マルチレベルフローモデリングの概念を用いた 運転員メンタルモデルの提案[†]

吉 村 誠 一*・高 野 研 一*・佐 相 邦 英*

Proposal for Operator's Mental Model Using the Concept of Multilevel Flow Modeling

Seiichi YOSHIMURA*, Kenichi TAKANO* and Kunihide SASOU*

It is necessary to analyze an operator's thinking process and a operator team's intension forming process for preventing human errors in a highly advanced huge system like a nuclear power plant. Central Research Institute of Electric Power Industry is promoting a research project to establish human error prevention countermeasures by modeling the thinking and intension forming process.

The important is the future prediction and the cause identification when abnormal situations occur in a nuclear power plant. The concept of Multilevel Flow Modeling (MFM) seems to be effective as an operator's mental model which performs the future prediction and the cause identification. MFM is a concept which qualitatively describes the plant functions by energy and mass flows and also describes the plant status by breaking down the targets in a hierarchical manner which a plant should achieve.

In this paper, an operator's mental model using the concept of MFM was proposed and a nuclear power plant diagnosis support system using MFM was developed. The system evaluation test by personnel who have operational experience in nuclear power plants revealed that MFM was superior in the future prediction and the cause identification to a traditional nuclear power plant status display system which used mimics and trends. MFM proved to be useful as an operator's mental model by the test.

Key Words : human modeling, mental model, human error, nuclear power plant, multilevel flow modeling

1. はじめに

原子力プラントや航空機などの大規模システムは、機器の数が多く、また、それらの運用(運転、保守)には多くの人が関わっている。したがって、これらシステムの事故防止対策を考えたとき、機器の信頼性のみならず、ヒューマンファクター上の問題も考慮する必要がある。更に、計算機利用技術の進歩により大規模システムの運用環境は急速な変化を遂げており、これがヒューマンファクター問題に少なからぬ影響を与えている。

たとえば、原子力プラントでは、運転支援システムの導入などにより、運転員の数が減少し、運転員の果たす役割が操作から監視へと変化しつつある。このような傾向は今後益々増大し、かかる状況下でのヒューマンエラーもスリップ(操作実行時のエラー)から、ミステイク(意図形成時のエラー)へと質的に変化することが予想される。したがって、原子力プラントの安全性を将来的にも確保していくためには、このような環境下におけるヒューマンエラーの形態変化を予測し、その防止対策を事前に検討することが有効である。

そのため、(財)電力中央研究所・ヒューマンファクター研究センターでは、複雑高度化した原子力プラントの中央制御室におけるヒューマンエラーの発生過程を解明し、その防止対策の立案に資するため、個々の運転員の思考過程や複数の運転員から構成される運転チームの意思形成過程をモデル化する研究(前者はオペレータ行動モデル、後者は運転チーム行動モデルと呼ばれる)を行っ

[†] 第1回ヒューマン・インタフェースシンポジウムで一部発表(1985・10)

* (財)電力中央研究所ヒューマンファクター研究センター
柏江市岩戸北2-11-1

* Human Factors Research Center, Central Research
Institute of Electric Power Industry, Komae
(Received January 12, 1994)
(Revised May 9, 1994)

ている^{1),2)}。

異常事態における運転員の振る舞いを考えたとき重要なのは、事態の将来予測と異常原因の同定であろう。この二つの認知的振る舞いが妥当であれば、事態を安全な方向に導くことが可能である。たとえば、将来予測ができればそうならないような対策を取ることができるし、原因を同定できれば異常の根源を取り除くことができる。運転員の思考過程のモデル化に際し、このような将来予測と原因同定に関する運転員のメンタルモデル生成の基本フレームとしてマルチレベルフローモデリング(MFM)の考え方が有効と思われる。

MFMは、デンマークのリソ国立研究所が提案した認知心理学に基づくプラントの状態表示・診断手法³⁾である。この手法は「シンボル表示されたエネルギーと質量の流れによりプラントの機能を定性的に記述するもの」であり、プラント診断支援システムなどの設計者の立場からみると、プラント状態の直観的な理解が容易と考えられる。また、放射性物質に対する安全性といったプラントの目標を順次ブレイクダウンし、階層構造化することにより、運転員の思考過程に沿った将来予測、原因同定も容易と考えられる^{4),5)}。

このような目標指向型の問題解決の原型はニューウェルとサイモンの考えにみることができる。すなわち、彼らは「われわれがプランを展開するとき、初期状態と目標を心にもっており、われわれの課題は初期状態から目標に至るまでの操作系列を考えだすことである」と述べている⁶⁾。

人間の思考過程をモデル化する研究は、従来から心理学的側面^{7)~9)}、工学的側面^{10)~12)}ならびに生理学的側面¹³⁾から活発に行われている。運転員のヒューマンエラーは、今後、ミスタイプが多くなると予想されるが、このとき重要なのは、外部情報に基づき生成するメンタルモデルであろう。心理学的あるいは生理学的モデルには一部、メンタルモデルを含むものもある(文献8))が、あくまでも概念としての箱が存在するだけである¹⁴⁾。また、工学的モデルは基本的にエキスパートシステムであり、メンタルモデルという概念そのものが希薄である。

運転チームの意思形成過程のモデル化(運転チーム行動モデル)は別報に譲り、本論文では、1人の運転員の思考過程のモデル化(オペレータ行動モデル)、この中でも特に、新しく提案したメンタルモデルの概念とその基本フレームとしてのMFMの有効性評価実験の結果について述べる。

2. 思考過程のモデル化

2.1 オペレータ行動モデル

原子力プラントにおいて、運転員は役割分担(当直長、原子炉運転員、タービン運転員など)に応じて情報を処理し、行動する。たとえば、当直長は各種の情報を入手・処理することによりチーム全体の動きを統括し、チームとしての意思を取りまとめる。原子炉運転員/タービン運転員はそれぞれ原子炉側/タービン側の情報を入手・処理し、当直長に事実関係の報告や意見の具申を行う。このような運転チームの意思形成に至るまでの振る舞いをシミュレーションするのが運転チーム行動モデルである。

Fig. 1に同モデルの概念図を示す。ここでHHIモデルとは運転チームのコミュニケーションを司る部分で、運転員間の意見の調整や役割分担に応じた情報の割り振りなどを決める。ここで、運転チーム行動モデルの中のオペレータ行動モデルについて簡単に紹介する。

人間の思考モデルは、主に脳における情報処理という観点から検討されている(文献7)~9)、13))。これらモデルの基本的な情報処理の流れは、情報の取り込み→判断→行動であろう。このとき、判断に際して記憶を活用す

Fig. 1 Operator team behavior model

Fig. 2 Operator behavior model

る。詳細は各モデルで違うが、たとえば、Wickens のモデル(文献9))では、注意の資源が各部の振る舞いに影響を与える。また、記憶として作業記憶と長期記憶を仮定する。橋本の場合(文献13))は、基本的考えは同じであるが、これに感覚中枢、運動中枢、大脳皮質などを取り入れた大脳生理学的なモデルとなっている。

本論文では、上に述べた基本的な情報処理の流れや記憶の考え方を踏襲し、オペレータ行動モデルを Fig. 2 のように考える。すなわち、モデルは注意力、思考、動作、発話の四つのマイクロモデルと短期記憶、中期記憶、長期記憶で構成される。各マイクロモデル、記憶の機能をここではおおむね以下のように定義する。

注意力マイクロモデルは MMI モデル(制御盤)あるいは HHI モデル(会話)を経由してオペレータに入力される情報に対するフィルタとして働く。どの程度のフィルタとして働くかは MMI 情報の注意喚起度(メータなどの目立ちやすさ)、視野の種類(中心視野か周辺視野か)、運転員のストレスなどに依存する。

思考マイクロモデルは注意力マイクロモデルから獲得した情報と中期記憶から取り込んだ情報(事象の展開予想や原因など、これをメンタルモデルと呼ぶ)を基に、現在何が起っているか(全く新しい情報なのか、既存情報と関連した情報なのか)を理解する。つぎに行動目標(当面の対応か/緊急対応か/原因同定かなど)を設定し、それぞれに応じた対応策を決定する。

動作マイクロモデルは思考マイクロモデルで形成された動作意図(たとえば、緊急対応を行うため、ある操作具を操作するなど)の実行や反射的な動作(警報が鳴ったら見るなど)を行う。

発話マイクロモデルは思考マイクロモデルで形成された発話意図(たとえば、警報の内容を確認して欲しいなど)の実行や反射的な発話(確認要求に対する返事など)を行う。

短期記憶は注意力マイクロモデルを通過してきた情報を一時的に蓄えるバッファとして働く。これは、MMI 情報や HHI 情報を受け取ったことを記録したり、短時間

に多くの警報が鳴る場合の取りこぼしを表現するために設けた。

中期記憶は適宜更新される記憶である。思考マイクロモデルに新しい情報が入ってくると、長期記憶から関係知識を中期記憶にコピーする。これがメンタルモデルである。新しい情報とメンタルモデルを基に思考マイクロモデルが推論する。その結果は順次中期記憶に書き込まれ、メンタルモデルが更新される。

長期記憶には各種の知識(プラントの構造や挙動、用語、今までの運転経験など)が長時間保存される。これらの知識は必要に応じてその一部が中期記憶にコピーされ、活用される。

このように、本論文では思考マイクロモデルでの問題解決のために長期記憶の中から中期記憶にコピーされた知識をメンタルモデルと呼ぶことにする。

2.2 運転員のメンタルモデル

異常事態発生時に運転員が何を考えて対応操作するか正確に知ることは難しい。しかし、TADEM(Team Activity Description Method)と呼ばれるチーム行動分析¹⁰⁾やインタビューなどを行えば、その傍証を得ることはできる。

Fig. 3 はフルスコープシミュレータによる給水管破断事象に対応した運転チーム(4名)の、TADEM 分析から得られた「警報と運転員が注目する状態量」の関係である。床警報が出ると運転員はホットウエル水位に注目する。更に水位が下がってホットウエル水位低警報が出て、引き続きホットウエル水位に注目している。ホットウエル水位が低低になるとインターロックで復水/給水ポンプトリップが発生する。この時点で運転員の注目する状態量は原子炉水位に移る。原子炉水位 L-4/L-3 警報でも引き続き原子炉水位に注目し、この場合は、最終的に原子炉水位 L-2 警報で対応操作を終了した。

この事象に対応した運転員へのインタビュー結果を集約すると、「床警報が出た時点で、この場合の最悪の事態である原子炉水位 L-2 までをおおむね予測し、そうならないような対応操作を順次行ったが、結果として水位を回復できなかった」であった。

以上の結果を要約すると、運転員は「警報が出る少なくとも一つの状態量に注目し、警報レベルでのプラント状態の悪化を防ぐような対応操作を行う」ものと思われる。このような運転員の思考過程は、後に述べる MFM の考え方、特に、階層構造に由来するプラント状態の将来予測に類似している。

そこで、MFM とのアナロジーで運転員のメンタルモデルを Fig. 4 のように仮定する。すな

Fig. 3 Relation between alarm and parameter noticed derived from TADEM analysis

わち、警報レベルのイベント(Event 1)が発生したとすると、運転員は自分の長期記憶から呼び出したメンタルモデルに基づき何も対応操作をしなければ、事象はどのように進展して行くだろうか(Event 2, Event 3)あるいはその原因は何か(Cause 1 or Cause 2), と考えることにする。ここで、Event 1 に関連する状態量は一般に複数(Fig.4 では三つ)あり、この内で最も関連の強いもの(重要なもの)を主要状態量と名付け、運転員はこれを監視する。このようなイベントと関連状態量との関係あるいはどの関連状態量を主要状態量とするかは長期記憶の中の知識にもたせる。

主要状態量は時々刻々変化し、放っておくとある値 b でインターロックが働き、つぎのイベント(Event 2)が発生する。以下同様のメカニズムでメンタルモデル上で順次イベントの発生を繰り返す。マイルストーンは主要状態量の値が $a(a < b)$ の所に設定するもので、運転員はその手前で主要状態量が a にならないような対応操作を行う。この知識も長期記憶にもたせる。対応操作が実行され、主要状態量の変動が収束すれば、Event 2 以降のメンタルモデルはキャンセルされる。対応操作を実行しても主要状態量の変動が収束しない場合は主要状態量を変更し、その主要状態量についての新たなメンタルモデル(マイルストーン、イベント)を生成する。なお、長期記憶の中にマイルストーンの設定値や対応操作に関する知識がない場合、対応操作は実行されず、Event 2 が発生する。

事象が進展し、メンタルモデルが推移した段階(たとえば Event 3)でも運転員は常に過去のイベント(Event 2, Event 1)あるいは原因(Cause 1 or Cause 2)を振り返ることができる。

なお、最初の警報(Event 1)が発生したとき、考えられる対応として当面の対応(Event 1 に付属する対応で、Event 1 が発生したときにこれを緩和するための手順書

レベルの対応)、緊急対応(マイルストーンに付属する対応で、主要状態量がマイルストーンにならないような対応)、原因同定(Event 1 に付属する対応で、原因を絞り込むための対応)の三つを仮定している。この中のどれを行うかは思考マイクロモデルが決定する。

このようなメンタルモデルの基本フレームである MFM の有効性を評価するための実験を行った。次章にその内容を紹介する。

3. マルチレベルフローモデリング

3.1 マルチレベルフローモデリングの基本概念

MFM では、プラントの果たすべき役割を目標として設定し、その目標を達成するための条件を順次ブレイクダウンすることにより目標構造を表現する。Fig. 5 はこのような MFM の基本的な考えを示している。ここで、MFM には Table 1 に示すようないくつかの標記上の約束がある。たとえば、四角は質量あるいはエネルギーの発生源/吸収先を表わし、菱形は質量あるいはエネルギーの輸送を表わす、などである。

Fig. 5 のレベル 1 は、エネルギーの発生という目標を表わしている。ここで、燃料棒から熱が適切に発生し、それがジェットポンプにより原子炉に適切に運ばればこの目標は達成される。熱の発生機能やその輸送機能を達成するための条件は再循環流量であり、その内容がレベル 2 に記述される。すなわち、原子炉を経由して冷却材が適切に流れることがこのレベルの目標となる。冷却材の輸送機能の条件は再循環ポンプの回転であり、その内容は更にその下のレベルに記述される。このように、MFM ではプラントの機能をシンボル表示し、その達成条件を順次階層的に記述する。

このような表示方法を用いれば、プラントのどのレベルのどこにトラブルが発生したか、直観的に理解することが可能である。たとえば、目標の色が変わることが目標の未達成を表わし、機能に×印がつくことが機能喪失を表わすものとする。このような前提で、Fig. 5 のレベル 1 全体の色が変り、ジェットポンプに×印がつけば、レベル 1 のエネルギーを発生するという目標が達成されておらず、その原因はジェットポンプのエネルギー輸送機能が喪失したためである、ということが容易にわかる。この目標が達成できなくなった状態をメンタルモデルでいう警報レベルのイベントと考える。

Fig. 4 Concept of operator's mental model

Fig. 5 Principle of multilevel

Table 1 Meaning of symbols

Symbol	Function	Meaning
Source/Sink	The symbol acts as a source/sink of mass or energy.
Transporter	The symbol acts as a transporter of mass or energy.
Accumulator	The symbol acts as a buffer or accumulator of mass or energy.
Barrier	The symbol acts as a barrier against mass or energy.
Condition	The symbol acts as a condition on which a function is maintained.

3.2 マルチレベルフローモデリングを用いた原子力プラント診断支援システム

MFM の考え方をういて原子力プラント(沸騰型原子炉: BWR)の診断支援システムを試作した。Fig. 6 にこのシステムの全体構成を示す。

原子力プラントの目標は「放射性物質に対する安全性(A)」を保ちつつ「発電(B)」を行うことである。本システムは、この二つの目標を達成するための条件を順次ブレイクダウンすることにより構築した。たとえば「放射性物質に対する安全性」を達成するための条件は「エネルギーの発生」と「エネルギーの輸送」を同時に満たすことである。すなわち、エネルギーが適切に発生し、それがタービン側に適切に輸送されるならば「放射性物質に対する安全性」という目標は達成される。更に、「エネルギーの発生」を達成するための条件は「制御棒位置」、「給水温度の維持」ならびに「再循環流量の維持」を同時に満たすことである。すなわち、制御棒位置が適切に保持され、給水温度、再循環流量が適切に維持されるならば、「エネルギーの発生」という目標は達成される。このように、目標は順次ブレイクダウンされる。本診断支援システムの場合は五つのレベル、20 の目標でシステムを構成した。

一例として、A の内容を Fig. 7 に示す。本システムの CRT は一台であり、運転員が任意に選択した一つの目標がこの CRT 画面に表示される。画面 A では「放射性物質に対する安全性」を監視する。監視状態量はこの場合、主蒸気管、ドライウェル、原子炉建屋内の放射線量であり、右上に現在値で表示されている。数値は現在値で表示する場合とトレンドで履歴を含めて表示する場合がある。

放射性物質は燃料棒の中で発生し、通常は燃料棒の被覆管、原子炉压力容器、各種配管などで防護され、格納容器や原子炉建屋に放出されることはない。被覆管の防護機能は APRM(原子炉平均出力)や MCPR(最小限界出力比)と呼ばれる状態量により条件付けられている。すなわち、これらの値が適切に維持されていれば被覆管の防護機能は保たれる。これらの状態量は画面 C に表示される。一方、原子炉压力容器や各種配管の防護機能は原子炉圧力や主蒸気流量により条件付けられている。すなわち、これらの値が適切に維持されていれば原子炉压力容器や各種配管の防護機能は保たれる。これらの状態量は画面 D に表示される。

なお、画面 A 左の階層構造は、どの画面を監視していてもどこに異常が発生したか運転員に知らせるため、各画面に設けた。また、Lind³⁾ のオリジナル版にはないが、シンボルの内部にはその内容が一目でわかるように簡単

Fig. 6 Nuclear power plant diagnosis support system using MFM

A: Safety Against Radioactive Substance

Radioactive Substance Release

Main Steam Pipe	$0.12 \times 10^{-11} \text{ A}$
Drywell	$1.10 \times 10^{-10} \text{ A}$
Reactor Building	$1.55 \text{ mC/kg} \cdot \text{h}$

Fig. 7 Safety against radioactive substance release

な絵を入れた。

本診断支援システムは事態の将来予測と異常原因の同定に利用できると考えられるが、利用方法はおおむね以下のよう推定される。

(1) 将来予測

プラントに異常が発生すると、階層構造の関係部分の色が白から赤に変化する。たとえば、Qの再循環ポンプの潤滑油流量が低下したとすると、監視している画面の階層構造中のQの色が赤に変化し、運転員に異常を知らせる。これを受けて運転員は、再循環ポンプの潤滑油流量が維持できなくなったことを知る。つぎに、事態が更に悪化すると再循環ポンプが止まる可能性があると考え、そうならないような対応操作を行う。操作がうまくいくと事態の悪化は避けられ、原因同定を行う。しかし、対応操作が適切でない場合は再循環ポンプが止まり、Nが赤に変化する。もし、総ての操作が適切に行われなかった場合、事態は $Q \Rightarrow N \Rightarrow H \Rightarrow C$ の順に進展し、ついにはプラントの安全上の最終目標Aが脅かされることにな

る。

(2) 原因同定

基本的にMFMでは機器レベルの原因同定を行わない。すなわち、ある目標のある機能が喪失した所までを表示し(原因の絞り込みを行い)、その先は運転員の判断に任せる。たとえば、上の例で、油ポンプの輸送機能が喪失したことにより目標Qが達成できなくなったとすると、本システムでは輸送機能に×印を付ける。

もし、運転員が目標Hが達成できなくなった時点で異常に気づいたとすると、その達成条件であるN、Qを順次調べてQの油ポンプの輸送機能喪失発見に行き着くことになる。

4. 有効性評価実験

4.1 異常事象の作成

MFMを用いた原子力プラント診断支援システムは異常時における運転員のプラント診断を支援するためのものである。本システムの有効性は原子力プラントの運転

経験者が評価するため、実際のプラント挙動に近い異常事象を作成する必要がある。そこで、米国の電力研究所(EPRI)が開発し、世界で高い使用実績を有する過渡解析コード、RETRANを用いた^{16),17)}。

異常事象を作成するに当たり、以下の点に留意した。

- (1) 階層構造の特徴が明確になるよう、進展が比較的遅い事象を選ぶこと。
- (2) ベテランの運転経験者が評価するため、診断が難しい事象を選ぶこと。

以上を考慮して「給水加熱喪失」、「給水制御系故障」の二つの異常事象を作成した。

「給水加熱喪失」は、給水温度(給水エンタルピー)が低下することにより炉心に正の反応度が加わり、原子炉出力が徐々に増加する異常事象である。一方、「給水制御系故障」は、原子炉水位センサに誤信号(原子炉水位低下)が入ることにより、給水流量が急激に増加し、これに伴い原子炉水位も増加する異常事象である。

4.2 実験方法

上記二つの異常事象は大型計算機(FACOM-M 200)を用いて作成した。これをいったん、小型計算機(HP-1000)のディスクに格納した後、フロッピーディスクを介してパーソナル計算機のハードディスクに格納し、事象を再現した。

MFМを用いた原子力プラント診断支援システムならびにこれと比較するための従来型の原子力プラント状態表示システム(プラントの系統全体あるいは個々の系統

の各種状態量をミミック、トレンド、棒グラフなどで表示するシステム、Fig. 8 参照)は上記パーソナル計算機上にBASICを用いて構築した。

実験には、電力中央研究所・原子力情報センターから3名の運転当直長経験者を含む5名の運転経験者が参加した。MFМは新しい概念であるので、プラント診断の前にMFМ解説システムを用いて各人に「MFМとは何か」を一様に解説した。プラント診断は二つの異常事象を二つのシステムで実際に診断することにより行った。有効性評価は、①診断(将来予測、原因同定)への支援、②プラントの状態認識の容易さ(質量やエネルギーの流れによる機能表現、機能に×印を付けることによるプラント状態の直観的な理解)、③絵、トレンドグラフの診断・状態認識に対する貢献度の三つの観点について、アンケートを用いて全くだめ(−2)から非常に優れている(2)までの5段階で行った。また、MFМの特徴である上記①、②について、従来型を基準として、MFМがそれより劣っているか、優れているか、で評価した。なお、②の中の機能表現については、これと裏腹な「系統に則した理解」という観点から評価した。

4.3 実験結果ならびに考察

MFМを用いた原子力プラント診断支援システムに対する評価結果をFig. 9に示す。ここで、評価は5段階の単純平均に加え、アンケートに「全く、まあまあ、非常に」などの表現を使用したので、このような表現のスケールリングに使用される嗜好尺度¹⁸⁾を併用した。嗜好尺度は「まるでなっていない(−97.0)からとてつもなく(100.0)」までの言葉上の距離感覚を50の段階で表現したものである。

診断への支援は平均0.6(嗜好尺度で35.3(良いに相当))の評価を得た。将来予測、原因同定は表裏一体の関係にあるので、共に同じ評価であった。予測と同定はMFМの階層構造に由来する特徴であるが、充分評価されたものと考えられる。状態認識の容易さの評価は低く、平均−0.3(嗜好尺度で−11.8(良くはないに相当))であった。これらをまとめると、「将来予測、原因同定は容易であるが、状態認識は難しい」ということになる。これは、画面左の目標構造(目標とそのつながり)はよくわかるが、目標の内容(機能表現した画面)はよくわからないことを示している。状態認識の中でも、特に、機能表現に対する評価が低かったのは、発生や輸送などといった機能の概念と現実のプラント(機器や系統)の役割との対応づけが難しいためと思われる。

たとえば、被覆管は画面Aでは放射性物質に対する防護機能であるが、プラントを実際に運転する者の感覚としては被覆管まで意識が及ぶことは少ないであろうし、

(a) Reactor/Turbine System Mimic Diagram

(b) Reactor System Bar Graphs

Fig. 8 Traditional nuclear power plant status display system

Item	Evaluation	-2	-1	0	1	2	Mean	Hedonic Scale
		(Quite Poor)		(Moderate)		(Very Good)		
Support for Decision Making							0.6	35.3 (Good)
(1) Future Prediction				ACE	B	D	0.6	35.3 (Good)
(2) Cause Identification				ACE	B	D	0.6	35.3 (Good)
Easiness for Situation Recognition							-0.3	-11.8 (NO Good)
(1) Function Representation by Mass and Energy Flow			ABCE	D			-0.8	-36.2 (Poor)
(2) Intuitive Comprehension			E	BC	AD		0.2	12.5 (Somewhat Good)
Contribution to Comprehension of Pictures and Trend Graphs							1.2	50.7 (Relatively Good)
(1) Pictures			B		ACDE		0.6	22.2 (Slightly Good)
(2) Trend Graphs					C	ABDE	1.8	79.2 (Very Good)

A-E denotes the participants.

Fig. 9 Evaluation results of MFM plant diagnosis support system

Table 2 Comparison of MFM with the traditional

Item	Evaluation	Much Less	Less	Equal	More	Much More
(1) Future Prediction			1	1	1	2
(2) Cause Identification			1	1	1	2
(3) Comprehension according to P & ID*		1	2	2		
(4) Intuitive Comprehension		1		1	3	

Numerics denote the number of participants.

*Pipe & Instrument Diagram

せいぜい燃料棒の入れもの、ぐらいの認識であろう。また、画面 C (Fig.5 のレベル 1 とほぼ同じ) では、ジェットポンプがエネルギーの輸送機能として働くが、運転員の感覚としてはジェットポンプは原子炉に蓄えられるエネルギー (原子炉出力) の制御器であろう。絵やトレンドグラフの診断・状態認識に対する貢献度で、トレンドグラフの役割が高く評価されたのは、機能表現とは逆に、これがプラントの機器や系統と 1 対 1 に対応し、理解しやすいためと思われる。

MFM 表示と従来型表示の比較を Table 2 に示す。やはり MFM がもつプラント状態の将来予測や原因同定の優秀さが示された。MFM はいくつかのシンボルによりプラントの機能の状態を表現する。この MFM 表現は、質量やエネルギーの収支だけを問題とするため、系統における実際の蒸気や水などの流れとは必ずしも一致しない。たとえば、画面 A は事故時における放射性物質の流れを示すが、現実のプラントにこのような系統がある訳ではない。MFM 表示の系統に則した理解の評価が

低かったのは、このような理由によるものと思われる。

「給水加熱喪失」を例にとると、適切な対応操作をとらなければ MFM 階層構造の中で、事態は $M \Rightarrow G \Rightarrow C$ の順に進展する。運転員のメンタルモデルとの対応でいうと、M, G, C はそれぞれが警報レベルのイベントである。すなわち、イベント M が発生するのは抽気流量 (2) がある設定値を下回るときであり、G が発生するのは給水温度がある値以下になるときである。また、C が発生するのは APRM がある値以上になるときである。ここで、M が発生したとき、ある運転員は $M \Rightarrow G \Rightarrow C$ を予測し、ある運転員は $M \Rightarrow G$ を予測するだろう。どこまで予測するか、また、主要状態量としてどのパラメータに着目するかはその運転員の知識 (長期記憶) に依存するものと思われる。

原子力プラント (RETRAN) はシミュレータではなく、オフラインの事象ジェネレータであるので、各イベントが発生した段階で運転員が具体的操作を行うことはなかった。しかし、アンケート調査の結果からプラント

の運転経験者から見た MFM の特徴—すなわち、MFM は従来型よりもプラント状態の将来予測や原因同定に優れており、運転員の思考過程に沿った診断が可能—が明確になったものと考えている。

5. おわりに

オペレータ行動モデルのプラント診断に際してのメンタルモデルとして MFM の利用を提案した。MFM はシステム設計者からみると以下のような特徴をもつ。

- (1) 階層構造は下位の「潤滑油流量の維持」といった具体的な目標から、上位に向かうに従い「放射性物質に対する安全性」といった抽象的な目標に移っていく。
 - (2) 目標を上向きに辿れば、事態の将来予測が可能である。
 - (3) 逆に目標を支える条件を下向きに辿れば、機能レベルでの原因同定が可能である。
- 原子力プラント診断支援システムを構築することにより、プラントの運転経験者の立場からみた MFM の有効性を評価した。主な評価結果は以下のとおりである。
- (4) MFM 表示は従来型表示と比べてもプラント状態の将来予測や原因同定に優れている。
 - (5) シンボルによるプラント機能表示は、現実のプラントの機器や系統との対応づけが難しい。

以上の結果から、MFM を診断支援システムとして活用する場合は機能表示上の問題はあがあるが、将来予測や原因同定を行うためのメンタルモデルの基本フレームとしては充分利用可能なことが判明した。

今後このようなメンタルモデルを使って問題解決を図るオペレータ行動モデルならびにオペレータ行動モデルから構成される運転チーム行動モデルの開発を進める。これらについては順次別報で紹介したい。

参考文献

- 1) 高野, ほか: 運転チーム行動モデルの全体構成とオペレータ行動モデル, 電力中研研究報告, S 92001 (1993)
- 2) 吉村, ほか: 運転チーム行動モデルの開発(その 1), 日本原子力学会秋の大会予稿集, F 6 (1993)
- 3) M. Lind: Multilevel Flow Modelling of Process Plant for Diagnosis and Control, Riso-M-2357 (1982)
- 4) S. Yoshimura, et al.: Man-Machine Interface Design Using Multilevel Flow Modelling, OECD Halden Reactor Project HWR-96 (1983)
- 5) 吉村, ほか: マルチレベルフローモデリングを適用した原子力プラント診断支援システムの開発, 第 1 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム, 2231, 307/312 (1985)
- 6) P. N. Johnson-Laird: The Computer and the Mind, William Collins Sons & Co. Ltd. (1988) / 海保博之他訳: 心のシミュレーション, 新曜社, 158/167 (1989)
- 7) D. A. Norman: Human Cognition, NUREG/CR-3114, 92/106 (1982)

- 8) S. Baron, et al.: A Frame Work for Modeling Supervisory Control Behavior of Operators of Nuclear Power Plants, NUREG/CR-3114, 36/51 (1982)
- 9) C. D. Wickens: Engineering Psychology and Human Performance, Columbus, OH, Charles Merrill (1984)
- 10) D. D. Woods, et al.: Cognitive Environment Simulation: An Artificial Intelligence System for Human Performance Assessment, NUREG/CR-4862 (1987)
- 11) P. C. Cacciabue: COSIMO, A Cognitive Model in Blackboard Architecture: Symposium of AI and Psychology, Reliability Engineering & System Safety, Special Issue on Cognitive Science Approaches to Process Control (1991)
- 12) S. K. Card, et al.: The Psychology of Human Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates (1983)
- 13) 寺野寿郎: 異常と診断におけるヒューマン・ファクタ, 計測と制御, 25-10, 887/893 (1986)
- 14) 海保, ほか: 認知的インタフェース, 新曜社, 68 (1991)
- 15) 佐相, ほか: チーム行動に関する一次解析技法の改良, 人間工学, 25-5, 251/260 (1990)
- 16) K. Hornyik, et al.: RETRAN Analysis of the Turbine Trip Tests at Peach Bottom Atomic Power Station Unit 2 at the End of Cycle 2, EPRI NP-1076-SR (1979)
- 17) 藤本, ほか: 1 次元動特性モデルによる原子力プラントのタービントリップ解析, 電中研研究報告, No. 285008 (1985)
- 18) 三浦, ほか編著: 官能検査ハンドブック, 日科技連, 679/681 (1987)

[著者紹介]

吉村 誠一 (正会員)

1976 年, 北海道大学工学部精密工科大学大学院修士課程修了。同年(財)電力中央研究所に入所。プラント診断支援システム, 知的教育システム, 運転チーム行動モデルなどの研究に従事。ヒューマンファクター研究センター研究主幹。日本原子力学会の会員。

高野 研一

1980 年, 名古屋大学大学院博士課程前期修了。同年(財)電力中央研究所勤務。現在, ヒューマンファクター研究センター主任研究員, 生体情報の計測評価, 運転チーム行動モデルの開発に従事。

佐相 邦英

1989 年, 慶応義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年(財)電力中央研究所勤務。ヒューマンファクター研究センターにおいて, 原子力発電所の運転チームの評価研究, 同モデリング研究に従事。日本人間工学会, 日本原子力学会などの会員。