

運転員の深い理解を支援する方策の研究(1)

—運転員の挙動の知識への依存性に関する観察と定式化の試み—

1995年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

運転員の深い理解を支援する方策の研究(1)

—運転員の挙動の知識への依存性に関する観察と定式化の試み—

吉川 信治¹⁾、 小澤 健二¹⁾、 小屋越 直喜²⁾、 大戸 敏弘²⁾

要旨

運転員に求められるプラントの運転・診断に必要な知識の形成を計算機で支援する技術の開発を目指した研究の第1段階として、2ケースの、教育訓練課程に含まれない事象での運転員挙動データを採取した。

2ケース共、妥当な時間内に原因の同定を終えることができた。

今後の研究のためには、会話を計算機による処理が可能な形でデータ化しておくことが有益と思われ、このために、 \langle 情報記録の種類 $\rangle \times \langle$ 操作対象の情報 \rangle を基本とする会話内容の定式化手法を提案した。

対象プラントを人間が把握する枠組として、プロセス変量の変化が伝播していく経路を表わしたネットワークと、公衆安全と発電を最上位の機能、各機器単体の役割を最下位の機能とする機能階層モデルが種々の研究で認められている。今回の実験でもこれが重要な役割を果たしているが、既に任務に就いているレベルの運転員はこれらの知識は既に有しており、このレベルの運転員に対して冒頭のシステムがなし得る貢献としては、さらなる診断の迅速化や確実性のための、プロセス量間の定量的な関係や、そのような(定性的な関係を超えた)詳細な情報を診断に用いる手法に関する知識の獲得に対する支援が考えられる。

1)大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

2)高速増殖炉もんじゅ建設所プラント第一課

RESEARCH OF TECHNOLOGY FOR SUPPORTING OPERATORS IN PROFOUND UNDERSTANDING(1)

-Observations and Trial Formulation of Knowledge Dependency of Plant Operator Behavior-

Shinji Yoshikawa¹⁾, Kenji Ozawa¹⁾, Naoki Koyagoshi²⁾, and Toshihiro Odo²⁾

ABSTRACT

This paper presents a study on knowledge dependency of plant operator behavior. The ultimate purpose of this study is to establish a methodology to support human operators in forming an integral understanding (i.e., mental model) of target plants, and thus to enhance potential performance in unexpected situations and in non routine cognitive tasks. The authors conducted a series of experiments to acquire behavioral data of two plant anomalies not included in the training curriculum. A formulation methodology of operator protocols has been proposed from the observations of the acquired behavioral data. It has been concluded that engaged plant operators have sufficient knowledge about physical phenomena of the major components, and that possible improvements of operators' cognitive performance can be expected mainly by knowledge enhancement about utilization strategy of physical information.

1)Frontier Technology Section, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

2)Operations Engineering Section, MONJU Construction Office

目次

| | |
|----------------|----|
| 1. 緒言 | 1 |
| 2. 実験 | 3 |
| 3. 全体的な観測結果 | 6 |
| 4. 運転員発話内容の定式化 | 7 |
| 5. 示唆された仮説 | 9 |
| 6. 運転員診断能力の改善 | 11 |
| 7. 考察 | 11 |
| 8. 結論 | 13 |
| 9. 謝辞 | 13 |
| 10. 参考文献 | 13 |

1. 緒言

1. 1 研究の目的

現在、原子力プラントの運転に関わる安全性・信頼性は、運転員の系統立った教育・訓練と広範囲に渡って整合のとれた手順書によって維持されている。しかし、非常に複雑な事象がプラントに起こった場合での、膨大な情報の発生による運転員の過大な認知的負荷が生じる可能性を完全に否定することは今だに困難である。このような認知的過負荷は重要な意思決定の際に運転員を混乱させ、プラントの整定や回復における安全余裕を低減する可能性がある。

昨今、ヒューマンファクタの分析やシミュレーションに関する多くの研究が行われており、その多くは将来炉におけるマンマシンインターフェースの最適設計や運転班内の作業分担を目標としている^{[1],[2]}。これらの研究は制御室における人間-機械間の情報交換を合理化することにより上述のような運転員の認知的過負荷の発生を抑制できるものと考えられる。しかし、起こりうる全ての事象に有効であるような情報交換の合理化は容易では無い。なぜならそのような合理化は設計基準事象のみを仮定して行われるからである。また、信頼性や安全性の確保、向上は既存のプラントに対してもなされるべきである。プラントの構造、機器の機能や挙動、計装制御系内の信号の流れ等に関する系統立った知識は、運転員がプラントの状態変化を理解することを助けるので、認知的負荷を軽減できる。

筆者らは、運転員による、このような系統立った知識（以後本報ではメンタルモデルと称する）の形成を支援する技術開発のための研究計画に着手した。この研究の最終目的は、如何なるレベルの運転員に対しても、上述のような知識の獲得、修正、統合化を支援するような、オフラインで使用する計算機支援教育システムを構築することである。（図1参照）

このようなシステムの実現のためには4項目の技術課題が不可欠である。

(1) メンタルモデルの構造の同定

プロセスパラメータの正常値からの変位の伝播を定性的に表現した定性因果ネットワークモデルと、プラントの正常な運転に必

要な機能が、その下位のどのような機能に支えられているかを表現した機能階層モデルとが主なメンタルモデルとして関係研究者らに認められている。前述の目標達成のためには、この両者を結合させたものを土台とした、新たな知識の属性、例えば、時間遅れ、値の観測可能性、プラント状態に依存する特殊な因果関係等の追加の容易な柔軟なモデルを構築しなければならない。

(2) 理想化メンタルモデルの同定

ある状態のメンタルモデルに対して、どの方向にそれを育成するかを決定するためには、最終目標としてのメンタルモデル又はメンタルモデルの理想となる基準を定める必要がある。この際、運転員各自の生来の性格や経歴による個人差を許容するような柔軟性を持った定義をする必要がある。また、このメンタルモデルの理想状態は、実存する運転員が自らのメンタルモデルと比較して今後の知識向上に資することができる程度に現実的でなければならない。

(3) メンタルモデル獲得のための計算機による自動化インタビュー

任意の運転員に対して、プラントに対する理解状況（メンタルモデル）を自動的に測定するためのインタビュー手法を確立する必要がある。この分野では比較的単純な対象機器を想定した研究が行われており^[3]、人間とシステムの間での過大な質疑応答の回数が必要になる等の克服すべき問題点を解決すれば本研究に適用可能と考えられる。

(4) 新たな知識の教授／定着のための効果的な教示手法

教えるべき知識を直接文章や図で説明するよりも、その時点で問題となる現象等に関わるシミュレーションを進めたり、物理的で等価であるがよく知られた別の問題を考えさせたりする間接的な刺激の方が効果的な場合がある。このような、それぞれの知識の種類と効果的な教示法の関係を実験的な経験によって知識ベースに蓄えてシステムから参照することが妥当と思われる。

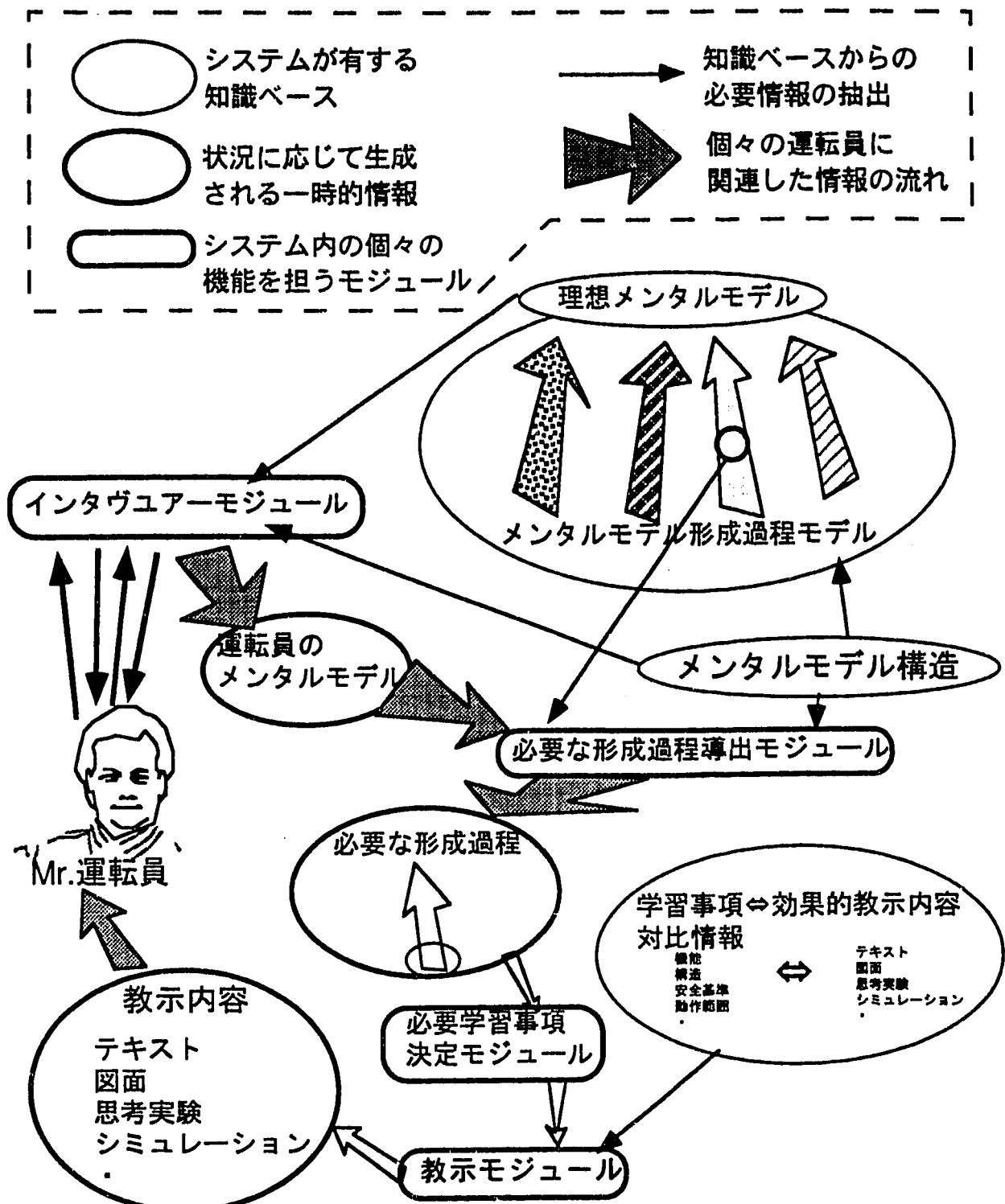


図1：メンタルモデル形成支援システムの機能構成図

2. 実験

この研究を効果的なものとするには、現状の運転員のメンタルモデルがどのようなものか、どのように形成されるかを観察することが不可欠である。最初に観察すべきことは、現状の運転員が知識をどのように活用しているかを観察することである。筆者らは以下に述べるような実験を行った。

2.1 実験施設

実験に使用した施設は、運転員が通常の訓練を行うために用いているフルスコーププラントシミュレータ及び模擬中央制御室である。これに、6台のテレビカメラ、3台のワイヤレスマイクロフォンを設置し、インストラクタ室で録音、録画する装置を仮設した。

2.2 実験に用いる異常事象の選択

意味のあるデータを取るためには、事象の診断に対する困難さを適度なものに設定する必要がある。過度に容易な事象では運転員による診断過程の差異が現われず、挙動のそれぞれがどのような知識に依存するかを考察する題材として適切なデータは得られない。また、過度に複雑な事象、例えば通常では到底想像し得ない3重、4重の故障の重ね合わせは本来の運転員の思考分析パターンを逸脱することから、その挙動の解析は意味のないものになる。筆者らは事象の困難さの適切さの条件として：

- ①教育訓練に現われる事象よりも診断しにくいものであること、
- ②教育訓練で与えられる知識、何らかの手段で入手できる情報、及び中央制御室で用いることのできる文書のみから一意的に結論できる事象であること、

の2項目を設定した。

これらを満たすように選択された事象は：

(1) 二重漏洩

一次主冷却系主循環ポンプの出口側配管からの漏洩と、同じループの中間熱交換器の伝熱管の漏洩が同時に発生する事象である(図2)。これは設計基準外事象であり、実際には起こりえない事象であるが、今回の実験のためにのみ設定した。また、今回の実験では、1次主冷却系からの漏洩量よりも、中間熱交換器を介した2次主冷却系から1次主冷却系への流入量が多く、2次主冷却系からのナトリウムの減少が診断に要する想定時間以内では如何なる警報も発生しないような設定を行った。これにより、運転員は1次主冷却系配管の漏洩という警報と、これに矛盾する1次オーバーフロータンクの液位上昇という情報によって混乱することが考えられる。

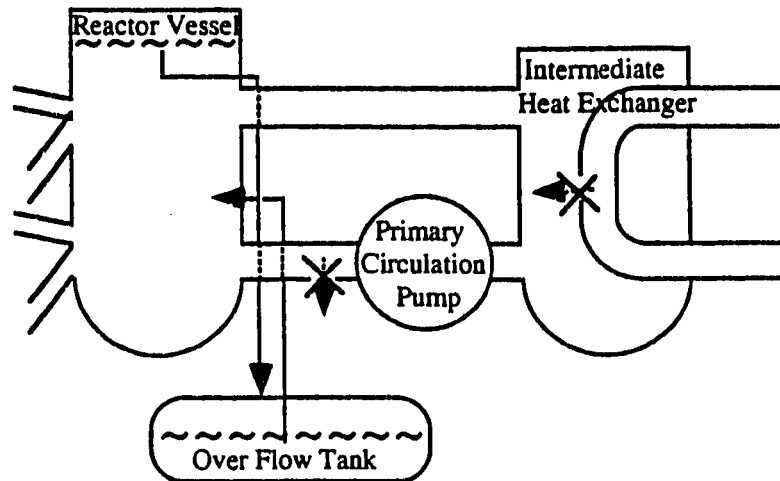


図 2：一次主冷却系配管と中間熱交換器伝熱管における二重漏洩事象

(2) 抽気逆止弁誤閉

復水器を経た水を、蒸気発生器へ供給する前に、加熱する給水加熱器の加熱源としてタービンから蒸気の一部を分岐させて用いているが、その蒸気配管の途中にある逆止弁が誤って閉じる事象である

(図 3)。この事象は比較的穏やかで発生後 6 分以上何らの警報も発生せず、顕著なプロセス変数の変位としては制御盤の中央上部に表示された発生電力の上昇のみである。これは最初の異常原因に直接は関係しない変数であり、これによって運転員がプラントの異常に気付いた時点では異常の影響は既に冷却系全般に行き渡っていて、各変数の変化の時間的前後関係から影響の伝播の方向を推定できないという意味でやはり診断の困難な事象である。

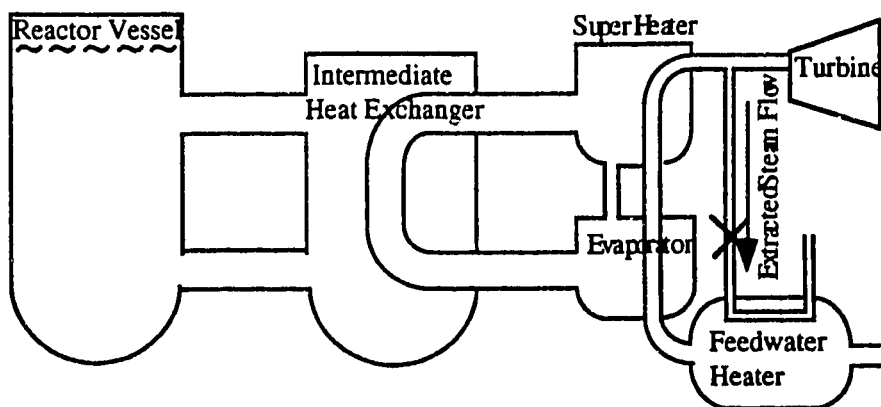


図 3：抽気逆止弁誤閉

3. 全体的な観測結果

今回の実験に参加した運転チームは両事象を妥当な時間内に診断した。

3.1 診断プロセス

3.1.1 二重漏洩

最初の情報は一次主冷却系ナトリウム漏洩警報である。運転員はまず漏洩検出器信号の妥当性確認を行う一方、一次オーバーフロータンク（OFT）、床下雰囲気温度、床上カバーガス圧を見る。ここで一次OFTの液位上昇という警報と矛盾する事実遭遇して警報で想起した最初の故障仮説を疑う。一次系へのナトリウム供給源として二次系を疑い、二次オーバーフロータンク液位降下を発見して、中間熱交換器伝熱管リークを結論する。これで最初の警報以外の全ての観測兆候が説明される状態となる。現場から報告された漏洩検出器信号の妥当性確認の結果によって二重漏洩を確認する。

3.1.2 抽気逆止弁誤閉

最初の原因候補は、制御盤中央上部に表示される電気出力異常から想起される原子炉制御系異常である。給水温度が低いことが観測されてから給水制御系が故障範囲として候補に挙げられるが、原子炉出力制御異常という警報が鳴るまで原子炉制御、一次、二次ナトリウム系の主要変数が監視される。制御棒位置が正常範囲にあることが確認されて最初の仮説は否定され、運転員は給水加熱器への蒸気供給ラインを現場で直接観測しなければ原因の絞り込みができないと判断して、給水ドレン弁から現場確認を始め、給水加熱系内の因果的推論によって最終結論である抽気逆止弁誤閉にたどり着く。

3.2 2事象間の主な差異

二重漏洩の場合には診断は3段階で行われる。即ち、一次OFTへの注意、IHX伝熱管漏洩の結論、1次主冷却系配管漏洩の結論、の3段階である。第1と第3の段階で用いられている知識には複雑なものは少ないが、中間の段階には1次-2次冷却系間の圧力差、漏洩検出法の感度等多様な知識が必要である。

抽気逆止弁誤閉の場合は、警報の内容は原因範囲の絞り込みには役

立たない。冷却系を見渡す際に、各系統の異常の判定にそれぞれどのパラメータに注意すべきかという知識が重要な役割を果たしているように思われる。この事象の方が、正解に至らない推論の枝が多くなっている。

4. 運転員発話内容の定式化

4.1 発話内容の分類

採取した発話内容は、その後の解析／調査のためにフォーマットを整えてデータ化しておくことと便利である。そのためには定式化の方法を考えなければならない。発話の大部分は<情報の操作>と<操作対象となる情報>の組み合わせで表現される。

<情報の操作>には、叙述、推定、「何」型の質問、「yes/no」型の質問、提案、があり、

<操作対象となる情報>には、プラント状態、プラント状態推移、因果関係、操作、観測性、評価、がある。

- ① プラント状態は、1個または2個以上のパラメータ値の集合で、パラメータ値は、<パラメータ名、定量値、定性値、定性時間微分値、時刻>からなる
- ② プラント状態推移は、一連のプラント状態からなる。
- ③ 因果関係は、
<原因となるプラント状態>と<結果となるプラント状態>の組である。
- ④ 操作は、
<強制するプラント状態>と<直接目的となるプラント状態>の組である。
- ⑤ 観測性は、
<パラメータ名、期待できる観測精度、観測場所、必要時間>からなる。
- ⑥ 評価は、
<プラント状態orプラント状態推移or操作、評価値>からなり、評価値は、プラント状態orプラント状態推移に対しては正常、異常、許容範囲内、or危険という値を、操作に対しては不必要、必要、

不可能、効果的or無意味という値をとる。

この分類法に対する理解を助けるため、

<情報の操作>と<操作対象となる情報>の組み合わせと、実際の発話内容の例との対比を表1に示す。なお、この表中の発話内容の例は、今回採取したデータから抽出したものには限らない。

表 1：運転員発話内容の分類表

| 操作 情報 | 叙述 | 質問(叙述で回答されるべきもの) | 質問(肯定/否定で回答できるもの) | 提案、推定、予測 |
|-----------|----------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| プラント状態 | 「この弁は開いている」 | 「炉容器出口温度を調べろ」 | 「その弁は閉じているか?」 | 「このタンクは閉じてるんだろう」 |
| 状態変化 | 「この温度は上限に達した後下がってきた」 | 「この流量はどうなるんだろう」 | 「この温度これから上がるのか?」 | 「出口温度は上がりそうだな」 |
| 因果関係 | 「出力上昇は炉心が冷えたせいだ」 | 「この液位は何故上昇するのか」 | 「この温度が上がったのは流量減ったから?」 | 「流量はバイパス弁閉じたから増えたんだろう」 |
| 操作 | 「弁を閉めます」 | 「どうすればこの温度下がるんだろう」 | 「予備ポンプ起動したの?」 | 「出力指令値下げたらどうかな」 |
| 観測性 | 「弁開度制御盤には出て無いよ」 | 「その液位どこ見れば分かる?」 | 「この流量1%下がったかどうかそこで分かる?」 | 「中制からこの弁の開度見えないんじゃないの」 |
| 状態又は操作の評価 | 「このポンプの回転数低すぎる」 | 「この弁開度正常値は何?」 | 「弁開いて良いのかな?」 | 「流量増やせば出口温度維持できる」 |

4.2 分類できない発話の例

ここに挙げる「例外的な」発話は、診断プロセスの重要な局面に対応することが多い。

- ・ 推論のための情報の必要性に関するもの
- ・ 情報源の信頼性に関するもの
- ・ 判断や操作の権限に関するもの

5. 示唆された仮説

5.1 プロセス変数の定量的な境界標に関する知識の重要性

プロセス変数の定量値に関する知識は2つの理由から重要である。一つは、制御盤上のアナログ計器による情報である程度異常範囲が絞られて中央監視盤に表示すべきパラメータが選ばれた後は、その変数値の正常性の判断は表示されたデジタル値と運転員の知識内の正常値との比較によって行われるからであり、もう一つは、6章に述べるように、運転員が変数間の簡単な演算を行うことにより、診断に関わる

確信度を大幅に高められる場合があるからである。

5.2 異常原因の並列的な探索

運転員は、診断の際に異常原因の想定範囲を安易に絞らないように訓練されている。

従って、彼等は異常の原因となっている可能性が特に高いと思われる数カ所を注視しつつ、他方では観測点をプラント全般に渡って絶えず代えながら監視を行っている。

5.3 因果ネットワークモデルの重要性

運転員が観測兆候から異常原因を導く際には、プロセス変数間の影響伝播関係からなるネットワークに沿った検索を行っている。その検索では、ある事象からその直接原因となりうる事象を次々と辿る遡行推論と、その逆にある事象からその直接の結果となる事象を辿っていく順行推論とを柔軟に組み合わせて用いている。そのアルゴリズムをそのまま正確に定式化することは困難である。

5.4 診断における2段階プロセス

第1段階では、運転員知識から生成された原因候補の観測兆候の部分集合による絞り込みが行われ、第2段階では、絞り込みに利用されなかった観測兆候による最終候補の検証が行われる。第2段階で、定性因果関係以外の知識がより多く用いられているように見受けられる。

5.5 知識の種類と異常診断のタスク

観測兆候の収集では直接的な変化伝播に関する知識が主要な地位を占める。原因が絞り込まれるに従って、制御機構や変数の観測値間の定量的な関係に関する知識が次第に重要となる。次に、意思決定の木を構成するための、知識の利用方法に関する知識が主な地位を占める。

5.6 仮説の有効性

今回の実験データのみからは如何なる仮説の検証も不可能である。データの拡充や解析手段の整備が必要である。このために行うべき実施項目については7章で述べる。

6. 運転員診断能力の改善

6.1 二重漏洩における想定可能な改善

二次OFT液位上昇でIHX伝熱管破損を結論した後、一次OFTと二次OFTの液位変化率をそれぞれの液位-容積曲線で比較して、一次漏洩検出器へのナトリウム付着確認結果を待たずに一次主冷却配管漏洩を結論できる。(今回の実験では、この曲線が使用可能であることは知らされていなかった)

6.2 想定された改善のために望まれる教示

このような改善は、運転員に思考実験による頭の中のシミュレーション能力を強化し、その結果に対する詳細で定量的な注意を喚起することで達成されると考えられる。また、観測情報に対するそのような詳細なチェックの手段に対する知識と探索意欲を強めることも重要である。定性的なネットワークはメンタルモデルの根幹をなすが、これが診断の鍵となる不等式の集合にまで拡張される必要がある。またプラント診断に対する戦略的な知識も教示されることが望ましい。

7. 考察

7.1 中間的な目標状態としての被験者運転員

これまでの考察は、今回の運転員をさらに向上させる対象とした視点からなされていたが、運転部署に配属されたばかりの運転員から見れば、今回の対象となった運転員は中間目標である。このようなメンタルモデル形成支援もまた重要で、以上の考察で述べたような高レベルの教育の基礎となるものである。今回の発話データには、各プロセス変数の観測可能性や、中央制御室で参照可能な文書についての会話が多数含まれている。これらは、因果ネットワークに直接関係し、しかも計算機上に構築された因果ネットワークモデルに容易に付加できると考えられる。また、メンタルモデルに戦略的知識を加える際に、因果ネットワークとの結合に重要な役割を果たすと考えられる。

7.2 仮説の検証に必要な課題

5章で述べたような仮説を検証するためには、今後様々な条件の下で運転員の挙動データを採取するとともに、現在までの教育訓練で得られた事例や、経験から想定される挙動も併せて分析の対象とする必要がある。また、仮説に基づいた挙動の評価や、運転員の知識に関する様々な仮定による挙動の導出のための解析ツールの整備を行う必要がある。

7.2.1 データの活用

今回の実験で得られた運転員挙動データは、実験の条件作りとして、プラント状態が特殊であり、それによって得られるデータは、ある目的のために必要な部分を抽出して用いるべきであり、全てのデータが何の制限もなく公開されることは、望ましくない。また、通常の訓練は、実際にヒューマンエラーを起こさないように、シミュレータを用いて行っているのもあって、当然、訓練中におけるある程度のエラーは含まれる。しかし、これは、教育中であり知識レベルを上げている過程であり、一般的な運転員データとは言い難い。このようなデータを活用するためには、具体的な機器名の削除、変数値の正規化、精度、重要性、時間等の相対値のみの抽出などが考えられる。また、色々な論文に見られるように、仮説の根拠としては診断／操作プロセスの概要だけで十分な場合もある。診断／操作プロセス全体を個々のタスクに分解して利用することも考えられる。これらの方法が有効な場合でも、情報の取扱いに関する取り決めを文書化して遵守する必要があるだろう。また、このような活用方法が過剰な情報公開にならないことを、人為的に作成したデータを使って十分な数の試験で立証する必要があるだろう。

7.2.2 解析ツール

このような研究は本来分析の対象となりにくい性質を有するので、運転員の育成に重要な視点や、挙動の評価の尺度を現時点で明らかにすることは不可能である。このような視点や尺度は長期間にわたるデータ採取や考察を通じて徐々に明らかになる。従って本研究に用いる解析ツールは、新たな視点や尺度を随時取り込める柔軟性と見通しの良さを備えている必要がある。

7.2.3 発話の定式化の重要性

上の2つの手段のいずれに対しても、本論文で述べた発話の定式化手法が重要な役割を果たすと考えられる。現段階で取り込めない種類の発話も含むような定式化の拡充を行う必要がある。

8. 結論

原子力プラントの診断や操作に必要な知識の形成に関して運転員を支援する技術の研究計画を開始した。詳細な検討に先だって、現状の運転員がプラントの異常診断に際して自らの知識をどのように活用しているかを把握するために、未経験事象を対象にシミュレーション実験を行って挙動データを採取した。この結果得られた会話データの観察に基づいて会話内容を定式化する手法を提案し、運転員の挙動の知識への依存性に関する仮説を導いた。データの活用法と運転員挙動の解析ツールの開発が今後の研究のために必要である。

9. 謝辞

本報告書の作成にあたり、東京大学工学部システム量子工学科博士課程に在籍中の古濱寛氏から有用なコメントを頂いたことをここに感謝する。また、実験機器の準備に関して多大な労力を割いて頂いた高速増殖炉もんじゅ建設事プラント第一課教育訓練グループの奥出利行、川西伴岳の両氏にも心からの謝意を表する。

10. 参考文献

1. Ujita, H., Human Characteristics of Plant Operation and Man-machine Interface, Reliability Engineering and System Safety, 119 (1992).
2. Itoh, J., et al., An Ecological Interface for Supervisory Control of BWR Nuclear Power Plants, Control Engineering Practice, Vol.3, No.2, 231 (1995).
3. Tokumori, T., et al., Dialogue Strategies for Student Model Interface, Proc. 4th Conf. JSAI, 679 (1990).
4. Ujita, H., et al., An Experimental Analysis of Plant Operator Cognitive Process in Emergency Situation, Human Engineering, Vol. 29, No. 4 (1993).