行為を組合せて計画されたものではなく, あらかじめ用意された手順
 のテンプレートを想起したものと考えられる。

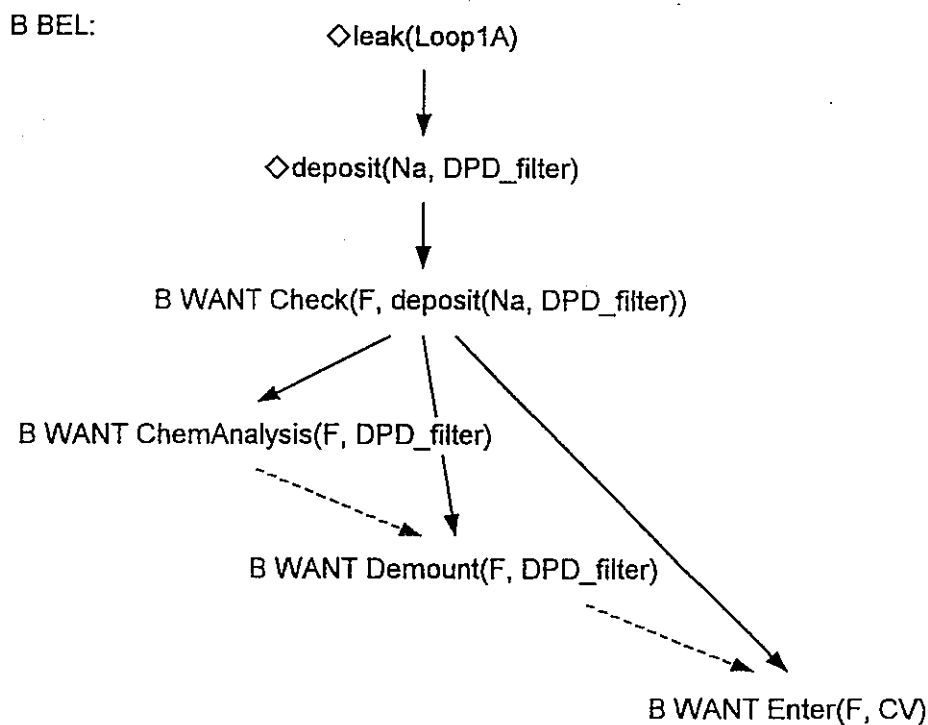


図3 目標に関する推論の例

ここではナトリウム漏洩の確認というタスク目標を達成する具体的手順が想起あるいは計画されており、タスク間の目標手段関係がその根底にある。行動発話分析で想定した合理的行為の作用素の定義で考えると、期待される効果と作用素の具体的内容との対応関係が被験者の行動決定に用いられる知識の骨格部分であり、目標手段解析によって手順の想起あるいは行動計画が行われると考えてよいであろう。このような目標手段の関係は階層的になっており、たとえば「ナトリウム漏洩確認」という目標はさらに上位の「ナトリウム漏洩への対応」というタスクの一手段になっており、また「DPD フィルタを外す」というタスクの下にはそのためのさらに細かい手順が存在する。このような運転員のタスクの目標手段関係を記述する領域を目標空間と呼ぶことにする。図4に2重漏洩シナリオに関して抽出した目標空間を示す。

2.4.3 因果

訓練シナリオになく過去にあまり経験していない状況に対し、被験者はシステム挙動に関するより原理的なレベルの知識を用いて問題解決を試みた。以下はそのような認知過程を示す発話の例である。

A : 流量増えただけじゃ電気出力は上がらないので、その前、抽気もおかしかったんじゃないの？

B : そうですね。抽気蒸気が減ってタービンにまわった分で出力が上って給水温度が下がったのか。あるいは先にこっちが起きているとなると…

図4はこのときの被験者Bの発話の形成過程である。「抽気流量低下」は「タービン流量上昇」を招き、それがさらに「電気出力上昇」につながるが、「抽気流量低下」は同時に「給水温度低下」の原因にもなったというのが被験者Bの推論である。このような場合に用いられるのはパラメータ間の定性的因果関係で、これは「パラメータ P が増加（減少）すればパラメータ Q も増加（減少）する」という正の関係か、「パラメータ P が増加（減少）すればパラメータ Q は減少（増加）する」という負の関係によって表現できる。さらに、ある物理的因果関係の背景には物量やエネルギーの保存則がある場合があり、この例では

$$\text{steam_flow} = \text{extraction_flow} + \text{turbine_flow}$$

があることが次の発話から示唆される。

A : どっちにしても、抽気側に流れないとなれば…そうね、要するに蒸気が余っているわけではないんだよな。ただ単に流れていく方向が違うだけだから…

しかし実験で観測された保存則を示唆する発話はこの1例だけで、保存則は定性的因果関係の形式にコンパイルされた形で利用されていると考えられる。

他にはシステム挙動の説明生成を試みていること、あるいは試みたが失敗したことを

B BEL:

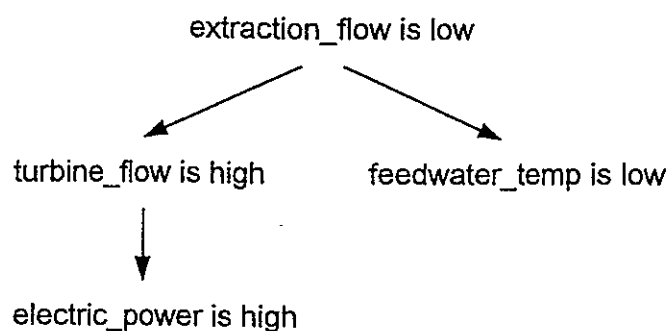


図4 因果に関する推論の例

報告する発話が見られる。これはたとえば「ちょとどういうメカニズムなの?」「なんで上ってるの、これ?」「給水温度が下がっているということは…」といった発話である。このような発話が2重漏洩シナリオで20回、抽気喪失シナリオで3回観測された。2重漏洩シナリオでは、IHX細管漏洩のためにオーバーフロータンク(OFT)レベルが1次系配管漏洩と矛盾する変化を示すため、この徴候の発生機序を説明する試みが繰り返されてこの種の発話回数が増えている。最初の例のように、完成された説明が定性的因果関係の連鎖によって記述されていることから、こうした失敗に終わった説明も定性的な因果関係の知識に基づいて試みられたと考えられる。

システム挙動を原理的に説明するための知識を記述する領域を因果空間と呼ぶことにする。実験結果が示すように、因果空間の基底概念はシステムのパラメータ、基本的関係はその間の定性的因果関係である。さらにその基礎となる保存則などの定量的制約も、ここに含まれる。図5に抽気喪失シナリオの発話記録から抽出した被験者の因果空間を、因果関係線図として示す。

2.4.4 構成

被験者が利用した知識の中で最も基層部分に位置するのは、対象プラントの構造や属性に関するものである。次に示すのは、このような知識に関する発話の典型例である。

B: 抽気ラインは、こっちですよ。こちらは補助ボイラーからの…

A: これどっかにバイパスってのはないんだっけ?

B: ないですね。

A: じゃあ、これAVか。

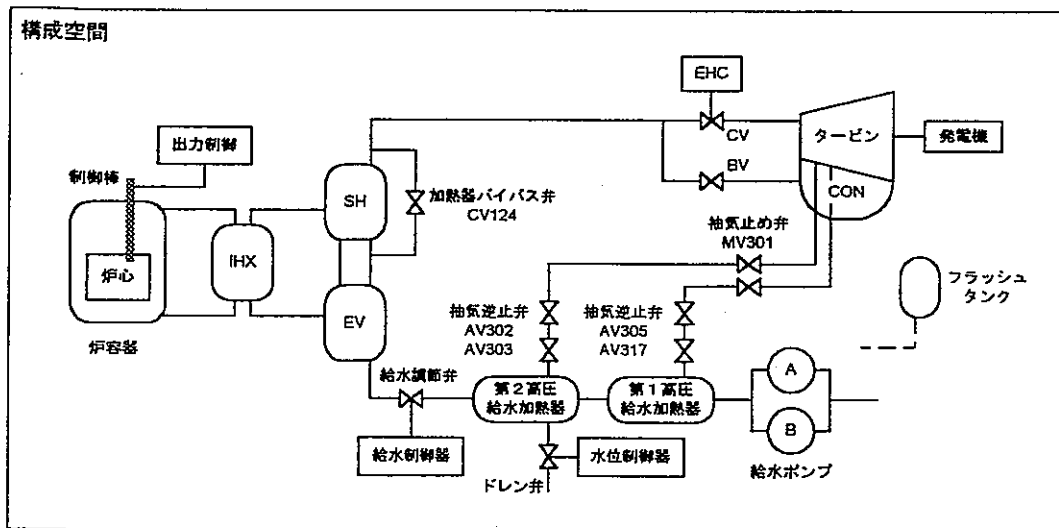
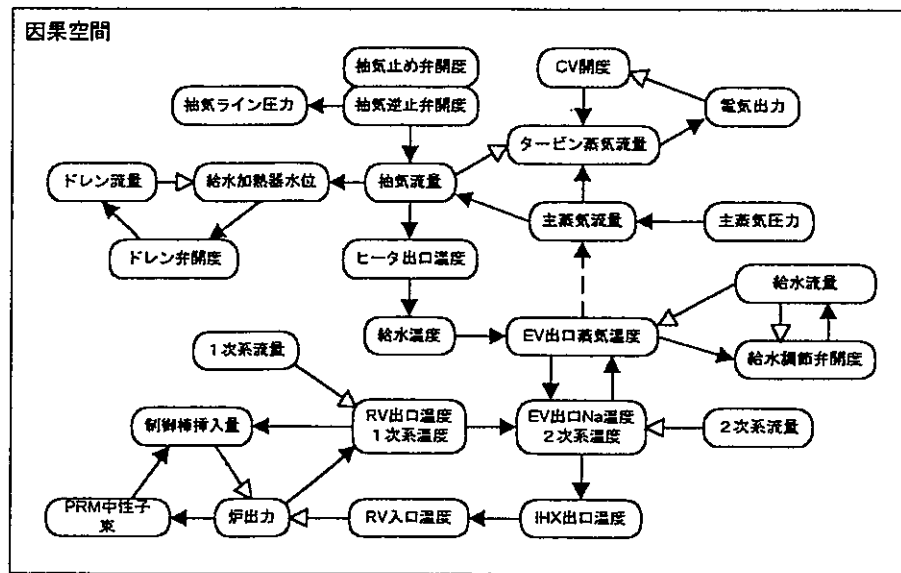


図5 被験者の因果空間と構成空間 (抽気喪失)

プラント構成に関する知識の中では上のような機器の存在や接続に関する知識が使われることが最も多く、特に抽気喪失シナリオでは故障箇所付近の構成が複雑であるために、系統図と制御盤を見ながら接続関係に基づく探索がかなり長時間続く。機器の存在・接続に関する知識の他には、次のような機器の属性に関する発話が見られた。

- A : 最高なんぼでしたっけ? 𐄂
- B : 3900 いくつだと思ったんだけど…あっさり 3900… 𐄂
- B : もうちょっと入るには入りますけど。

これはオーバーフロータンクの容量に関する質疑で、このような知識もシステム構成に関する知識といってよいであろう。このような対象システム機器の構造、接続、形状、

配置、属性などに関する知識を記述する領域を構成空間と呼ぶことにする。

図5に抽気喪失シナリオにおける発話記録から抽出した被験者の構成空間を示す。ここで異常原因に近い蒸気系、抽気系、給水系が詳しく記述されているのに比較して、1次系、2次系はきわめて大まかにしか把握されていない。また対象プラントの1次系、2次系は3ループから成り、2重漏洩シナリオでは漏洩したAループの構成だけが詳細に言及されるが、被験者は同様の構成を持つBループ、Cループに対しても詳細な知識を持っているはずである。したがって、被験者は系統ごとに問題解決に必要な十分な詳細さのレベルで考えていることになる。システムモデリングでは同じシステムをシステム全体、系統、機器、集合部品、部品といった異なるレベルで記述して階層的に表現するのが一般的であるが、以上のような構成空間の姿からこのような階層表現が運転員の知識モデルとしても妥当であることが示唆される。

2.4.5 4空間の相互関連

これまで被験者の行動発話分析によって抽出したプロセス制御に関する知識の内容を分類する4つの空間を説明したが、これらの空間は独立に存在するのではなく、相互に強い関連をもって知識モデル全体を形成している。行動発話分析の結果を見ると、空間を横断する推論が頻繁に行われており、異なる空間に属する知識の間に接続が存在することを示している。このような相互関連には様々なパターンがあるが、比較的頻繁に見られたのは次のようなパターンである。

(1) 状態 → 目標

状態空間の知識から対象システムの状態に関する仮説が生成されると、それは直接あるいは間接的にこれと結びついたタスクを連想して特定の行動を誘発する。たとえば図3では、図1にもある状態 leak(Loop1A)の仮説より徴候 deposit(Na, DPD_filter)の予測を介してタスク Check(F, deposit(Na, DPD_filter))が喚起されている。

(2) 因果 → 状態

因果空間の知識を用いた推論の結果は、状態空間に投影することによって状態同定に利用できる。たとえば図4に示す推論から、{electric_power is high, feedwater_temp is low}が状態 extraction_flow is lowの徴候集合になることがわかる。知識工学において原理的知識から表層的知識を導出することを知識コンパイルと呼ぶが、行動発話分析の結果は被験者がこのような知識コンパイルをオンラインで実行していることを示す。

(3) 因果 → 目標

知識コンパイルが因果空間と目標空間の間でも行われることが、次の発話記録から示唆される。

C : 3950, 今 3950…これどうなちやうの一杯になったら…これ?

B : 一杯になるとあふれちゃいます…で, あの…出力落とせば, 温度下がった分だけ縮みますけどねー。

C : あっそうか…とりあえず下げようか?

これは出力を低下させれば冷却材温度が下がり, 熱膨張で体積が減るのでタンクレベルも下がることから, レベルの上昇を抑えるために出力を下げることを提案している部分である。この推論自体は因果関係知識を用いて行われているが, その結果は目標空間に投影されて行動計画に使われる。

(4) 目標 → 因果

目標から因果への関連として認識されている知識の重要なものに, システムの機能に関する知識がある。次は抽気喪失シナリオで記録された機能に関する発話の一部で, 括弧内はその対象を示している。

「EV の出口蒸気温度の設定かなんかがおかしくないかな。369 としても 365 ぐらいになって, ちょっと下がり, それで流量増やしているのかな。」(給水制御)

「だけどおかしいな。温度上がれば出力下げるはずなのに…」(原子炉出力制御)

「ドレン弁は今, 閉弁してドレンレベルを上げようとしていると…」(加熱器水位制御)

このように言及された機能の大部分は自動制御に関するものであったが, これらの発話から被験者が機能を因果関係に基づくシステムの振舞いとして理解していることがわかる。その一方で, 機能は単に因果空間に閉ざされた知識ではなく, 特定の目標と結合したものとして認識されているようである。この目標は発話に現れていないが, きわめて特徴的な点は, 一般的なシステムの振舞いの記述と異なり, 機能の記述では他動詞が多用されることである。他動詞を使った擬人的表現は, 被験者が因果的振舞いの背景に設計者の意図やシステムの目的を意識していることを示唆している。したがって機能は, 「ある目標の視点でとらえた一連の因果関係知識」と考えるのが妥当であろう。

機能の他に目標空間から因果空間への関連を示すものとしては, ある操作がプラントに及ぼす影響を因果空間での影響伝播によって推論するという行為が見られた。

(5) 構成 → 因果

構成空間の知識を使って行われる探索も, その結果を他の空間に投影してさらに推論を続けるために行われることが多い。抽気喪失シナリオで特に顕著だったのは, 初期徴候の観測部位に近い系統機器のパラメータを網羅的に確認する行動である。このシナリオでは, 異常原因を同定するための明確な徴候がなかなか得られないため, 機器の物理的接続経路を因果の伝播経路と考えて探索し, 妥当な状態分類と徴候集合の関係を見出

そうとしていると考えられる。

2.4.6 経時的分析

被験者が用いた知識内容のタイプを経時的に追って行くと、被験者の認知過程の大局的流れを明かにすることができる。図6は2つの実験シナリオの各々について、表1に示した発話分類の結果を経時的に描いたものである。4空間を表す軸上に描かれた小さな黒点が各空間の知識に関わる発話を表しており、軸間の矢印つき直線は異なる知識空間の間の相互関連を示している。

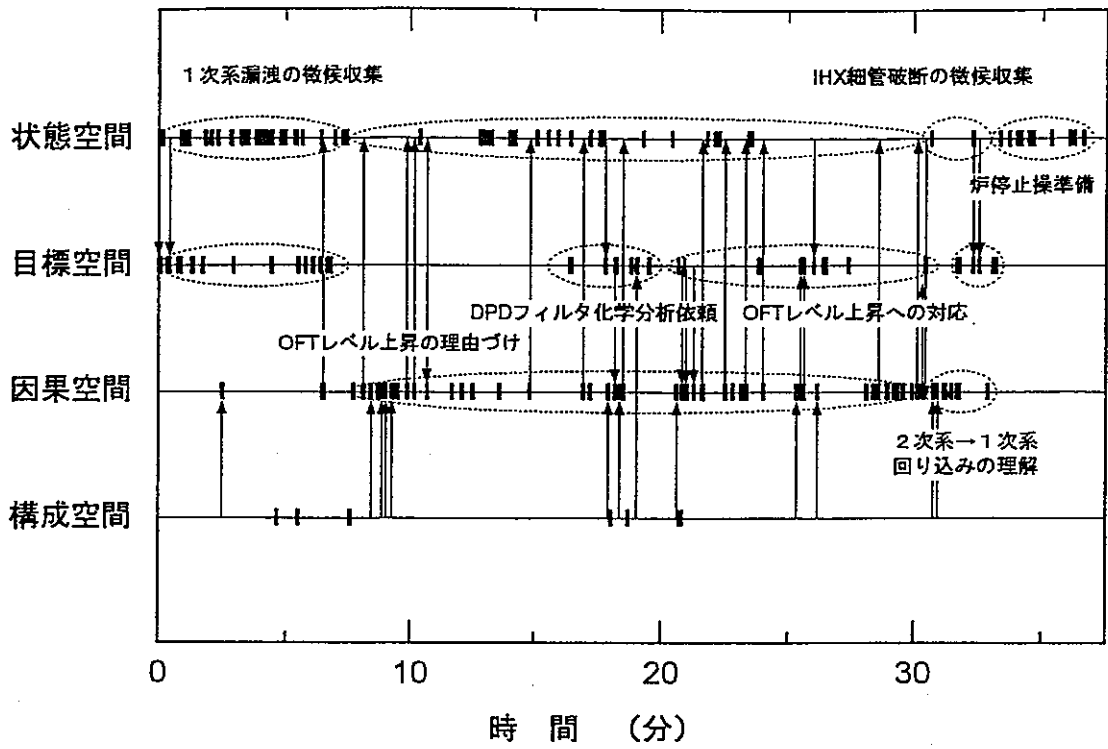
2重漏洩シナリオでは、警報の発報で始まる最初の徴候が1次系Aループ漏洩を明かに示しているため、状態空間での思考がしばらく継続する。しかしこの空間ではオーバーフロータンク(OFT)レベルの上昇が説明できないため、7分あたりから思考の場が因果空間に遷移するが、この遷移はかなり明瞭である。因果空間での推論結果は状態空間に何度か投影され、観測徴候との照合による異常原因の同定が試みられるが成功しない。最終的に2次系漏洩の徴候を発見し、2次系から1次系への回り込みで現象の説明がつくまでこの因果空間での思考は続く。初期の目標空間での思考は、異常原因同定のための観測行動の計画である。その後しばらくたってからは、現場要員による漏洩確認を依頼する部分と、OFTレベルの上昇を抑制する手段の検討にあてられている。構成空間の知識は、ときおり接続関係にそった因果経路の探索が行われる以外はほとんど使われない。

2重漏洩シナリオと比較すると、抽気喪失シナリオにおいては明確な徴候集合がないために因果空間での思考が異常検出の直後から始まる。因果空間での推論結果は頻繁に状態空間に投影されるが、異常徴候の収集に関連した状態空間内での思考もかなり多い。またすでに述べたように、異常生起から10~24分の頃に構成空間での探索がかなり頻繁に行われる。対応措置が検討され始めると目標空間での思考が支配的になり、因果空間も操作の影響評価に使われるようになることがわかる。このようにシナリオの特徴の違いを反映し、抽気喪失シナリオでは2重漏洩シナリオとかなり異なる認知的振舞いを見せることがこの分析からわかる。

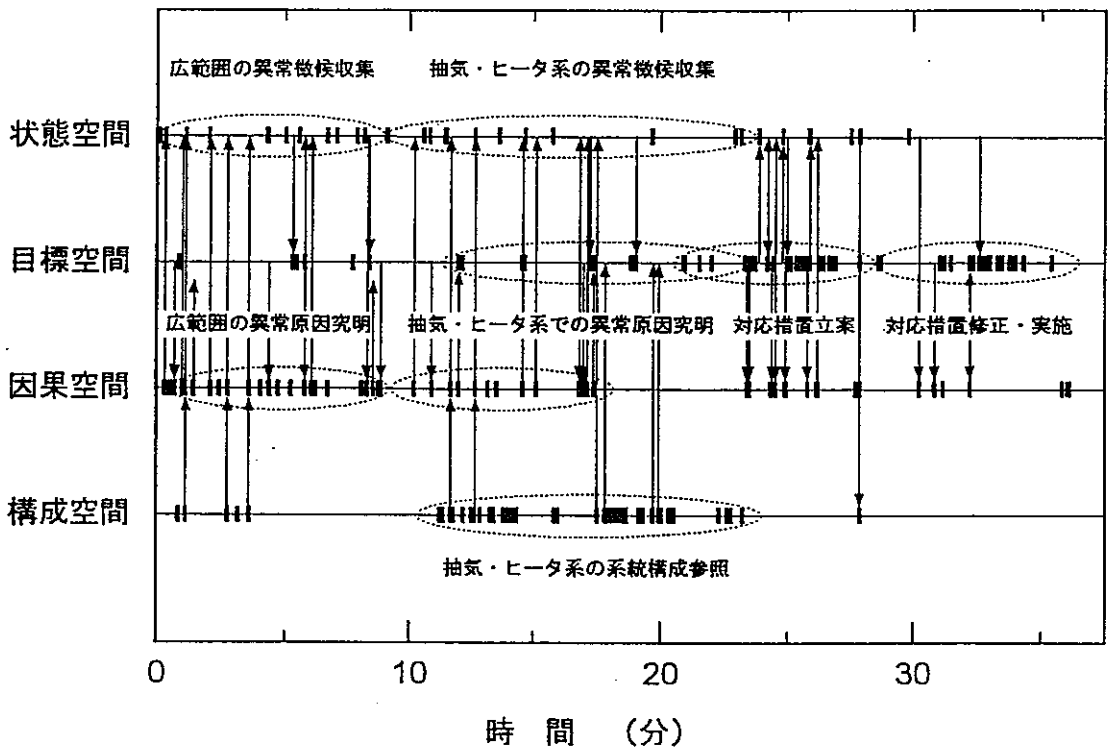
2.5 考察

2.5.1 語られなかったこと

以上のように、プラント運転員が用いる知識は状態、目標、因果、構成の4つの大きなタイプとこれら相互の關係に整理できることが、行動観察によって確認された。しかしこの知識モデルではカバーされていない知識、あるいは陽に語られないために内容不明な知識がいくつかあった。



(a) 2重漏洩シナリオ



(b) 抽気喪失シナリオ

図6 被験者の認知過程流れ

知識モデルがカバーしていない知識のうち、比較的大きなものは集団の協調行動に関する知識である。実験では3人の被験者（現場要員役を入れると4人）が協調的にタスクを遂行したが、この分担がどのように決ったかは全くと言っていいほど発話に現れない。ある被験者が人に何かを要請する場合、相手が誰かは比較的明確に分るが、それをどう決めたのか、それを決めるのにどんな知識を利用したかが抽出できない。運転班における各人の職制上の役割分担はある程度決っているため、この役割分担の知識が基本にあることは確かであろう。たとえば警報が発報したときにリーダーではなくフォロワーの運転員が確認に直行するのは、事前に決っている役割分担である。しかし全く語られていない以上は、このような知識も想像の域を出ない。また、役割分担が全て事前に決っているわけではないし、原則の通りになるとも限らない。むしろ大部分は、その場の状況に左右されて機会主義的に役割分担が決っているように見えるが、この状況判断も一切語られない。たとえば、その時の各人の作業負荷配分をセンスして負荷の低い人に新しいタスクを依頼するとか、たまたま表示に最も近い位置に居た人が監視を請け負うといったような決定が暗黙裡に行われる。我々は日常このような判断を常識と呼ぶが、本研究で採用した分析手法でこのレベルの知識にまで踏み込むのは不可能である。

カバーできていないもう一つの知識は、定量的思考に用いられる知識である。実験では、状態空間における徴候や因果空間における振舞いの記述のほとんど全てが実質的に定性的表現であったが、純粹に定量的な思考を示す発話が両シナリオで各々8/7件あった。そのほとんどは、対応措置として原子炉出力をどのレベルまで低下させるべきかという判断をしている部分であったが、ほとんど結論だけで知識の内容は不明であった。このような定量的思考に用いられる知識がどのような形で認識されているのかについては、因果空間における因果関係の結合強度の形や、パラメータ間の直接的な関数の集合など、いくつかの可能性が考えられる。しかし、今回の実験では観測事例が少ない上に知識内容を示す手がかりに乏しいため、知識モデルに含めることは不可能であった。定性的思考が支配的であったとはいえ、定量的思考のための知識もプロセス制御に不可欠であることは明らかなので、その内容解明も今後行わなければならない。

2.5.2 関連研究

モデルベース推論の基礎となる物理システムのモデル化に関して、これまで多くの研究者が取り組んできた。たとえば Chittaro らはシステムを構造的知識、挙動的知識、機能的知識、目的論的知識、経験的知識の5つの認識論的タイプによって記述することを試み、各タイプの基底概念や具体的な知識表現を提案している[8]。5つの認識論的タイプのうち、構造的知識、挙動的知識、目的論的知識は本研究の構成空間、因果空間、目標空間にほぼ対応するが、挙動的知識は物理法則に基づいて記述されており、因果を中心に考える因果空間と異なる。また、本研究では機能空間をあえて独立させていない。経験的知識は、経験を通して獲得されるシステムの明示的表現に関する知識と定義され

ており、状態空間を含むようにもとれるが、特別な関心がなかったためか具体的な説明を避けている。

Borst らは物理システムを見る視点がシステムの配置、挙動の背後にある物理プロセス、数理的関係の記述の3つに分類できるとして、構成要素プロセス、EngMath の3つのオントロジーで記述することを提案している[9]。プロセスオントロジーの記述には、ボンドグラフと同様にエネルギーフローを中心概念とする一般化物理法則を用いており、EngMath オントロジーは数式による物理法則の記述である。このように AI におけるモデリング研究では、システム挙動を物理法則に基づいて記述することが多い。しかし今回の実験で明かになったことは、被験者が物理法則ではなく因果関係のレベルで主に思考していることである。そこで本研究では物理法則よりも因果関係を主要な関係と考えたが、これはモデルベース推論のための規範的基礎を提供しようとする研究と、ヒューマンモデリングの一貫としての本研究との立場の違いが大きい。

五福は工学システムにおいては目標、機能、挙動、構造の4つの視点が重要であるとして、これら4つの視点からのシステムモデルと、モデル間の関連を表現するためのモデルを用いてシステムを記述することを提案している[10]。機能は「解釈者の目的や意図に基づいて選択、変形された挙動記述」と定義され、今回の実験で得られた示唆と一致する。しかし機能モデルには最も重要な地位が与えられており、Lind が提案した Multi-level Flow Model (MFM)[11]を用いて機能をいくつかのプリミティブによって表現する。なお、本研究の状態空間に相当するモデルはない。また笹島らは機能モデル表現言語 FBRL において、振舞いモデルにその解釈情報である Functional Topping (FT) を付加したものとして機能を記述している[12]。FBRL では一層複雑で人間にとって自然な機能概念の関係を定義する手段を提供している。

従来から様々な定義されてきた機能概念の多くと今回の実験で得られた示唆は矛盾しないが、従来の工学指向のモデリングでは、機能を重要な概念と考えてそれ単独で記述層や空間を用意し、さらに機能記述のためのプリミティブを定義している場合が多い。これに対し、本研究では機能を人間のタスクとあえて区別せず、目標空間から検索可能な因果空間の部分集合ととらえた。これは手動制御と自動制御のモード切替えに見られるように、人間のタスクとシステムの機能が代替される場合があること、また被験者が機能の言及を擬人的に行っていることなどを根拠に、ヒューマンモデリングの立場から両者を分離しないほうがよいと判断したためである。また、主に設計者の視点を理論的にとらえようとする従来研究と、主にユーザの視点を記述的にとらえようとする本研究の違いにもよる。しかし、人間がある特定のクラス群や語彙を使って機能を理解していることも確かで、これらを定義する空間を独立に設けるべきか、また人間のタスクについても同様のことが言えないかなどが今後検討すべき課題である。

2.6 まとめ

プロセス制御の専門家がシステムや自身のタスクに関して持っている知識の内容を解明し、包括的な知識モデルを構築することを目的に、プラント運転を対象とする実験を行った。単純な専門的判断よりも信頼性が高く精緻な分析を行うために、実験で観測された被験者の行動・発話の形成過程を論理式で記述し、推論に使われた知識を収集・分類する分析手法を採用した。この分析の結果、被験者の知識内容が状態、目標、因果、構成の4つのタイプと、それらの間の相互関連に分類できることや各タイプの知識の基底概念や基本的関係を明らかにした。また、被験者の発話をこの枠組に基づいて追跡することによって、被験者の認知過程の流れを明らかにし、課されたタスクの特徴を明らかにすることができることがわかった。以上より、これら4タイプの知識を記述する空間によって専門家の知識モデルを構成することを提案した。

システムモデリングでは規範的なモデルを公理的に構築する機会が多いが、このようなモデルが人間のシステム認識と整合していることを確認する実証的研究は少ない。本研究の接近法はエスノグラフィックで統計的検証にはなじまないが、人間行動の観察に基づいて知識モデルを同定しようとするものである。こうして得られたモデルは従来のモデルと大きく矛盾するものではないが、振舞い記述に用いる主要概念、機能の扱い、状態同定のための知識などに違いが見られた。また提案したモデルはかなり概念的なものであり、工学的に活用するためには各空間の基底概念や基本的関係をより厳密に定義し、形式的に記述する必要がある。プロセス制御以外のドメインへの適用性を検討することも、残された課題である。

3 知識モデルと思考プロセスの可視化による学習支援

3.1 はじめに

近年の科学技術の進歩による機械の自動化によって人間は単純な作業や過剰な負担を要求する仕事から解放される一方で、新たに機械では対処しきれない問題、すなはち設計や教育の段階で想定していない、あるいは想定しなくても良い事態に対処する問題解決者としての役割が要求されるようになってきた。このような問題解決者としての役割を担うために、原子力発電所の運転員はテキストによる学習やシミュレータによる訓練によって必要な知識や技術を身につけている。しかしながらそこではどれだけ周到にカリキュラムを組んだとしても起こりうるすべての事象を網羅することはできない。そこでまったく初めての事態に出会ったときには対象システムの深い理解に基づいた適切な対処、いわゆる Rasumussen の SRK モデル[13]でいうところの知識ベースの問題解決が期待される。複雑、巨大化するシステムにおいて人間に対する知識ベースの問題解決者としての役割はますます重要になってきており、このような問題解決能力を向上させることはプラント運転教育において大きな課題となってきた。

しかしながら現行の教育は、主に定められた事象への迅速かつ的確な対応を目的としたものであり、想定事象に対する効率の良い対処能力の獲得は期待できるが、知識ベースの問題解決能力身につけるためにはさらに、テキストを用いた座学によるプラントの振る舞いの背後にある物理的動作原理の知識の体系化、具体的体験による知識の定着によって、学習者それぞれがプラントに対する適切なメンタルモデルを構築する必要がある、労力と時間を必要とされる。そこで本研究では、プラントに対する深い理解、すなはち想定内の運転操作に対応できるだけでなく、知識ベースの問題解決にも対応できるようなメンタルモデルの形成を計算機技術を用いて支援する方法を提案し、これに基づく支援システムの構築を行う。

学習者の努力によって構築されたメンタルモデルにおいて、システムは様々な抽象度、観点から記述され、それぞれの結び付きによってプラントに対する知識の総体をなしている。知識の体系化や定着の段階において、この様な知識の全体像を把握しやすい形で学習者に提示し、学習において常に様々な知識の関連を意識、観察させることができれば、効果的かつ効率よいメンタルモデルの形成が支援できると考えられるが、テキスト形式の知識表現ではこのような複数の観点、複数の知識の結び付きを表現するには限界がある。

そこで本支援システムでは、前節において提案された知識モデルを用いて対象プラントの運転に必要な知識を整理し、それらの知識をコンピューターグラフィックスによって仮想空間上に配置させ、知識およびそのつながりを可視化し、知識の全体像とそのつながりを提示する。これをプラントシミュレータに組み込み、シミュレータを運転しながら常に学習に知識の全体像の観察を可能にすることによって、プラントに対する深い

理解を効率良く支援することを目指す。

3.2 プラント運転に必要な知識

システムに関する知識の整理やプラント運転員がプラントを運転したり、問題解決したりするために必要な知識の整理に関して前節で提案した4空間モデルを用いる。プラント運転には大別して目的論的知識と、現象論的知識の二種類の知識が必要であると考えられている。目的論的知識とは、システムを目的の観点からトップダウン的に記述した知識のことで、目標、機能、状態といった知識のことをいう。これらの知識は主に設計想定内の状況において用いられるが、予見的な知識であるため想定外の状況では役に立たない。一方現象論的知識とは、物理法則やシステムの構造から得られる物理パラメータの因果関係など、システムの目的から独立して記述される知識のことで、想定外の状況ではこれらの知識を用いることで問題解決が可能ながある。

このモデルではプラント運転員がもつプラントシステムに関する知識と自分のタスクに関する知識を以下の4つの種類の知識に分類して表現する。

(1) 構成空間

構成空間は、システムを構成する物理的実体の構造、形状、接続といったものを記述する領域。ここでは、システム全体、系統、機器、部品などといったさまざまな粒度からのシステム像が記述され得る。すなはち全体-部分関係によって階層的に構造化されている。この知識の表現としては、線図等のグラフ表現やオブジェクト指向表現が適している。

(2) 因果空間

因果空間は、システムの物理的な振舞いを記述する領域。ここでは、システムのパラメータおよびそれらパラメータの、原因-結果や質量、エネルギー保存といった定性的、定量的制約などの相関を記述する。因果空間も異なる粒度での記述が可能で、ある程度構成空間の記述レベルに対応している。この知識の表現としては、因果関係線図等のグラフ表現や方程式などがある。

(3) 状態空間

状態空間は、システムの目的から見て意味のあるシステムの状態を規定している。これらの状態は実際に観測可能なパラメータの状態をもとにある特定の状態が同定される。状態空間において、観測される徴候を集合要素、同定される状態を集合上の位相と表現すると、位相空間によって表現され得る。

(4) 目標空間

目標空間は、システムの目標、システムの機能あるいは運転員のタスクを目標-手段によって構造化することによって記述される。このような知識はグラフ線図によって表

現され得る。

これらの4つの知識は互いに関連づけられており、それらの関連もまた運転員の知識を構成している。構成空間は因果空間を裏付けており、例えば構成空間における機器の接続が、因果空間における因果相関に根拠を与えている。同様の関係がその他の知識空間の間にも存在する。4つの知識のうち構造、因果空間が現象論的知識に分類され、状態、目標空間が目的論的知識に分類される。

3.3 支援システムの概要

3.3.1 知識の可視化手法

本研究ではFBR二次系Naループの運転操作を学習すべき対象とする。対象プラントの構成を図1に示す。このシミュレータではIHX（中間熱交換機）の一次入口ナトリウム、ACCS（補助炉心冷却器）の入口空気、EV（蒸発器）の入口冷却水それぞれの流量と温度、ACCS、EVのナトリウム出口の弁の開度、およびポンプの出力を手動で設定することが可能で、これらの操作を用いてマニュアル運転を模擬することができる。

本システムの第一の機能は、プラント運転に必要な知識及びそれらの結び付きをコンピュータグラフィックスを用いて仮想空間上に描画し、学習者の注目している知識空間やその階層、運転モードによって任意に切り替えて提示することである。また学習者は任意の視点から描画された知識群を観察することができる。これによって、例えば想定外の状況において、因果空間のパラメータの相関や因果空間と構成空間との結び付きを辿ることでシステムの状態を同定できるといったプラント状態の視覚的推論が可能である。

知識群の可視化の手法としては、知識単位をそれぞれノードで表現し、それらを意味の関連性に応じて空間に配置し、結び付きをリンクで表現するという方法が一般的であるが、各知識空間の内容に適した表現があり、各表現に対応した把握しやすい表示がある。そこで、システム上ではそれらの表示を用いてそれぞれの知識空間を閉空間に表わし、それらに対してリンクをはるることによって知識群を可視化することを提案する。

対象とするFBR二次系Naループの運転に必要な知識のシステム上における四層モデルに基づいた表示例を以下に示す。

(1) 構成空間

構成空間の表示例を図7に示す。ここでは構成を表現するのに最も一般的なミミック表現を用いる。図7の表示は3つの熱交換器をすべて稼働させた運転モードの機器レベル階層を表している。

(2) 因果空間

因果空間の表示例を図8に示す。各パラメータを一つのオブジェクトとして表し、そ

これらの相関をリンクを用いて表現する。図8は ACCS モードのパラメータ相関を表しており、水色のパラメータは流量に関するパラメータを、赤色、黄色は熱に関するパラメータおよび機器の調節に関するパラメータをそれぞれ表している。

(3) 状態空間

状態空間の表示例を図9に示す。システムレベルの状態、機器レベルの状態、および実際に観測されるパラメータの兆候をそれぞれ内包関係で表現する。図3は定常モードにおける二次系異常状態を表している。二次系の状態はNa漏洩やHXの故障といった一般的な状態の集合によって表現され、これらの状態は温度や流量の異常といった兆候の集合によって同定される。

(4) 目標空間

目標空間の表示例を図10に示す。図10は定常モードにおける定常状態維持を主目標にした目標空間を表している。この主目標から、一次系や蒸気系の正常といった副目標、さらにバルブやポンプの制御といった具体的な手段に至る目標—手段の関係をツリー構造で表現している。

知識空間の相互関係を示すリンクの可視化例として、図11に状態空間と目標空間及びそのリンクの表示を示す。そのほか本研究で可視化の対象とする概念を以下に示す。

(1) モードの表現

3つの運転モード、定常運転モード、ACCSのみで余熱を除去しているモード、ACCS、EV、SHすべてを用いて運轉移しているモードに関する知識の違いををそれぞれ区別して表現する。

(2) 階層表現

構成空間および因果空間における知識の階層性の表現として本研究では機器レベル、およびシステムレベルの2種類の階層の違いを支援システム上に表現する。

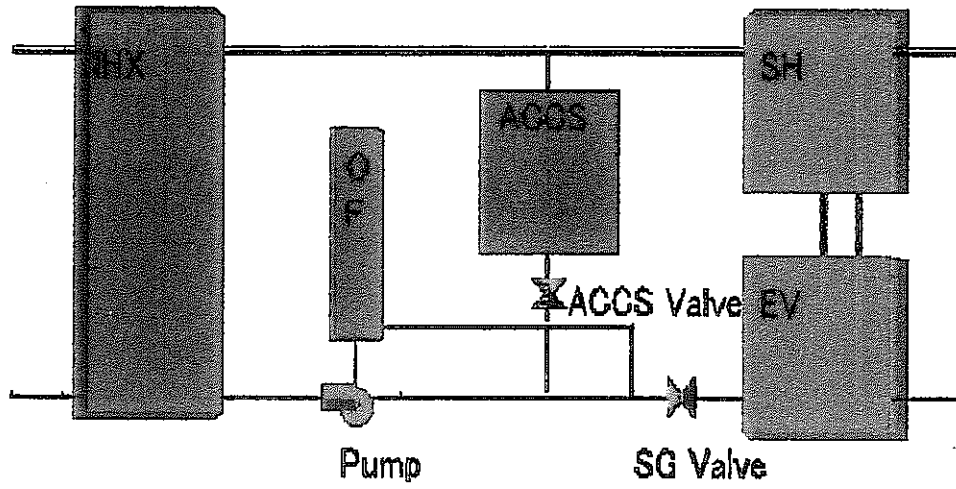


図7 構成空間の表示例

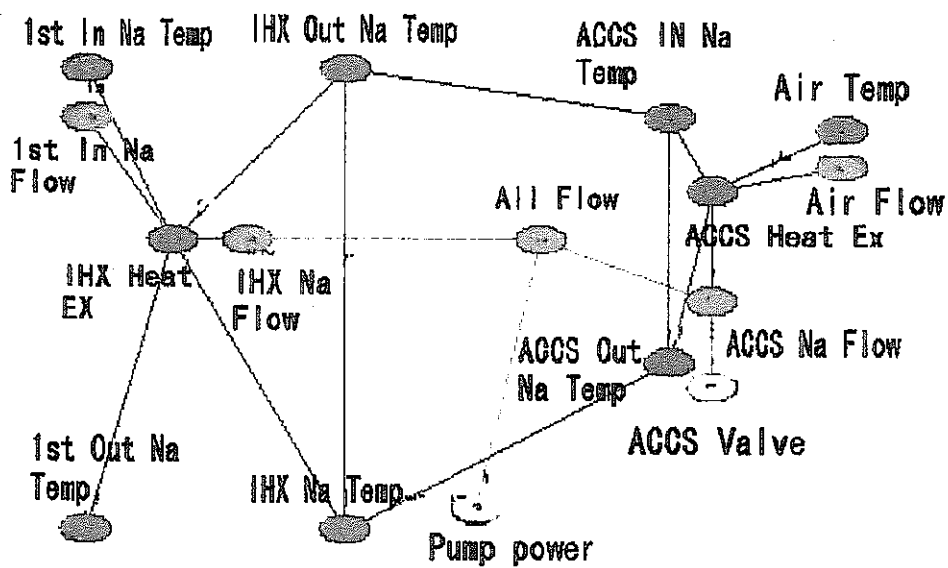


図8 因果空間の表示例

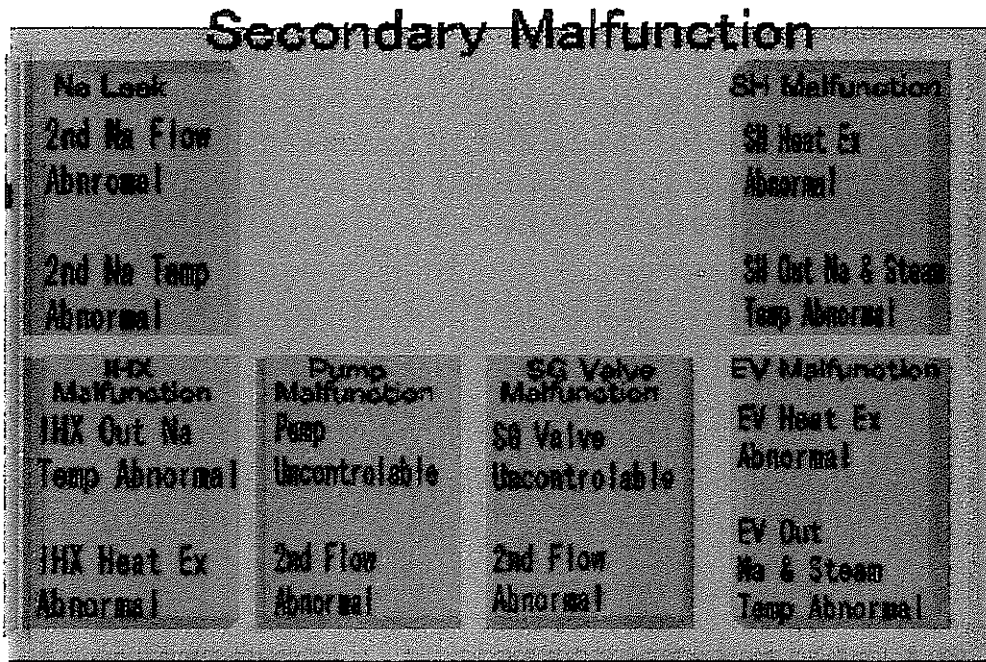


図 9 状態空間の表示例

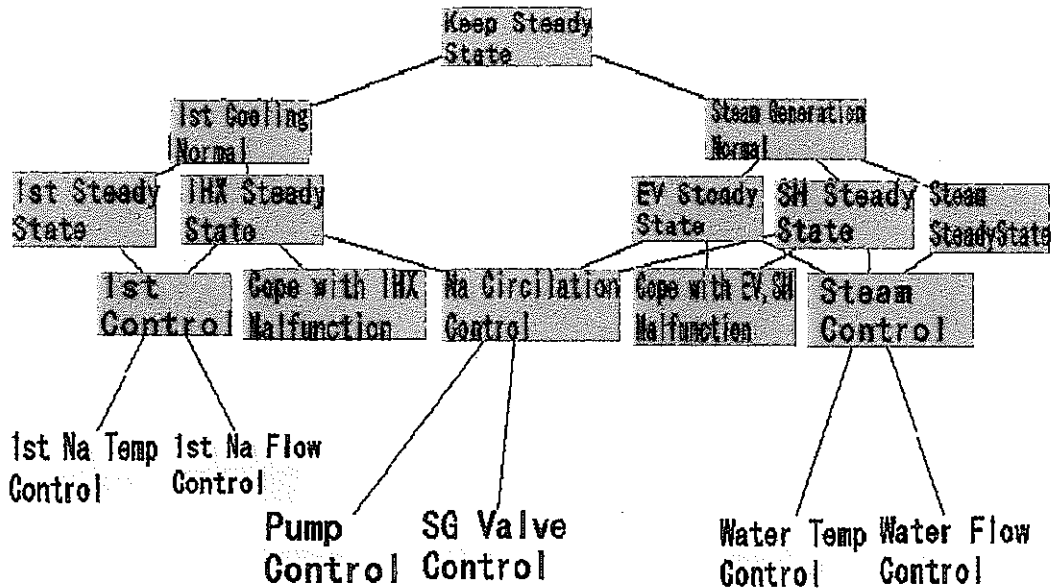


図 10 目標空間の表示例

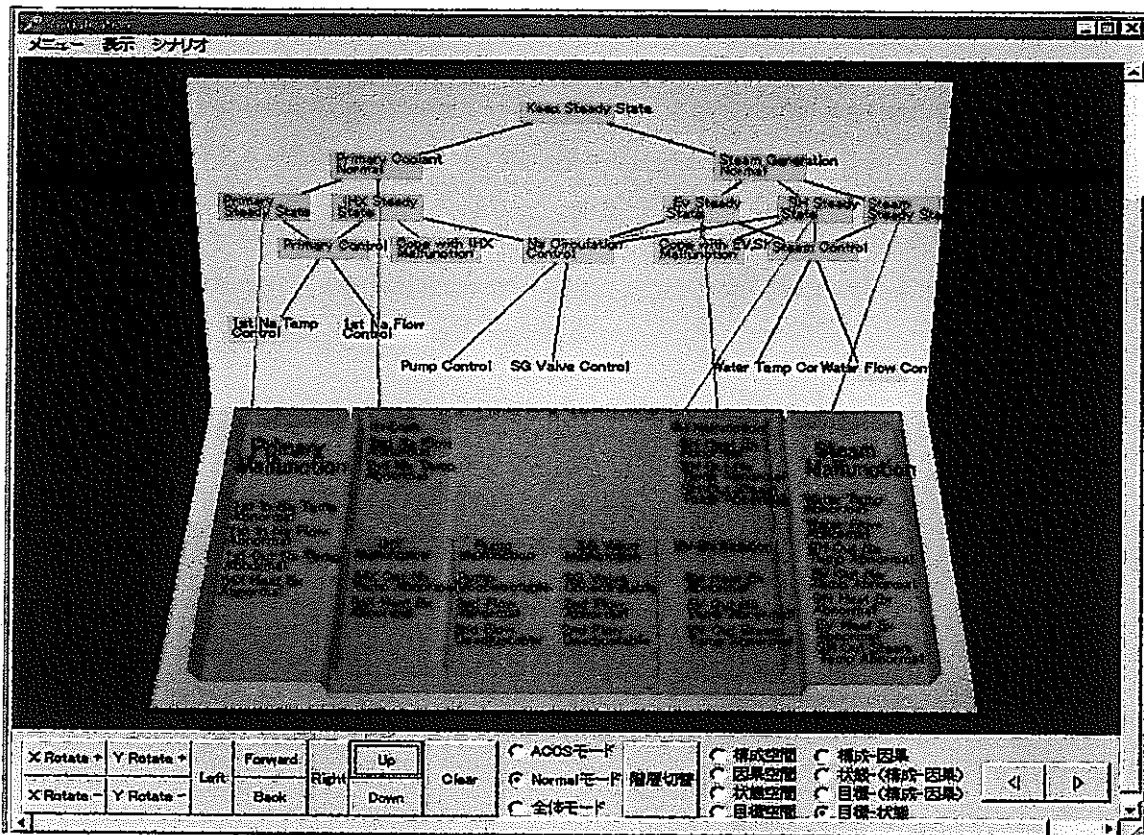


図 11 システムの形態 (状態空間-目標空間)

3.3.2 思考プロセスの可視化とその他の学習支援機能

プラント運転員にとって効果的な知識の使い方を身につけることは重要である。知識ベースの問題解決では、情報の知覚、状態の認識、目標の同定、行動計画、手段実行という認知過程が繰り返し行われる。これらの過程および過程の移り変わりを、4層モデルの各々の知識空間の適当な組み合わせ及びそこにおける知識の関連をアニメーションを用いて強調的に表示し、学習者に提示することによって、学習者の認知活動が隘路に陥ることなく、効果的にある事象の対処に関する知識の使い方の学習を支援することを目指す。

本システムでは「EV 故障のために SG 弁を閉じて ACCS のみで余熱を除去する」というシナリオに対して用いるべき知識群を次の4つのシーンを用いて可視化した。

シーン1：ここでは情報の知覚から状態の認識に至る過程を（構成空間，因果空間）と状態空間の組み合わせ及びこれらにある知識関連を用いて可視化する。まず因果空間における「EV Out Na Temp」，「EV Heat Ex.」，「EV Out Steam Temp」が点滅する，これは何らかの異常兆候がこれらの物理パラメータにおいて知覚されたことを表す。次に

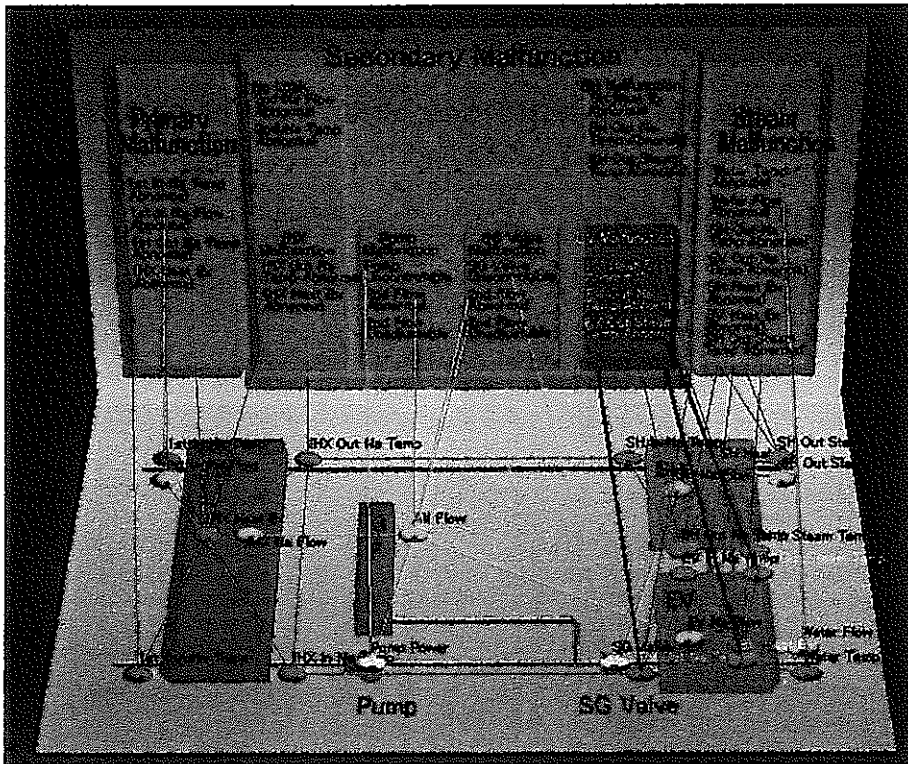
これら点滅するパラメータから状態空間における「EV Abnormal」にリンクがアニメーションによって渡され「EV Abnormal」が点滅する。これによって知覚された兆候からEVの異常状態が認識されたことが表現される。(図 12-a)

シーン2:ここでは状態の認識からゴールの同定に至る過程を状態空間と目標空間の組み合わせ及びこれらの間にある知識関連を用いて可視化する。状態空間における「EV Malfunction」が点滅し、目標空間において損なわれたサブ目標である「EV Steady State」にリンクが渡され「EV Steady State」, 「Cope With EV,SH Malfunction」が点滅することによって、認識された状態から目標が同定される過程を表現している。(図 12-b)

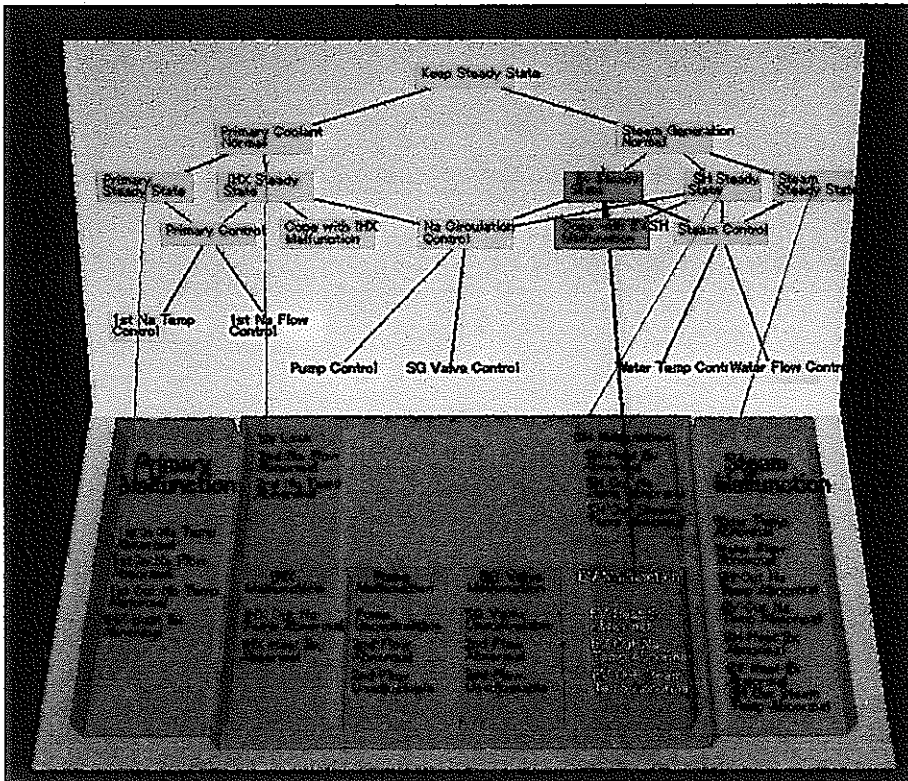
シーン3:ここでは目標の同定、行動計画、手段実行までの一連の過程と手段実行に現象論的知識へ影響の伝播を目標空間と(構成、因果空間)の組み合わせおよびこれらの間にある知識関連を用いて可視化する。目標空間における「Cope With EV, SH Malfunction」から「ACCS Valve Open」, 「SG Valve Close」が赤色で表示されることで目標空間内において目標の同定、行動計画、手段実行がなされていることを表現している。「ACCS Valve Open」, 「SG Valve Close」から現象論的知識にリンクが渡され現象論的知識が変化することによって、手段実行による影響を表している。(図 12-c)

シーン4:ここでは一連の問題解決が終わり、新たな目標空間が同定されたさまをあらわしている。(図 12-d)

プラント運転教育では講義及びシミュレータによる訓練が主に行われている。そのため学習における知識の体系化と具体的な経験による知識の定着というものが別々に行われている。本支援システムではこの問題の改善策として、知識の提示をプラントシミュレータの状態に同期させて行う。これによって学習者はシミュレータを操作しながら状況の変化に対応した知識構造の変化を視覚的に把握することが可能で、ある状況に対してどのような知識群に注目したら良いのかを理解することができる。本システムでは、シミュレータの運連モードの変化に対応した知識構造の提示を実装した。学習者がSG弁及びACCS弁の操作することによって対応する運転モードの知識群がシステム上で提示される。例えば、シミュレータにおいて運転モードを定常モードからACCSモードに切替えると、知識表示もそれに同期してモードが切り替わる。これによって具体的操作を行いながら、それに関連した知識および知識関係の変化を視覚的に把握することが可能で、効率よくメンタルモデルの形成を支援することが期待できる。

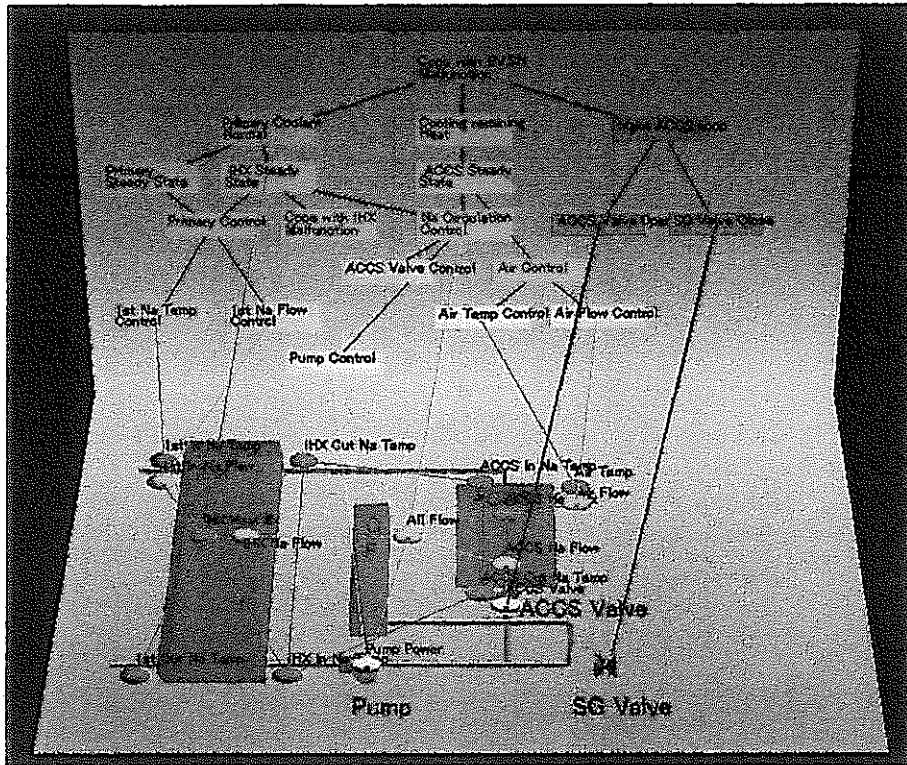


(a) シーン 1

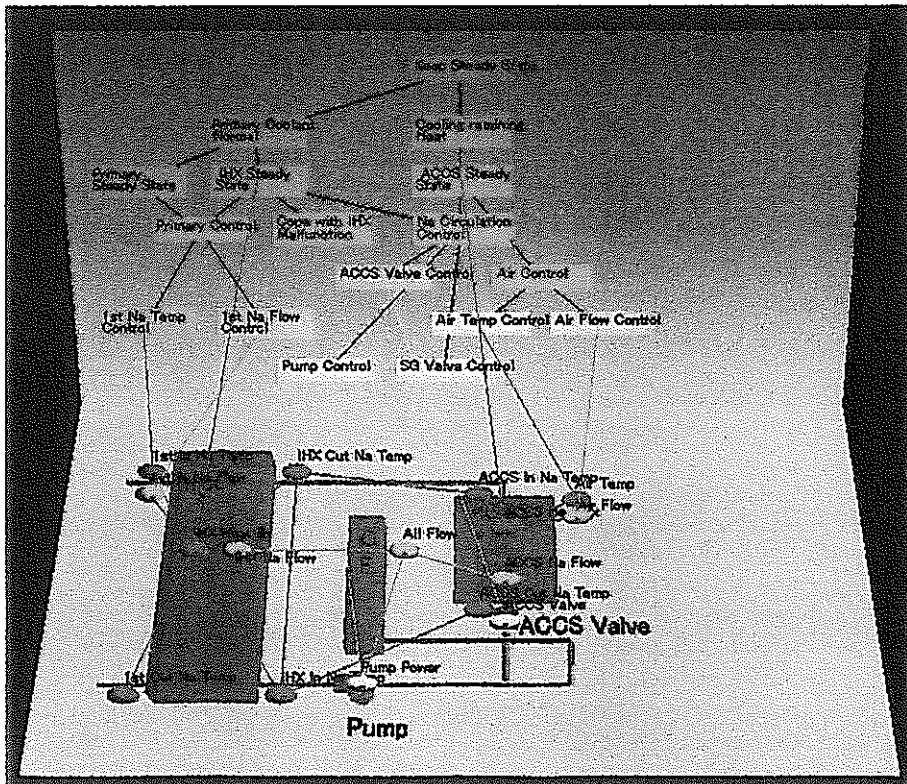


(b) シーン 2

図 12 思考プロセスの可視化の例



(c) シーン 3



(d) シーン 4

図 12 思考プロセスの可視化の例

3.4 まとめ

プラント運転に関する様々な観点からの知識及びそれらの関連を仮想空間上に可視化、表示することができた。またプラント状態に対応した知識関係の変化を動的表示によって表現することができた。一方、協調作業や手段選択に関する知識を表現するためにはさらに新たな枠組みが必要となる。

プラント運転員のプラントに対する深い理解支援策として知識モデルの可視化、提示を行い、それをを用いてシミュレータとのオンライン学習を行うという方法を提案した。知識モデルとして、目的論的知識と現象論的知識の両者を区別して整理し、人間-機械系全体を記述している四層モデルを採用した。このモデルによって表現された各知識空間を仮想空間上に配置し、その関連をリンクを用いて表示するという可視化手法、ならびに様々な知識の相互関連をシミュレータの状態に同期させ動的に表示する手法を提案し、支援システムを試作した。

実験及びアンケートによって支援システムの有効性を検証し、知識の可視化方法ならびに深い理解を支援する方法の改善を行うことが今後の課題である。

4 結 言

すでに「もんじゅ」シミュレータを用いて行われた認知実験のデータを、被験者が用いた知識の内容の視点から分析し、運転員の知識モデルを構築した。発話データを元に被験者の認知過程を推定して論理式の形式に表現することによって、利用された知識を抽出した。抽出した知識を内容によって分類することにより、運転員の知識を構成する基底概念と基本的関係を明らかにすることができた。この分析結果に基づき、状態、目標、因果、構成の4知識空間で運転員の知識構造を表す包括的運転員知識モデルを提案した。

次にこの知識モデルを仮想3D空間で可視化することによって、望ましいメンタルモデルの獲得を支援するシステムを開発した。4つの知識空間それぞれ異なる概念構造を持っているため、空間的に表示する際には各々に適した表示方法がある。構成空間についてはミミック表示がプロセス系のインタフェースで定着しており、またシステム構成の把握の点で妥当な表現であると考えられる。そこで、この対象システムのミミック表示を基礎とし、その上に因果空間、目標空間、状態空間に属する概念と関係を表示する手法を採用した。さらにこうして視覚化した知識モデルの上で、運転員の規範的思考プロセスを動画として表示し、学習者が知識の規範的利用法を習得することを支援する機能を実現した。

以上、本研究はプラント運転員の知識の包括的モデルを提案するとともに、知識ベース行動能力の獲得をこの知識モデルに基づいて支援するシステムを試作した。しかし、まだ4空間知識モデルでは表現しきれない知識があり、また知識モデルの可視化による学習支援の有効性については実験的な検証を行っていない。したがって、実規模プラントへの応用も含めて、こうした点が今後の研究課題であると言えよう。

参考文献

- [1] 古田：ヒューマンモデリングの現状と課題，人工知能学会誌，Vol.13, No.3, pp. 356-363 (1998).
- [2] 溝口，池田：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).
- [3] Furuhashi, Y., Furuta, K. and Kondo, S.: A Methodology to Represent Plant Operator's Mental Model for Training Support System, Proc. 5th European Conf. on Cognitive Science Approaches to Process Control, pp. 137-146 (1995).
- [4] 古田，古濱，酒井，近藤：プラント運転訓練支援システムのための学習者モデル構築手法：人工知能学会誌，Vol.13, No.5, pp. 811-821 (1998).
- [5] Yoshikawa, S., Ozawa, K., Koyagoshi, N., and Oodo, T.: Knowledge Dependency Analysis of Plant Operators Using Consistent Protocol Formulation, Proc. 3rd Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-3), Crete, Greece, pp. 21-26 (1996).
- [6] Cohen, P.R. and Perrault, C.R.: Elements of a Plan-Based Theory of Speech Acts, Cognitive Science, Vol.3, No.3, pp. 177-212 (1979).
- [7] Allen, J. and Perrault, C.R.: Analyzing Intention in Utterances, Artificial Intelligence, Vol.15, pp. 143-178 (1980).
- [8] Chittaro, L., Guida, G., Tasso, C. and Toppano, E.: Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning About Physical Systems: A Case Study in Diagnosis, IEEE Trans. SMC, Vol.23, No.6, pp. 1718-1751 (1993).
- [9] Borst, P. and Akkermans, H.: Engineering Ontologies, Int. J. Human-Computer Studies Vol.46, No.3, pp. 365-406 (1997).
- [10] 五福：マンマシンシステムの機能と構造のモデリング，人工知能学会誌，Vol.13, No.3, pp. 347-355 (1998).
- [11] Lind, M.: Multi-level Flow Modeling of Process Plant for Diagnosis and Control, Proc. Int. Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety. Chicago.
- [12] 笹島，來村，池田，溝口：機能と振舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現言語 FBRL の開発，人工知能学会誌，Vol.11, No.3, pp. 420-431 (1996).
- [13] Rasmussen, J.: Skills, rules, knowledge: signals, signs, and symbols and other distinctions in human performance models. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. MSC-13, 257-267 (1983).