849. 原子力プラント保守支援システムの開発

氏田 博士*, 木口 高志*,
小野寺 勝重**, 駒田 正興**

(1986年 3月8日 受理)

(1986年 7月3日 再受理)

Development of Maintenance Support System for Nuclear Power Plants

By Hiroshi UJITA, Takashi KIGUCHI,
Katsushige ONODERA and Masaoki KOMATA

A maintenance support system, which utilizes maintenance expert know-how and failure experience, is developed by applying the method of knowledge engineering. The system searches failure causes from failure symptoms by repeating forward and backward chaining. It then estimates the certainty factor of the failure causes by using the certainty factors of the symptoms and of the failure cause-consequence relation, and the occurrence probabilities of candidate causes. The system also provides a plant maintenance scheme based on maintenance priority. Application of the system to the diagnosis and maintenance scheme evaluation on BWR plant control rod drive systems demonstrates the system's usefulness.

KEYWORDS: *certainty factor, control rod drives, diagnosis, expert know-how, failure, knowledge engineering, maintenance support system, nuclear power plants, reactor control systems, reactor maintenance, repair, symptoms*

I. 緒 言

原子力発電プラントでは、長期運転を実現し、また稼働率をより一層向上するため、保守を適切に実施することが求められている。これには、多数の熟練した保守員、すなわち保守の専門家を必要とするため、省力化が望まれている。

専門家の知識を有効に活用できる知識工学を応用することにより、保守作業の省力化が期待できる。そこで、知識工学を適用したプラントの運転員あるいは保守員を対象とする保守支援システムの開発を試みた。なお、一般に保守には予防保全と事後保全があるが、本報では事後保全を対象とした。事後保全は故障の症状に対応した故障診断と、これに基づく機器の修理・交換とからなる。

知識工学を用いた診断支援システムは、もともと医療分野で開発が進められてきた⁽¹⁾。その基本的な考え方は、病気の症状を入力すると、「もし～ならば、～である」のような if-then 形式の因果関係に関するプロダクションルールを次々にたどり病気の原因を推定

する。同時に、その推定原因の確からしさを症状の確からしさおよび病気の因果関係の確からしさから計算する。また、必要に応じて投薬する等の処置法を提示する。このような手法は、最近プラントの故障診断⁽²⁾等、工学の分野への応用も試みられている。しかし、原子力プラントのように大規模かつ複雑なシステムの保守に適用するには、新たに以下に示す方法の開発が要求される。

- (1) 機器の構成、故障の因果関係、機器の点検・交換の手順等の多種多量な知識の適切な表現法
- (2) 以下の3項目を実現できる原因推定法
 - ① 機器故障の発生確率を考慮した最も確からしい原因の選択
 - ② 冗長系の故障原因の推定

* 日立製作所 エネルギー研究所 (Energy Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

** 日立製作所 日立工場 (Hitachi Works, Hitachi, Ltd.)

** 原子力工学試験センタ (Nucl. Power Eng. Test Center)

③ 複数の症状がそれぞれ異なる原因から発生する場合の故障原因の推定

(3) 故障が発見された時の、機器の修理・交換時期に関する基準の設定法⁽⁴⁾

本研究では、多種多量の知識を使用した高度な診断機能および故障発生時の機器の修理・交換時期の基準を提供する原子力プラント保守支援システムを開発した。第Ⅱ章では、本システムの構成と機能を述べ、第Ⅲ章では、本システムの有効性を確認するため、BWRの制御棒駆動系を例に取り、知識ベースを作成して故

障診断と修理交換時期の決定を試みる。

Ⅱ. システムの構成と機能

本システムは、第1図に示すように、①機器故障診断部、②保守優先度推定部、③保守法指示部からなる演算部、および①機器故障の因果関係の知識、②機器の故障モードとその故障率の知識、③点検や交換の手順の知識からなる知識ベースより構成されている。保守員は入出力端末を介して本システムと対話する。

第1図 原子力プラント保守支援システムの概要

1. 知識ベース

知識ベースでは、機器の故障および保守に関する専門家の多様な知識を表現するため、第2図に示すように、フレーム型式⁽⁴⁾を用いた。すなわち、1つのフレームを1つの「機器故障」に対応させ、その「属性」とさらにその「下位の属性」はスロットとファセットに割り当て、それぞれの「具体的な内容」はバリューに記憶させる。本図の例では、フレーム名「弁Aリーク」の知識

を示した。このように知識表現に構造化されたフレーム表現を用いたため、多数の機器故障に関する詳細な知識の登録・検索・更新が容易となった。これらの知識は、保守の専門家が故障経験や系統図を基に、診断に必要な確度を含む故障の因果関係をif-thenルールとして表現したものである。さらに保守法への反映のため、保守の手順等の知識も加えてある。

以下、フレームの内容を各スロットごとに説明する。

フレーム	スロット	ファセット	バリュー (例)	備 考
弁Aリーク (例)	機器故障内容	機器	(電磁弁A)	入力
		事象	(シートリーク)	
		観測可能性	定期検査中観測可能	
	下方ポインタ	ゲートタイプ	(ORゲート)	自動作成
		機器故障(1)	(シール摩耗 確度=0.9)	
	ミニマルカットセット	機器故障(2)	(シート劣化 確度=1.0)	
		ミニマルカットセット(1)	(シール摩耗)	
	上方ポインタ	ミニマルカットセット(2)	(シート劣化)	
		(弁B誤開)		自動作成
	事前確率	故障率	(1.0×10^{-6})	
	点検手順	故障確率	(8.8×10^{-3})	入力
		手順(1)	(弁C閉)(弁D閉)(流量計指示0確認)	
	交換手順	手順(2)	(弁D開)(流量計指示上昇確認)	
		取り外し	(弁C開)(弁D閉)(マニホールドより除去)	
		取り付け	(弁C開)(弁D開)(流量調整)	

* 末端機器故障(基本事象)のみ入力。他は自動作成

第2図 機器故障に関する知識のフレーム表現

- (1) 機器故障は、「機器」とその「事象」(故障モード)の組により定義される。観測可能性には、定期検査中観測可能に加え運転中観測可能と観測不可能の3種類が設けてあり、保守の専門家が系統図・配置図等からいずれに相当するか判断する。
- (2) 下方ポインタは、当該フレームの「機器故障」の原因となる「機器故障」の内容を記憶しているフレームを指す。すなわち、if(機器故障が発生)—then(下方ポインタが指す機器故障が原因である)—というプロダクションルールを表現している。この際、機器故障に関する因果関係の確度*も併わせて記憶しておく。原因が複数ある場合、その間の関係(AND ゲートか OR ゲートで表現する)も示す。
- (3) 推定原因の確度を計算するためのミニマルカットセット**は、前処理プログラムにより下方ポインタから自動作成される。
- (4) 後向き推論に用いる上方ポインタ(当該フレームの「機器故障」の結果として発生する「機器故障」の内容を記憶しているフレームを指す)も、あらかじめ下方ポインタから自動作成される。

- (5) 保守優先度を計算するための故障率 $[h^{-1}]$ は、末端機器故障(基本事象)に与えられた故障率から自動作成される。この故障率は、保守の専門家が公開のデータ⁽³⁾にそのプラント固有のデータ等を加味して作成する。推定原因の確度を計算するための故障確率[無次元]は、単位時間を使命時間としたときの不信程度であり、ミニマルカットセットを用いたブール演算を基に計算される。これらは、故障が発生する以前の値であるので、事前確率**として格納されている。
- (6) 推定した故障原因が発生していることを通常は確認できないが、保守員の操作により確認できる場合についての必要な点検手順が、保守員のノウハウをまとめた形で記憶されている。この知識に基づき、より正確な診断をすることができる。
- (7) 故障した機器の修理・交換の手順は、手順書を整理した形で記憶されている。本例では交換の手順を示す。

2. 機器故障診断部

機器故障診断部における診断のプロセスを第3図に示す例を用いて説明する。本図は、故障の原因とその

第3図 前向き・後向き推論による原因探索

結果の因果関係を表現したプロダクションルールを接続して出来た、原因推定手順を示すネットワーク図である。実線の矢印は、故障の症状から原因を推定するためにルールを原因側にたどる前向き推論を示す。また、破線の矢印は、推定原因に基づいて見逃し症状を推定するためにルールを結果側にたどる後向き推論を

* 保守の専門家が定める因果関係の確からしさ。通常は1。経験や知識の不足等のため因果関係の知識があいまいな場合でも、0～1の間の値を用いて表現できる。

** 機器を故障に至らしめる上で必要最小の末端機器故障の集合。

** ベイズの定理における事前確率。

示す。〔数字〕および数字は、予め与えられている故障の因果関係の確度および機器の故障率である。

以下、診断のプロセスを故障原因推定、見逃し症状の観測要請、原因同定の順で示す。

(1) 故障原因推定

保守員が機器故障 A の症状を観測確度* 0.9 で観測し、その観測結果を入力した場合を想定する。症状に基づきルール(実線の矢印)をたどり原因探索が行われる。これにより、機器故障 B, C, D の 3 種類の原因候補が求まる。各原因候補の上の数字は、0~1 の範囲で示される故障原因推定の確度である。

故障原因の確度の計算式を以下に説明する。機器故障あるいは因果関係 α の確度を $CF(\alpha)$ で表す。観測された症状 $b_j (j=1 \sim G)$ が入力され、そのうち任意の k 個が 1 つの共通原因から発生するとした時、その原因が要素 $a_i (i=1 \sim M)$ からなる m 番目のミニマルカットセットであるための確度は次式で表わされる。

$$CF(\cap_{i \in m} a_i, \cap_{j \in F_i} b_j) = \sum_{j \in F_i} A_j - \sum_{j, j' \in F_i} A_j \cdot A_{j'} + \dots$$

$$j \neq j' \quad (1)$$

ここで、 $\cap_{i \in m} a_i$: m 番目のミニマルカットセット

に属するすべての要素

$$A_j = CF(b_j) \cdot (\prod_{i \in m} CF(a_i) \cdot r_{ij})^{1/M}$$

$$A_{j'} = CF(b_{j'}) \cdot (\prod_{i \in m} CF(a_i) \cdot r_{ij'})^{1/M}, \dots$$

$$F_i = \{f_{i1}, \dots, f_{ik}\}, (i=1 \sim C_k)$$

$$f_{ik'} \in \{1, \dots, G\}, (k'=1 \sim k)$$

$$r_{ij} = \max_{\substack{\text{すべての1つの} \\ \text{パスの内パスの内}}} [\min \{CF(r_{gh})\}]$$

$CF(r_{gh})$: 原因 a_i と症状 b_j を結ぶパス $i-j$ を構成する部分パス $g-h$ 上の因果関係の確度

以下、(1)式の意味を詳しく説明する。

(1) 本式では、複数の症状の確度に対し、確率の加法定理と同様の計算方式 ($\sum A_j - \sum A_j \cdot A_{j'} + \dots$) を適用し原因の確度を計算している⁽⁵⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

(2) 従来の診断方法では、故障の因果関係のみを用いて原因を推定していた⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。本方法では、「保守員が原因推定する場合、故障の因果関係をたどっていくつかの推定原因の候補を挙げ、そのうちから故障が最も起りやすいものを原因と判断する。」

という人間の推論過程を取り入れる。すなわち、原因となる機器の故障確率(第2図の故障確率のファセットに記憶されている値)も原因推定に反映するため、 $CF(a_i)$ を(1)式に含める。

$CF(a_i)$ は、症状 b_j が観測されたという条件の下での原因 a_i が発生する事後確率 $P(a_i|b_j)$ ** であり、ベイズの定理を用いて次式により計算する⁽³⁾。

$$CF(a_i) = P(a_i|b_j) = \frac{P(a_i \cap b_j)}{P(b_j)} \quad (2)$$

(3) 冗長構成(AND ゲート)のように複数の故障が原因となって初めて症状が現れる場合、従来の知識工学的手法では各故障の組合せに対しての確度は計算していない⁽⁵⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本方法では、ミニマルカットセット¹⁰⁾を求めその構成要素の確度の相乗平均をミニマルカットセットの確度として採用する¹¹⁾。ミニマルカットセットは予め求められており、フレームに格納されている。

第3図の例では、症状が1つでかつ AND ゲートがない場合の確度が示されている。原因として、機器故障 B が確度 0.9 で推定される。本手法ではさらに、故障確率の大小に伴う事後確率の相違に基づき、(2)式を用いてより基本事象(末端機器故障)に近い機器故障 C を、確度 0.82 で最も確からしい原因として推定する。また、機器故障 D を、故障確率が機器故障 C より 1 桁低い確度 0.082 で原因として推定する。

(2) 見逃し症状の観測要請

原因推定が終了すると、ルールを推定原因から結果側にたどる後向き推論(破線の矢印)により保守員が気付かなかった潜在的な故障症状も推定してその確認要請を出力する。第3図の例で、推定原因から観測されるべき症状を推定すると、機器故障 D から機器故障 E、さらに機器故障 F が症状の候補として予測できる。これらは、症状として入力されていないので見逃された可能性もあるものとし、見逃し症状の観測要請を出力する。

(3) 原因推定

出力された症状観測要請に従って確認した結果、機器故障 F が観測確度 0.8 で観測された場合、すなわち、2 つの症状がある場合を考える。

* 観測された症状の確からしさ、すなわち保守員がその症状が発生していることに対し示す確信度。これによりあいまいな症状あるいは故障の程度が入力できる。

** 事後確率は、症状の確度を、原因候補の機器の故障確率の大小に応じて、原因候補の確度に割り振る意味を持っている。

*** ミニマルカットセットの故障確率は各要素の故障確率の積であるので、ミニマルカットセット間の大小比較のため相乗平均を導入した。

複数の症状がある場合の原因推定手順および(1)式の計算方法を示す。原因を推定する場合、すべての症状が1つの原因で発生する事象(共通原因故障)の方が、複数の独立した原因で発生する事象(多重原因故障)より一般に発生する頻度が高い。そこで、原因推定の際まず原因が1つ(共通原因故障, $k=G$)の場合を優先して推定し、その確度を計算する。次に、原因の数を順に増して(多重原因故障)、原因を推定し確度を計算する。この場合、取り得る症状の組合せを考え、そのそれぞれについて独立に原因を推定する。この手順では、共通原因故障を優先順位が高い原因として推定するが、従来考慮されなかった多重原因故障の可能性も指摘することができる^{(6)~(9)}。

第3図の例で2つの症状に対する共通原因故障としては機器故障Dのみが推定される。またこの時、2つの症状が存在することによる機器故障Dの事後確率は1.0となる。これより、2つの症状(機器故障AとF)に対し機器故障Dが原因と推定される確度 $CF(D, A \cap F)$ は、(1)式より

$$0.9 \cdot 0.9 \cdot 1 + 0.8 \cdot 1 \cdot 1 - 0.9 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 1 \cdot 1 = 0.96$$

となる。2症状入力による共通原因に対する確度を、()内に示す。なお、多重原因の場合を想定すると、症状Aに対し、機器故障Cが確度0.81で、症状Fに対し、機器故障Dが確度0.8で原因と推定できる。しかし、優先順位の高い共通原因故障Dの確度が0.96と高いので、これが原因と同定できる。

このように本システムでは、症状の入力と原因推定結果・症状観測要請の出力を対話形式で繰り返すことにより、正確な診断が達成できる。

保守法決定を行う前に、推定原因に誤りがないことを確認するため点検する。点検する場合、例えば「外部漏洩」のように、その場で観測できるものもあるが、「動作不良」のような場合にはその機器を実際に動作させて確認することが必要となる。観測可能か否かの知識は第2図のフレームに記憶されている。この確認のために必要な点検の手順も記憶されており、故障原因確認要請とともに出力される。

なお、原子力プラントでは、運転中に点検できない機器もあるが、この場合その機器は修理・交換もできないことが多いので、保守員の判断により定期検査時に再度点検する等の対処を取ることになる。

3. 保守優先度推定部

機器の故障が確認された時、プラントへの影響の規模により、その機器や影響の及ぶ部位を至急修理・交換する必要がある場合や、定期検査の際に修理・交換

すれば良い場合もある。また、定期検査まで修理・交換できない機器も存在する。このような条件の下で機器の修理・交換の時期を決める必要がある。

保守優先度推定部の目的は、機器故障が確認された時の修理・交換の時期に関する基準を提供することにある。このため、一種のフォールトツリー解析を実施して、機器の故障による系統や各機器の信頼性やプラントの安全性への影響の程度を評価する。この指標として平均寿命(MTTF: mean time to failure)を採用し⁽⁹⁾、これを保守優先度と定義する。平均寿命を採用した理由は、非修理系と仮定した時の点検・交換の周期を見るためである。この平均寿命をあらかじめ設定した基準(例えば、定期検査までの期間)と比較することにより、点検・交換の優先度を決定する。

保守優先度として、健全時と比較した平均寿命の低下割合を指標とする方法もある。また、安全性に及ぼす影響が大きい故障モードの平均寿命のみを用いる方法も考えうる。しかし、ここでは信頼性の指標との対応を保つため、前述の定義を採用している。

機器の故障率はあらかじめ計算され、記憶されている。故障診断により原因が推定されると、原因が発生したという条件の下で、基本事象の故障を用いて機器の平均寿命を計算し、保守優先度として表示する。

4. 保守法指示部

保守法指示部では、機器を定期検査の間隔を基準として、平均寿命がそれより短い(保守優先度が高い)ものをランク0、以下順に平均寿命が長くなるに従い3ランクに分け、計4ランクに分類する。また、修理・交換が可能か否かを判断し、修理・交換可能な機器は、運転中の修理・交換と定期検査中の修理・交換の2種類に分類して表示する。さらに修理・交換の対象となる機器に対しては、その修理・交換の手順も必要に応じて表示する。

Ⅱ. 原子力プラントへの適用と評価

保守支援システムの原子力プラントへの適用の1例として、BWRの制御棒駆動系について知識ベースを作成して、故障原因の推定と修理・交換時期の決定を試みた。

1. 制御棒駆動系の構成

制御棒駆動系は、第4図に示すように、制御棒駆動機構および水圧制御ユニットの2つのサブシステムからなる。制御棒挿入時には、駆動水は制御棒駆動機構の下部から注入され上部から排出される。制御棒引抜時には、逆に駆動水は制御棒駆動機構の上部から注入

第4図 制御棒駆動系構成図

第5図 前向き・後向き推論による原因探索(制御棒駆動系)

され下部から排出される。緊急挿入（スクラム）時には、スクラムパイロット弁が開くことによりアキュムレータの水が注入される。

2. 故障診断

第5図は、制御棒駆動系の故障診断に用いる故障の因果関係を示すネットワークのうち、「制御棒挿入」に関する部分を取り出したものである。

(1) 故障原因推定

第6図に、「駆動水圧力高」の症状を観測確度0.9で入力する場合を示す。機器名称および事象名称の入力では、先頭の数字を入力すれば対応する名称がすべて出力され、その中から該当する番号を選択して入力する方式を用いている。

入力された症状に基づき第5図に示す実線の矢印に従い原因探索が行われる。これにより8種類の原因候補が求まる。各原因候補の上の数字は(1)式により、症状が1つかつANDゲートがない場合について計算した推定原因の確度である。この例では因果関係の確度はすべて1である。

第7図に診断結果を示すが、「駆動水供給ライン流量制御不調」が確度0.9で推定される。より末端機器故障側の原因として、故障確率の大小による事後確率の相違に従い、「流量調節弁故障」が確度0.891で、その詳細原因として「弁座（シート）劣化」が確度0.81で最も確からしい原因と推定される。

(1) 機器名称を入力して下さい【駆】

- 1: 駆動ライン
- 2: 駆動水
- 3: 駆動水チェック弁
- 4: 駆動水フィルタ差圧指示スイッチ
- 5: 駆動水フィルタ差圧測定ライン
- 6: 駆動水フィルタ出口弁
- 7: 駆動水フィルタ入口弁
- 8: 駆動水ヘッド
- 9: 駆動水ヘッド圧力指示計

番号を入力して下さい【2】
該当機器がない場合 …… 送信
キャンセルの場合 …… 999

続きが有ります

(2) 事象名称を入力して下さい【圧力】

- 1: 圧力高

番号を入力して下さい【1】
該当事象がない場合 …… 999
キャンセルの場合 …… 999

終わり

(3) 機器名称 駆動水

事象名称 圧力高
フレームNo 00253

確度を入力して下さい【0.9】

確認OK? (Y/N) 【Y】

次の処理を選んで下さい【2】

- 1 …… 更に症状を入力する
- 2 …… 原因推定実行
- 3 …… キャンセル

※【 】内は保守員の入力、他はシステムからのメッセージ

第6図 対話形式による症状入力

(2) 見逃し症状の観測要請

第5図の例で推定原因から観測されるべき症状を推定すると、「制御空気空気源喪失」から「入ロスクラム弁誤開」が予測できる。そこで第8図に示すように、見逃し症状観測要請を出力する。

☆☆☆ 観 測 要 請 ☆☆☆

次の症状が観測される筈です。確認して下さい。
(なお、観測不可のものも参考のため出力してあります。)

〈上層故障モード〉

〈故障モード番号〉	〈機器名称〉	〈事象名称〉
運転中観測可能なもの		
FA-C12-5-003	スクラムパイロット弁	誤開
FA-C12-4-003	入ロスクラム弁	誤開
FA-C12-3-002	制御棒	挿入
定期検査中観測可能なもの		
定期検査中故障モード無し		
観測不可のもの		
観測不可故障モード無し		

第8図 見逃し症状の観測要請

(3) 原因同定

観測要請に従い観測した結果、「入ロスクラム弁誤開」が観測されその結果を観測確度0.8で入力した場合、すなわち症状が2つある場合を考える。2つの症状が共通原因により発生する場合を想定すると、両者から原因として推定されるものは制御空気関連のみとなる。その推定結果を第9図に示す。ここでは最も基本事象に近い「計装用圧縮空気系故障」を最も確からしい原因として推定する。

故障原因が通常観測不可能であり、保守員の操作により観測可能となる場合には、第10図に示すように、その点検手順を指示する。この手順は、保守員の原因確認に関するノウハウをまとめたものである。

☆☆☆ 原 因 推 定 ☆☆☆

★★ 入力されたJ個の症状の中で、K個が同一原因に基づく場合(確率論理)★★
(J=1, K=1)

★★ 入力症状 ★★

〈故障モード番号〉	〈機器名称〉	〈事象名称〉	〈症状観測確度〉
FA-C12-4-002	駆動水	圧力高	0.900

★★ 推定原因 ★★

〈故障モード番号〉	〈機器名称〉	〈事象名称〉	〈確度〉
第1順位 FA-C12-5-003	駆動水供給ライン	流量制御不調	0.900
第2順位 FA-C-2-6-004	流量調節弁	故障	0.891
第3順位 FA-C12-7-008	弁座(シート)	劣化	0.810

★★ 第1順位局所 FAULT TREE (最も確からしい原因) ★★

〈故障モード番号〉	〈機器名称〉	〈事象名称〉	〈確度〉
FA-C12-5-003	駆動水供給ライン	流量制御不調	0.900

可成りの確からしさで、次のものが原因であると考えられます。

〈第1層〉	〈第2層〉	〈第3層〉	〈第4層〉	〈第5層〉	〈第6層〉	〈第7層〉
				<001>	<002>	<003>
					<004>	
					<005>	<006>
					<007>	<008>

〈略番号〉	〈故障モード番号〉	〈機器名称〉	〈事象名称〉	〈観測可否〉	〈故障確率〉
001	FA-C12-5-003	駆動水供給ライン	流量制御不調	運転中	1.110E-03
002	FA-C12-6-004	流量調節弁	故障	定検中	1.100E-03
003	FA-C12-7-008	弁座(シート)	劣化	定検中	1.000E-03
004	FA-C12-7-009	弁体(ディスク)	異物噛込	定検中	1.000E-04
005	FA-C12-6-006	制御空気	空気源喪失	定検中	1.000E-05
006	FA-C12-7-001	計装用圧縮空気系	故障	運転中	1.000E-05

第7図 症状が1つの場合の原因推定

原因推定

★★ 入力された J 個の症状の中で, K 個が同一原因に基づく場合 (確率論理) ★★
(J=2, K=2)

★★ 入力症状 ★★

故障モード番号	機器名称	事象名称	症状観測確度
FA-C12-4-002	駆動水	圧力高	0.900
FA-C12-4-003	入口スクラム弁	誤開	0.800

★★ 推定原因 ★★

故障モード番号	機器名称	事象名称	確度
第1順位 FA-C12-7-011	計装用圧縮空気系	故障	0.980
第2順位 FA-C12-6-006	制御空気	空気源喪失	0.980

★★ 第1順位局所 FAULT TREE (最も確からしい原因) ★★

故障モード番号	機器名称	事象名称	確度
FA-C12-011	計装用圧縮空気系	故障	0.980

を成りの確からしさで, 次のものが原因であると考えられます。

第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	第7層
						<001>

略番号	故障モード	機器名称	事象名称	観測可否	発生確率
001	FA-C12-7-0011	計装用圧縮空気系	故障	運転中	1.000E-05

第9図 症状が2つの場合の共通原因推定

故障原因確認点検手順

原因推定 電磁切換弁 源洩(リーク) (C12-E121 PH1-099)
を同定するため, 以下の操作をして, 1印の現象を確認して下さい。

手順1

前準備 挿入側元弁	閉(閉塞)	(C12-E133 PH1-218)
前準備 引抜側元弁	閉(閉塞)	(C12-E134 PH1-218)
前準備 HCU内冷却水ゲート弁	閉(閉塞)	(C12-E514 PH1-218)
前準備 制御棒	連続引抜	(C12-A001 PH2-C12-089)
* 確認 駆動水流量指示計	作動	(C12-D093 PH1-068)

手順2

前準備 排水ゲート弁	閉(閉塞)	(C12-E132 PH1-218)
* 確認 駆動水流量指示計	不作動	(C12-D093 PH1-069)

第10図 推定原因確認の操作手順

機器保守優先度

★★ 第1順位故障発生時, 機器保守優先度推定 ★★

機器 C12-E154 排出側スクラムパイロット弁	故障確率	P = 0.0000110 (1/HR)
内訳 FATAL 不作動	PH1-069	(0.0000110)
保守優先度 10.33年		(90497.737 HR)

機器 C12-E155 給水側スクラムパイロット弁	故障確率	P = 0.0000660 (1/HR)
内訳 FATAL 不作動	PH1-069	(0.0000110)
破壊	PH1-087	(0.0000030)
解磁	PH1-230	(0.0000020)
誤開	PH1-227	(0.0000500)
保守優先度 1.72年		(15140.242 HR)

機器 C12-E157 スクラムドレン弁	故障確率	P = 0.0000011 (1/HR)
内訳 目詰り	PH1-123	(0.0000010)
誤動作	PH1-024	(0.0000001)
保守優先度 99.27年		(869648.476 HR)

第11図 保守優先度の推定

3. 保守優先度推定と保守法指示

保守優先度の推定では、推定原因が発生したという条件の下で機器の平均寿命、すなわち保守優先度を第11図のように表示する。

保守法指示では、第12図に示すように、修理・交換

すべき機器を修理・交換の可能性に従い分類し、保守優先度のランクの順に表示する。修理・交換する際は、必要に応じて故障機器の修理・交換の手順を表示する。交換の手順の1例を第13図に示す。

☆☆☆ 保 守 法 ☆☆☆

★★ 保守法（第一順位故障発生時）★★

運転中修理・交換指示
次の機器を運転中に点検し、必要なら修理・交換して下さい。
ランク別表示 $\lambda = \text{耐用限界 (0.000114)} (1/h)$

ランク 0	$P \geq \lambda$	
対象機器なし		
ランク 1	$\lambda > P \geq \lambda/2$	
対象機器なし		
ランク 2	$\lambda > P \geq \lambda/3$	
対象機器なし		
ランク 3	$\lambda > P \geq \lambda/4$	
対象機器なし		

定期検査中修理・交換指示
次の機器を定期検査中（または、停止時）に点検し、必要なら修理・交換して下さい。
ランク別表示 $\lambda = \text{耐用限界 (0.000114)} (1/h)$

ランク 0	$P \geq \lambda$	
SYP052		計装用圧縮空気系
C12-D026		スクラムパイロット弁
C12-E163		入口スクラム弁
C12-E164		出口スクラム弁
C12-E165		計装制御空気配管
C12-D029		スクラムベント弁

第12図 保守法指示

☆☆☆ 故障機器交換手順 ☆☆☆

★★ 電磁切換弁 C12-D012(C12-E120-123)★★

手順1 取り外し

- (1) 弁に水圧が加わっていないことを確認
- (2) ソレノイド部より、プラグを除去
- (3) 切換弁をマニホールドに取り付けている4本のボルトを除去
- (4) 切換弁とOリングを除去

手順2 取り付け

- (1) 手順1の逆の順序で実施
- (2) 流量調整弁を交換した時は、制御棒駆動機構の速度が適正となるよう、流量調節機構により流量を調整

第13図 故障機器の交換手順

Ⅳ. 検 討

保守の専門家は、故障を診断する際、修復の内容・時期を判断するため、故障の程度（進み具合）を考慮している場合もある。本システムでは、故障の進み具合は信頼性の指標ほど明確に表わせないため、診断あるいは保守優先度決定へは反映させていない。故障の程度の判定とそれに基づく修復の内容・時期の判断は、保

守員に委ねている。なお、本システムでは故障の程度やあいまいな徴候を症状の観測確度として表わすことができるので、あいまい診断⁽⁷⁾と同等の診断能力を持つ。

保守の専門家はまた、診断の際故障による影響も考慮している。本システムでは、故障による影響（故障の重要度）は、機器の故障モードの相違（例えば、配管の漏洩あるいは破断）として考慮することができる。保守優先度は、故障が発生したという条件の下での各機器の故障モードがプラント（システム全体の故障モード）へ与える影響を評価して決める。

本システムは結論に関する客観性を必ずしも保証できないというエキスパートシステムに固有の問題を持っている⁽¹¹⁾ので、保守員が最終判断をするために診断の根拠を示すことが要求される。また原子力プラントの場合、運転中点検不可能な機器があり、より詳しい診断ができないこともあるので、保守員が診断結果から最終判断する必要がある。このため、診断結果を表示する際には、因果関係や故障率等の診断の根拠を

詳細に示してある。さらに故障原因を確認できる場合には、その手順を示すことにより正確な診断ができる。また、上記表示例に示すように保守員は入出力端末上で漢字カナ混り文を用いて対話形式で故障情報の入力が行え、保守法の指示が得られる。この際、画面上には診断結果だけでなく原因を確認するための点検手順や修理・交換の手順も指示されるため、保守員は容易に事態を把握し、実施すべき保守の内容を理解できる。

制御棒駆動系の知識ベースは、フレーム数：約350、ルール数：約500である。本章で示した例も含め、典型的な10種類の故障要因を想定し、故障を診断し修理交換の時期を決定した。その診断結果を保守の専門家が検討し、知識の内容の整合性を検証した。さらに、故障確率に基づき、より末端機器故障側の原因を推定する方法の有効性および症状観測を繰り返す診断の過程の妥当性を確認した。また、保守優先度に基づく交換の指示が妥当であることを確認した。今後、使用経験を積み知識を充実してゆく。

原因推定および修理・交換時期の決定に要した平均のCPU時間は、計算速度15 MIPSの計算機で約30sである。対話形式での利用を考えるとより一層の時間短縮が望まれるが、それには故障症状が入力された時、すべてを再計算せずに影響を受ける箇所のみ計算する方法等により対処可能である。

本システムの知識ベースに他系統の知識を追加することにより、対象系統の拡大は容易である。

V. 結 言

プラント機器の保守に関するノウハウや故障実績データを有効に活用して、機器の故障原因を診断し保守法を提示することにより、保守員の保守作業を支援するエキスパートシステムを開発した。本システムの特徴を以下にまとめる。

- (1) 診断・保守に必要な知識の表現に構造化されたフレーム型式を用いたため、知識の取扱いが容易である。
- (2) 故障診断機能は以下の特徴を持っている。
 - (a) 原因推定に、症状の確度と因果関係の確度だけでなく、原因となる機器の故障確率も考慮に入れることにより、最も確からしい原因を選択できる。

(b) 原因推定の際、共通原因故障のみでなく多重原因故障も考慮できる。この際、共通原因故障を推定原因として優先させる。

(c) 冗長系のように複数の故障により初めて症状が現れる場合でも、ミニマルカットセットを用いた演算により原因推定が行える。

(d) 原因推定結果を確認するために必要な点検手順を表示するので、容易に故障原因を確認できる。

(3) 保守優先度推定部・保守法指示部では、推定原因となる故障が発生したという条件の下で、故障率から平均寿命を求め、これを保守優先度として示す。保守員は指示された手順に従い機器の修理・交換ができる。

(4) 漢字カナ混り文を用いた対話形式により、故障を診断し保守法を決定できる。

BWRの制御棒駆動系を対象として知識ベース(フレーム数：約350、ルール数：約500)を作成し、本システムを用いて代表的な10ケースの故障について診断し保守法を決定した。その結果が妥当であることを保守の専門家により確認した。

最後に、本研究の基本的な考え方に関して有益な討論を頂いた日立製作所 基礎研究所の元田 浩氏、同 エネルギー研究所の山田直之氏ならびに知識ベースの整備に協力して頂いた同 日立工場の下川広実氏に感謝します。

— 参 考 文 献 —

- (1) SHORTLIFFE, E.H.: "Computer-Based Medical Consultations: MYCIN", (1976), American Elsevier.
- (2) 木口高志, 他: 原子力誌, 25(4), 298 (1983).
- (3) 塩見 弘: "信頼性工学", (1984), 朝倉書店.
- (4) ROBERTS, R.B., GOLDSTEIN, I.P.: MIT AI memo 409, (1977).
- (5) SHORTLIFFE, E.H., BUCHANAN, B.G.: Math. Biosci., 23, 351 (1975).
- (6) 田中幸吉: "知識工学", (1984), 丸善.
- (7) 村上雄二郎, 寺野寿郎: システムと制御, 24(11), 719 (1980).
- (8) YOSHIOKA, K., FUKUNISHI, K.: J. Nucl. Sci. Technol., 20(9), 733 (1983).
- (9) 荻野敬迪, 他: 原子力誌, 25(10), 822 (1983).
- (10) PANDE, P.K., et al.: ORC 75-3, (1975).
- (11) 上野晴樹: "知識工学入門", (1985), オーム社.