

のメニュー上で、機器と状態量 (温度/圧力/流量/水位) の組み合わせられた項目をマウスクリックすることにより、指定および切り替えが行える。現在表示している機器と状態量の項目は、白く光り、操作者に容易に認識できる。

さらに、通常、本表示機能を使う際には、機器ごとに違う種類の状態量を監視するのではなく、温度なら温度、圧力なら圧力というように、すべての機器がひとつの種類の状態量を表示している画面が主になると思われる。そこで、状態量ごとにグループ化を行って、そのグループを選択するメニューを図 31 のように作成した。このメニューは、本機能の画面では、図 30 のメニューの下に位置している。このグループ化のメニューを使用することにより、現在提示されているカラーグラフィックスが示している状態量がよくわかり、状態量ごとに機器をまとめて扱うことができる。使用方法は、図 30 のメニューと同じである。

状態量をグループとして監視しながら、必要に応じて、図 30 の機器ごとのメニューを用いて、注目している機器の状態量表示を変えることももちろんできる。例えば、図 31 のメニューで Group of Temperature を選択し、全体を温度表示モードにしておき、特定の機器だけ図 30 のメニューから流量表示を行える。

5.4 自律型プラント・シミュレータとの通信部

前述の通り、船舶技術研究所ではリアルタイムエキス



図-30 機器および状態量選択用のメニュー



図-31 状態量グループ選択用のメニュー

パートシステム G2 上に、自律型原子力プラントのシミュレータを構築した。この自律型原子力プラント・シミュレータとのプロセス間通信機能を作成し、本三次元グラフィックスによるプラント状態表示機能は、自律型プラント・シミュレータからの状態量のデータ受け取りが実現した。この通信では、G2 からファイル転送が行われる。ファイルを3つ用意することで、表示の途中でファイルが書き換えられることを防いでいる。ファイル転送の頻度は、自由に設定することができる。この通信により、自律型原子力プラントの状態量を、三次元カラーグラフィックスで、ほぼリアルタイムに表示することが可能となった

プロセス間通信は、自律型プラント・シミュレータの画面上で、通信の開始および終了のボタンをマウスクリックすることにより行える。

5.5 今後の課題

現在、本三次元グラフィックスによるプラント状態表示機能は、プラント・シミュレータの状態量そのままの表示が実現している。今後は、状態量の値と表示の色との割り当てについて検討し、適切なものを決定していく。さらに、プラントの状態量変化や異常状態がよくわかるように、状態の変化のわかりやすい表示法⁽¹⁵⁾へと研究を進める予定である。また、現在は一つの CRT 上に、三次元カラーグラフィックス画面とメニュー画面を表示しているが、将来的には、両者を別々の CRT 上に表示することも検討している。そうすることにより、三次元カラーグラフィックス画面はより大きく表示でき、操作をより手元で行えることになり、ユーザーフレンドリーな機能となると考える。

6. プラント状態の自動分類機能

6.1 緒言

原子力プラントにおいて、プラント異常時や緊急時に、プラント状態を正しく把握し、とるべき処置の選択を誤らないようにすることが、安全を確保するために重要である。そのためには、マン・マシン・インターフェイスは、短時間でプラント情報を処理しオペレータに知らせなければならない。プラント情報の収集、状態判断、操作の一連の作業を運転員が迅速・正確に行うためには、適切なマン・マシン・インターフェイスの存在が重要となってくる。

プラント状態には、運転モード、異常時、事故時などに対応して種々の状態が存在する。現在のプラント状態を他の状態との関連において運転員に提示することは、運転員の状態判断、操作に貴重な支援となる。そこで本章では、逐次学習の手法のひとつである COBWEB を用いてのプラント状態の自動分類機能の検討を行った。

6.2 COBWEB について

COBWEB とは、Fisher ら⁽¹⁶⁾によって提唱された概念クラスタリング手法の一つであり、概念生成が「同じクラスに属する事例間の類似性と異なるクラスに属する事例との間での非類似性を最大化する」ように進行すること等に基づいて実現されたアルゴリズムである。また COBWEB は、すでに移動ロボットシステムの研究などにも用いられている⁽¹⁷⁾。そこで本研究では、逐次変化するプラント状態を、それを特徴づける要因により分類するために COBWEB を用いた。

6.2.1 クラス内類似性とクラス間非類似性

まず、類似の概念を持つものの集合をクラス C_k ($k=1, 2, \dots$) と定義する。事例を記述する特徴を A_i ($i=1, 2, \dots$)、 A_i の取り得る値を V_{ij} ($j=1, 2, \dots$) とした時、クラス C_k 内の類似性 (inter-class similarity) を次のように定義する。

$$P_s = P(A_i = V_{ij} | C_k)$$

P_s は、あるクラス C_k の事例が特徴 $A_i = V_{ij}$ をもつ条件付き確率である。このことから P_s は、「特徴値 V_{ij} がクラス C_k の概念を代表するものとしての有効性」を表す指標であるといえる。

一方、クラス間非類似性 (intra-class dissimilarity) を次のように定義する。

$$P_d = P(C_k | A_i = V_{ij})$$

P_d は、ある事例において特徴 $A_i = V_{ij}$ が認められたとき、その事例がクラス C_k に属する条件付き確率である。このことから P_d は、「特徴値 V_{ij} がクラス C_k の概念を示唆するてがかりとしての有効性」を表す指標であるといえる。

6.2.2 カテゴリューティリティ

Gluck と Corter⁽¹⁸⁾は、クラス内類似性とクラス間非類似性から計算されるカテゴリューティリティ (category utility) を提唱している。

概念クラス C_k ($k=1, 2, \dots, n$) が存在するときの式、

$$U_{ki} = \sum_j P(A_i = V_{ij}) P(C_k | A_i = V_{ij}) P(A_i = V_{ij} | C_k) \quad (1)$$

は、属性 (A_i) に注目し、クラス内類似性 (P_s) およびクラス間非類似性 (P_d) の積に、 A_i がとり得る個々の属性値の重要性の重み $P(A_i = V_{ij})$ を掛けたものであるから、よく現れる特徴 ($A_i = V_{ij}$) ほど U_{ki} を強めることになる。この式 (1) は Bayes の法則、

$$P(A_i = V_{ij}) P(C_k | A_i = V_{ij}) = P(C_k) P(A_i = V_{ij} | C_k)$$

により、

$$U_{ki} = P(C_k) \sum_j P(A_i = V_{ij} | C_k)^2 \quad (2)$$

となる。式 (2) において $P(A_i = V_{ij} | C_k)$ は、概念クラス C_k の属性 A_i の値を V_{ij} と予測する確率と考えることができる。その予測の正しい確率が、やはり $P(A_i = V_{ij} | C_k)$ と与えられたとすると、 $P(A_i = V_{ij} | C_k)^2$ は実際に属性値を正しく予測できる確率を表している。

一方、 $P(C_k)$ は概念 C_k の事例に出くわす頻度と考えることができる。 C_k = 「植物」のようなあまりにも抽象的な概念のもとでは、その属性がどのような値を持つかを正しく予測することは難しく、 $P(A_i = V_{ij} | C_k)^2$ は小さい。しかし、「植物」の事例は非常に多く、 $P(C_k)$ は大きくなる。また、「梅」のような具体すぎる概念では、属性値の予測は容易で $P(A_i = V_{ij} | C_k)^2$ は大きくなるが、事例の頻度 $P(C_k)$ は極端に小さくなる。これより、 U_{ki} は与えられた概念のもとで属性を正しく予測する容易さとその様な場面に出くわす機会とのトレードオフと、式 (1) においての、 P_s と P_d のトレードオフを与えるものであり、適当な抽象性と具体性を持つ概念「花」において最も大きくなると考えられる。

以上よりカテゴリューティリティとして次の式を定義する。

$$CU = \frac{\sum_{k=1}^n P(C_k) [\sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij} | C_k)^2 - \sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij})^2]}{n}$$

k は注目している部分構造におけるクラスここで

$$\sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij} | C_k)^2 - \sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij})^2$$

は概念クラスが未知の場合と、既知の場合の各々において、属性 A_i の値を V_{ij} と正しく予測できるような属性数の期待値の差である。

6.2.3 COBWEB の基本操作

COBWEB の基本操作としては、新しい事例が入力されたときに、

操作 1 既存のクラスに新事例を加える

操作 2 新事例だけで新しいクラスを生成する

の 2 種類がある。これらの操作を示したものが、図 32 (a), (b) である。

まず、新事例 x を操作 1 によって既存のクラス A, B, C のそれぞれに暫定的に加え、各々の場合について CU 値を求める。次に操作 2 によって暫定的に新しいクラス D を生成し、この場合の CU 値を求める。以上の操作結果から、最大の CU 値の場合について、そのレベルでの最適な操作として採用する (図 33)。また、階層的な概

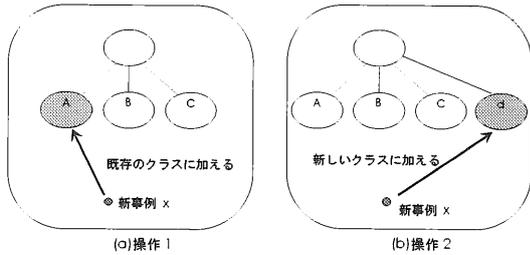


図-32 COBWEBの基本操作 (その1)

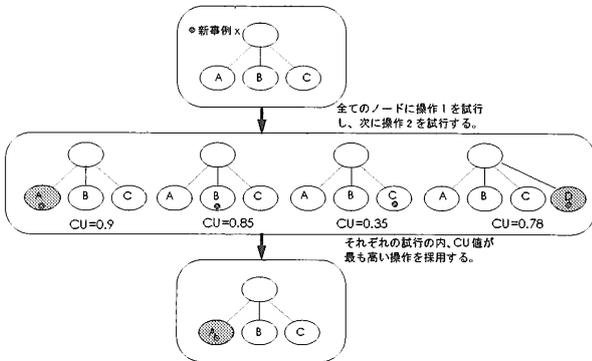


図-33 COBWEBの操作手順

念がすでに構築されている場合について示したものが、図34である。まず階層のレベル1について、前述の一連の操作を行い最も適合するクラスを決定し、以降その決定されたクラスの子クラスについて同様の操作を再帰的に行う。この操作を、最終的に新事例のみからなるクラスを生成するまで操作を続ける。

COBWEBの学習方法は、主として前述の操作1、2によって行われる。しかしながら、この学習される概念は遭遇する事例の順序によって変動し、特に事例が小数の場合には、遭遇する事例の順序にその結果が依存し、学習の初期段階などでは偏ったクラスを生成する可能性が大きい。これを回避するための手法として、以下に示す2つの操作が用意されている。

操作3 既存の2つのクラスを結合し、新たに1つのクラスとする (merging : 図35(a))

操作4 既存のあるクラスを分離し、いくつかのクラスとする (splitting : 図35(b))

この操作により、一旦生成された階層構造が、部分的に再構成される。また、操作3、4を全てのクラスに対して試行すると操作1、2を含めた試行回数が組み合わせ

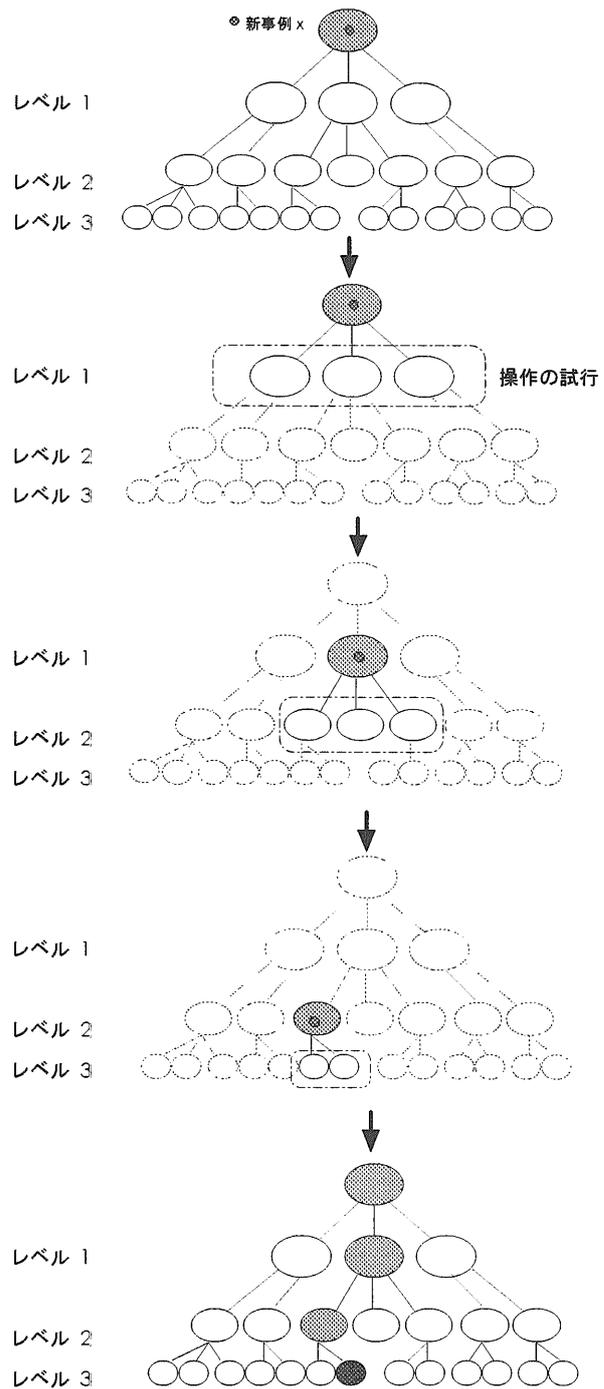


図-34 階層的な構造への新事例の追加

表-5 列車と自動車の分類基準

	乗員	動力源	速さ	時間の正確さ
普通列車	多	電気	普通	正確
新幹線	多	電気	速い	正確
バス	やや多	石油	普通	不正確
乗用車	少	石油	速い	不正確

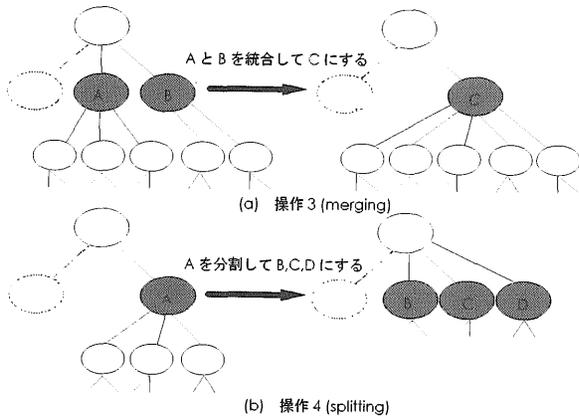


図-35 COBWEBの基本操作（その2）

的に増大する。そこで、操作3は操作1におけるCU値が最大と2番目に大きなクラスを結合する場合について試行し、操作4は同様にCU値が最大のクラスについてのみ試行する。以上のような、4つの操作によるCOBWEBの概念クラスの構築のアルゴリズムをまとめたものが図36である。

実際に簡単な例を用いて操作を解説する。表5は、列車と自動車について乗員、動力源、速さおよび時間の正確さによって分類したものである。図37(a)は、事例として「普通列車」と「新幹線」のみでの概念のツリー構造である。各クラスには、クラスの存在確率 $P(C_k)$ 、各クラスのもとでの特徴の存在確率 $P(A_i = V_{ij} | C_k)$ を示している。ここに、「バス」の新しい事例が与えられたとする。このとき、CU値を用いての評価をした結果が図37(b)である。この結果から、明らかなように、既存の2つのクラス「普通列車」と「新幹線」のいずれかに含めるよりも、新たにクラス「バス」を生成した場合に最も高い評価値を示す。さらに、「乗用車」の事例が与えられたときの結果は、図37(c)に示すように、クラス「バス」に含めるのが最良の概念構造となる。さらに、

この場合にはクラス「バス、乗用車」の下位クラスとして「バス」と「乗用車」のクラスが生成される。

6.3 COBWEBを用いたプラント状態分類機能の検討

COBWEBを用いて原子力プラント状態を自動分類する機能について検討した⁽¹⁹⁾。表6は、G2上に構築されたプラントシミュレータから得られるデータをもとにプラントの6つの要素に着目して分類したものである。

表では9種のプラント状態について各要素の状態を記述してある。

まず、G2上のプラントシミュレータによりプラントが定格運転に至るまでの状態変化を分類したものが図38である。出力上昇50% (C)と75% (D)が同じクラスに分類され、さらにその下部クラスが生成されていることがわかる。分類には問題がない。

次に、定格後、出力を低下させた状態を加えたものが図39である。出力低下75% (F)と50% (G)が同じクラスに分類され、これについても分類には問題がない。更に、様々な状態を加え、適切な分類が行われるか確認してみた。

まず、図40に「Aループ一次ポンプ停止」(H)、図41に「定格後緊急炉停止」(I)を加えた場合の結果に示す。それぞれ新たなクラスを生成し、適当な分類が行われている。

以上の結果から、図41までにおいて検討した事象に対しては、分類は適切に行われていることが確認された。

6.4 まとめ

プラントの状態の自動分類機能のために、COBWEBを採用して検討した結果、かなり有効な方法であることがわかった。これにより、運転員にプラントの現在の状態と過去に経験した状態との関係などを知らせることが

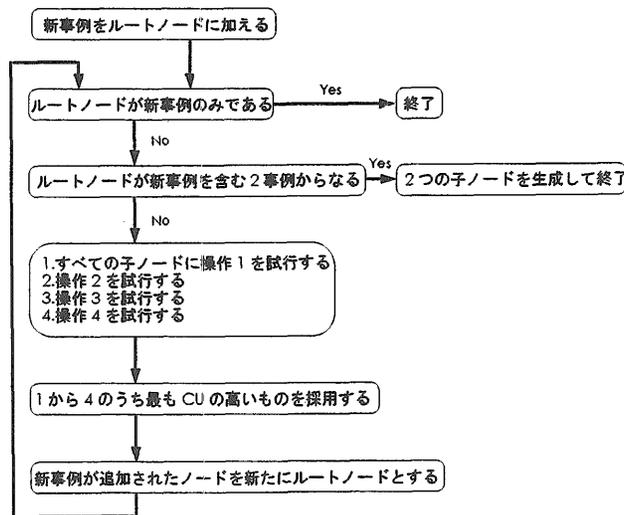
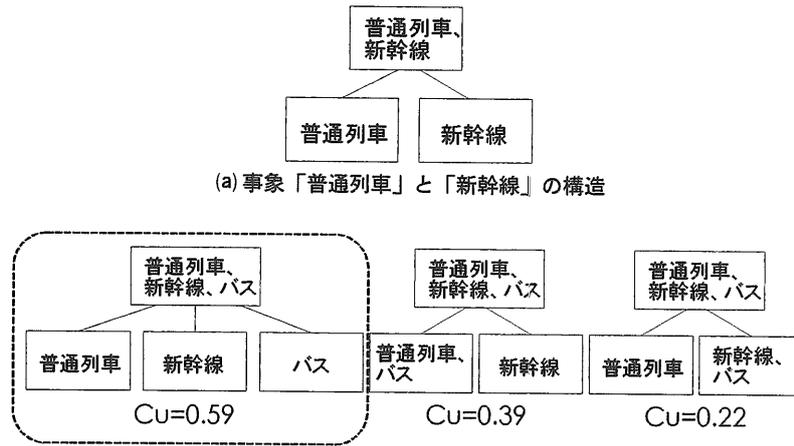
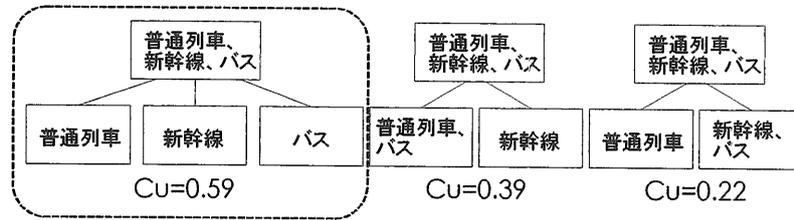


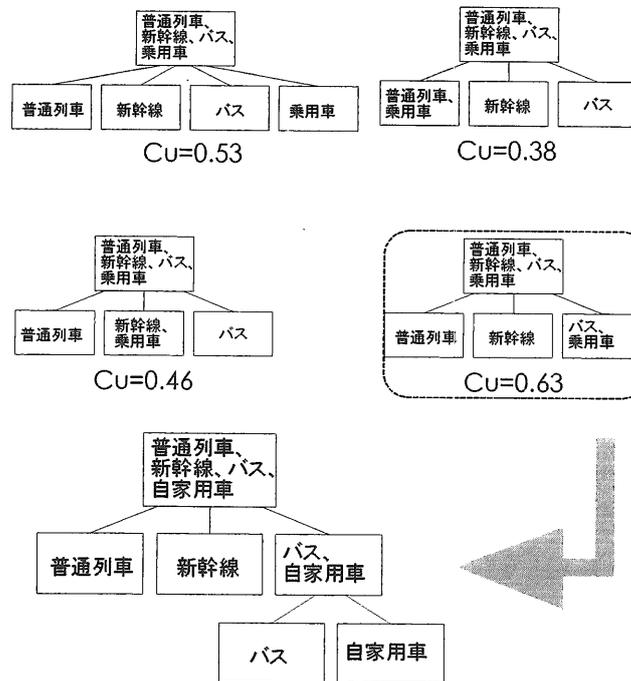
図-36 COBWEBのアルゴリズム



(a) 事象「普通列車」と「新幹線」の構造



(b) 上図に、事象「バス」を追加した構造



(c) さらに、事象「乗用車」を追加した構造

図-37 列車と自動車の分類過程

できると思われる。しかしながら今回の分類は、代表的なプラント状態の分類を行っただけで、過渡的なプラント状態等を含め、より一般的なプラント状態についての確認は今後の課題となっている。この過渡的なプラント状態では、各部の状態の変動が激しく、状態判断に注意

を要すると思われる。このような過渡的な状態も含めた一般的なプラント状態の分類が適切に行われるかどうかは、プラント状態を決定する要素の状態判断に依存するものと思われる。したがって、この要素の状態判断を行うための、しきい値の設定が重要となる。

表-6 プラント状態の分類基準

記号	プラント状態	発電機出力	原子炉状態	加圧器機能	A ループ機能	B ループ機能	二次側機能
A.	臨界零出力	零	発熱零	定格	流れなし	流れなし	機能なし
B.	出力上昇 25%	中間低	発熱小	定格	流れ定格・ 炉心部温度上昇小	流れ定格・ 炉心部温度上昇小	異常低下
C.	出力上昇 50%	中間	発熱やや小	定格	流れ定格・ 炉心部温度上昇やや小	流れ定格・ 炉心部温度上昇やや小	低下
D.	出力上昇 75%	中間高	発熱やや小	流入	流れ定格・ 炉心部温度上昇やや小	流れ定格・ 炉心部温度上昇やや小	低下
E.	定格運転	定格	定格	定格	定格	定格	定格
F.	出力低下 75%	中間高	圧力低下・ 発熱やや小	流出	圧力低下・ 炉心部温度上昇小	圧力低下・ 炉心部温度上昇小	蒸気発生量 やや低下
G.	出力低下 50%	中間	発熱小	流出	流れ定格・ 温度レベルやや高	流れ定格・ 温度レベルやや高	低下
H.	A ループ一次ポンプ停止	中間高	入口温度低	定格	逆流	流量大	片側のみ機能
I.	定格後緊急炉停止	零	圧力低下・ 発熱小	加圧機能 異常低下	圧力低下・ 炉心部発熱小	圧力低下・ 炉心部発熱小	給水あり・ 蒸気発生なし

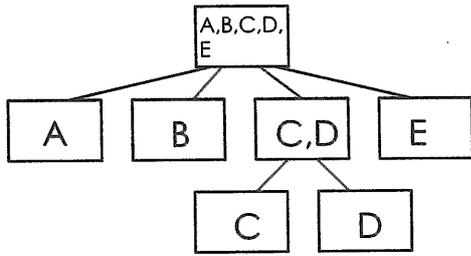


図-38 “起動” から “定格” 事例までの分類

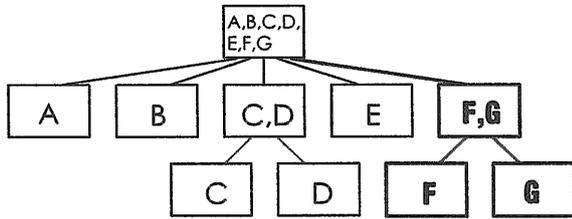


図-39 “定格後出力低下” 事例追加

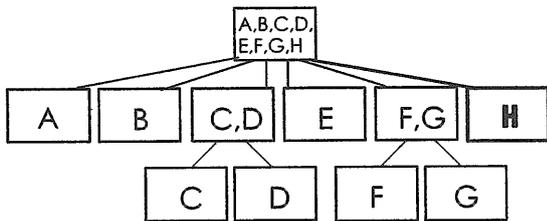


図-40 “A ループ一次ポンプ停止” 事例追加

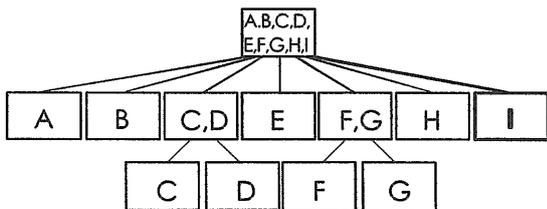


図-41 “定格後緊急炉停止” 事例追加

今後、本分類機能をより高度化させるため、
 i) 前述のしきい値の値および分類項目の設定
 ii) 分類された状態間の類似性
 iii) 分類された状態の状態表示や情報の表示方法
 等について、検討および改良を加えていく予定である。

7. 結論

自律型プラントの概念をもとに、自律型プラントシミュレータの開発、プラント機能モデルの研究開発、プラント状態表示機能の開発を実施し、それぞれの項目について本報告において述べた成果が得られた。

エキスパートシステムを用いて作成した自律型プラントシミュレータは定性的な挙動を正しく再現しているとともに特殊機能・自律機能も整備されており、本研究において他のマンマシンインターフェース機能の検証、評

価に有効に活用できた。本シミュレータの構成、細部の挙動は柔軟に変更可能な枠組みとなっており、今後各種の有効な活用が期待できる。

プラント機能モデルは、プラントを階層構造的な機能に展開してプラント状態を判断する方法を取っておりプラントのサブシステム単位の状態も判定可能である。また、ルールに柔軟性を持たせてあるため未経験プラント状態も類似状態として判定できる。さらに、判断対象のプラント状態を蓄積していく過程において、判断ルールを自動的に拡張/修正する機能も備えられており、将来型のマンマシンインターフェイスにおけるより進んだ機能の開発の端緒となる研究と言える。プラント機能モデル自体にはシミュレーション機能も備わっており、プラント状態の予測機能、仮想操作結果の予測機能の開発へと発展させる事ができる。

運転管理者がプラント状態を細部にとらわれず概念的に素早く把握することは、特に緊急時においては重要な事となる。三次元画像表示機能はマンマシンインターフェイスの表示機能としては従来プラントにはなかった新しい試みである。主要物理量、プラント状態をプラント形状に沿った色彩等で表現する非常に認識しやすい表示システムが実現された。状態量変化や異常状態が発生した場合それが色彩変化に現れ、プラントのどの部分で発生しても容易に注意が喚起され得る。今後はオペレータが望む観察位置へ容易に移動する方法、関連情報が三次元画像表示内で得られるシステム化、さらには画像表示システムから直接プラントの機器操作を可能とする機能等、この画像表示機能を発展させたシステム化の研究が考えられる。

逐次学習法を応用したプラント状態自動分類機能を検討し、本方法は有効な方法であるとの見通しを得た。運転員に現在のプラント状態を過去に経験した状態との類似度により分類・提示する事はプラント運転状況把握を容易にする。特に故障原因が明確でない未経験事象が発生した場合でもプラント状態判断、故障原因同定にとって貴重な支援情報となり得る。今後、この自動分類機能をより高度化し実際への適応を念頭においた研究を進めていく。

以上の成果を活用し、第2期の研究である自律分散協調機能監視システムの研究を原子力基盤クロスオーバー研究の一環として現在実施中である。第2期においては参加研究機関で実施している関連要素技術のシステム化も重要な目標となっている。そのため、動力炉核燃料開発事業団による運転制御システムの研究、理化学研究所による保全システムの研究との統合化も研究項目として取り上げ、以下の項目について研究を進めている。

(1)自律機能の階層的な表現技術の研究、(2)分散協調機能の動作状態の表現技術の研究、(3)意志決定過程の表現技術の研究、(4)運転制御システムとの統合、(5)保全システムとの統合、(6)総合的評価実験

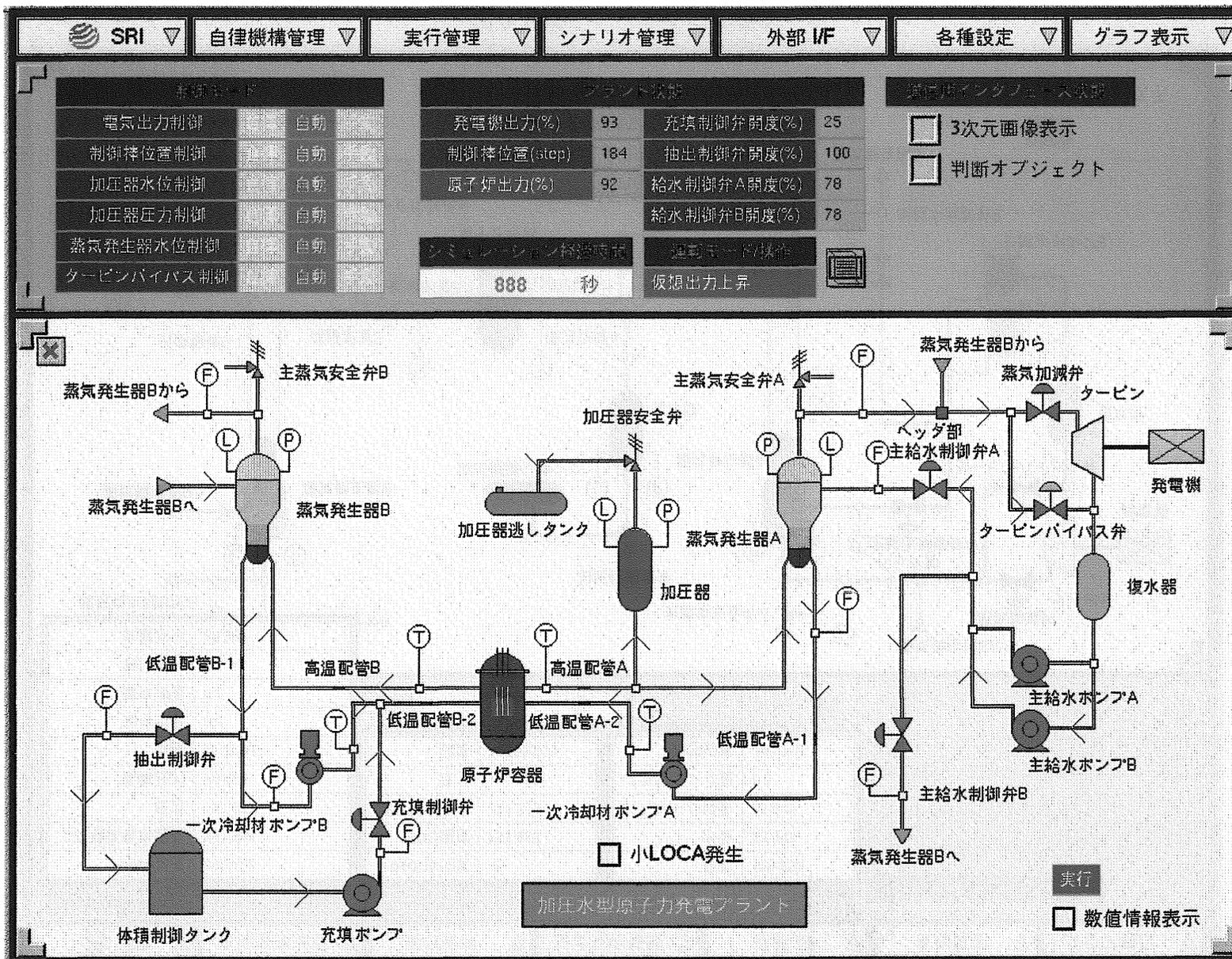


図-2 自律型プラントシミュレータ系統図

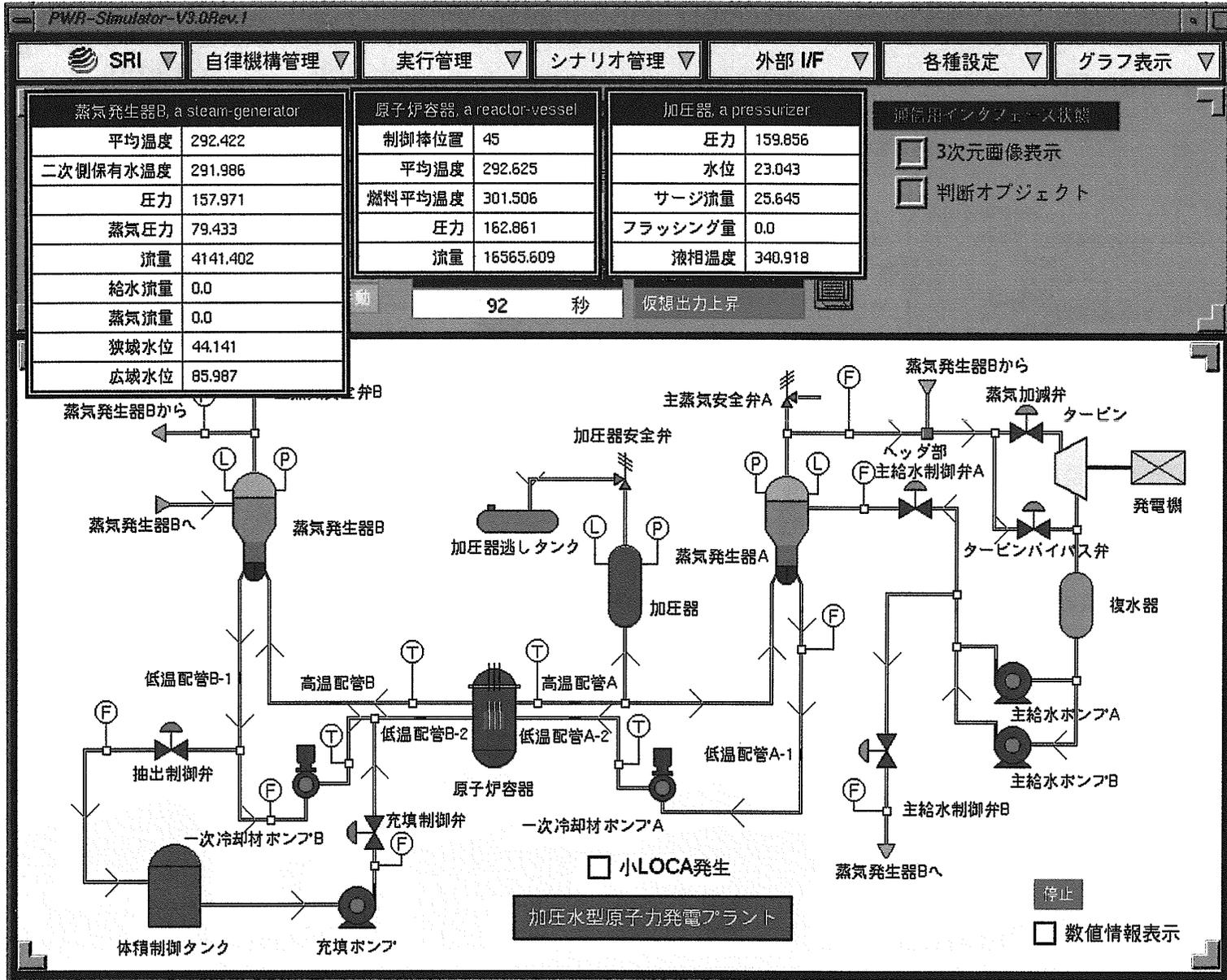


図-3 属性テーブルを表示した場合

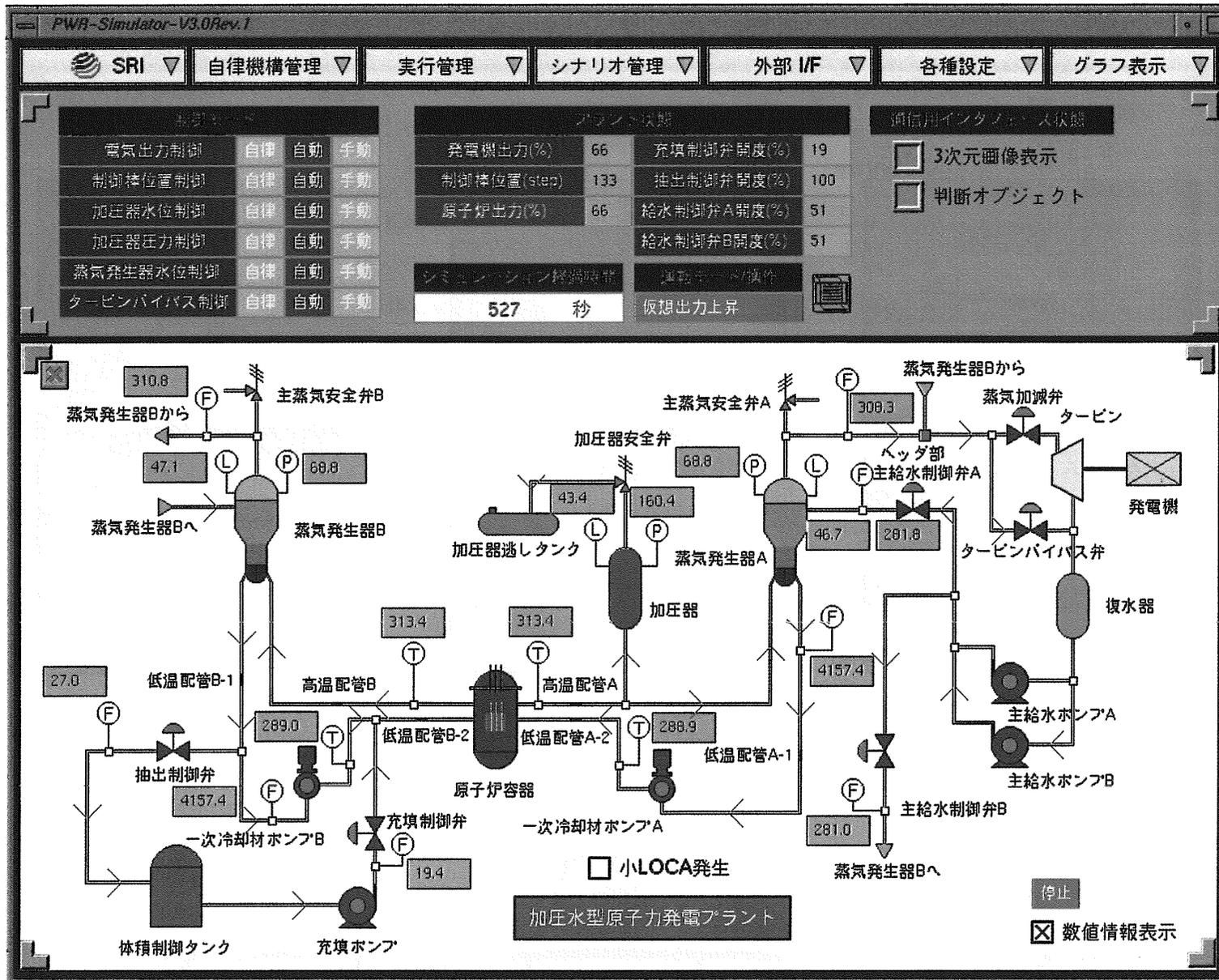


図-4 数值情報表示