

JAERI - M
90-207

研究炉異常診断予測システムの開発

—早期異常検知スクラム回避エキスパートシステムの試作—

1990年11月

横林 正雄・松本 潔・村山 洋二
神永 雅紀・鴻坂 厚夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株原子力資料サービス

研究炉異常診断予測システムの開発
— 早期異常検知スクラム回避エキスパートシステムの試作 —

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

横林 正雄・松本 潔・村山 洋二⁺

神永 雅紀⁺・鴻坂 厚夫⁺⁺

(1990年10月25日受理)

早期異常検知エキスパートシステムのパイロットシステムを開発した。早期異常検知エキスパートシステムは、原研の研究炉(JRR-3)を対象にした異常時診断予測システムのサブシステムの一つである。本パイロットシステムの機能は、早期に定常からのずれを検知し、原因の同定、スクラム作動の可能性の予測と可能ならばその回避のための手順を運転員に提供することである。

本パイロットシステムの開発に当たっては、原研で開発した異常診断エキスパートシステムDISKETに対して次のような拡張を行った。

- ・ フレーム構造を従来のDISKETの知識ベースの構造の一部に取り入れることにより推論をより効率的に行う。
- ・ ルールの中で使用する数値を数式を用いて算出する。

本システムの性能を過渡事象を用いて評価したところ、検知された定常からのずれの原因が同定され、スクラム作動の時間余裕がスクラム回避のための手順と共に示され、外乱発生初期に対し、本手法は有効であることがわかった。

本報告書は、早期故障検知エキスパートシステムの試作とその評価結果について述べたものである。

Development of Accident Diagnosis and
Prediction System for Research Reactor

- A Pilot System of Early Fault Detection
Expert System to Reduce Scram Frequency -

Masao YOKOBAYASHI, Kiyoshi MATSUMOTO, Yoji MURAYAMA⁺
Masanori KAMINAGA⁺ and Atsuo KOHSAKA⁺⁺

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 25, 1990)

A pilot system of early fault detection expert system has been developed. The early fault detection expert system is one of subsystems in the accident diagnosis and prediction system for the research reactor JRR-3 in JAERI.

Functions of the pilot system are to detect deviations of process parameters from the steady state in the early stage of the transient and, if possible, to provide procedures to operators to avoid scram actuation. The reactor accident diagnosis system, DISKET, which had been developed in JAERI, was applied for developing the pilot system by extending functions as follows.

- (1) A frame structure has been introduced to a part of the knowledge base of DISKET in order to infer efficiently.
- (2) Numerical equation has been introduced to rule representation in order to calculate numerical value for rules.

The pilot system was tested against some simulated transients to validate the effectiveness of the extension mentioned above as well as

⁺ Department of Research Reactor Operation
⁺⁺ Office of planning

the performance of the system.

This report describes development of the pilot system and the results of the test.

Keywords: DISKET System, Expert System, Accident Diagnosis,
Prediction, JRR-3, Scram Reduction

目 次

1. 緒 言	1
2. 診断の方法	3
2.1 パイロットシステムの概要	3
2.2 改良点	4
2.2.1 計算式の導入	4
2.2.2 フレームの導入	5
2.2.3 推論の制御	6
3. 診断実行例	12
3.1 冷却塔ファン故障	12
3.2 1次冷却材の重水タンクへの漏洩	13
3.3 複合事象の診断	14
4. 結 言	23
謝 辞	23
参考文献	24

Contents

1. Introduction	1
2. Diagnosis methodology	3
2.1 Overview of pilot system	3
2.2 Extension of DISKET functions	4
2.2.1 Numerical equation	4
2.2.2 Frame	5
2.2.3 Control of inference	6
3. Validation of methodology	12
3.1 Cooling fan failure case	12
3.2 Primary coolant leakage to heavy water tank case	13
3.3 Diagnosis for double failure case	14
4. Conclusion	23
Acknowledgment	23
References	24

1 . 緒 言

人工知能の応用分野である知識工学を原子力プラントに応用したシステムが種々開発されてきた。日本原子力学会誌を中心に最近の5年間の論文によると、異常診断^{1)~5)}、運転ガイドランスや保守管理^{6)~12)}、制御^{13),14)}等を挙げることができる。他誌も含めてみると保守管理システムに比べて異常診断に関するシステムが相対的に少ない。これは、静的な事象と異なり過渡現象の場合、データの時間変化をルールで表現することが難しいこと、異常原因の速やかな同定のために効率的な推論の工夫が必要であることなど解決すべき研究課題が多いことによるものと考えられる。

このような研究課題を解決すべく日本原子力研究所(原研)では知識工学を応用した原子炉の異常診断システムの開発を1981年度から開始し¹⁵⁾、1985年度までに原子炉異常診断システムDISKET^{1),16)}を開発した。

DISKETシステムはFig. 1.1に示すように推論機構IERIASと知識ベースとから成っている。推論機構は図の黒矢印で示すようにプラントのプロセスデータを基に知識ベース内の情報を用いて事故の原因、種類を同定する。知識ベースには図の白矢印で示すようにプラントの弁、ポンプの作動条件、警報の設定値等の設計条件の他、計算コードによる解析から得られる過渡応答の特徴等の情報が集大成されている。DISKETシステムは、時間の経過に伴う変化を考慮したルール表現が可能なこと、ルールをいくつかの知識ユニットに分割し効率的な推論ができること、使用言語はLISPの一方言であるUTILISP¹⁷⁾を用いていること等の特徴を有しており、上記の研究課題に対する一つの解決策を示している。

DISKETシステムを用いPWRプラントシミュレータを対象に知識工学に基づく原子炉の異常診断手法が有効であることを確認した。

次のステップとして現在、原研が所有する研究炉JRR-3 (Japan Research Reactor -3) を対象に知識工学を用いた異常診断手法の実用化研究を進めている。DISKETを研究炉に適用する研究目的は主に、DISKETの手法の実機による検証であると同時に、知識工学的手法を用いた診断システムの実装後の使用経験から修正点、問題点等を摘出し、同手法の改良を図ることにある。

本報告書ではJRR-3にDISKETを適用した異常診断予測システムが持つ機能の内、スクラム回避を目指したエキスパートシステムの試作結果^{18),19)}について述べている。

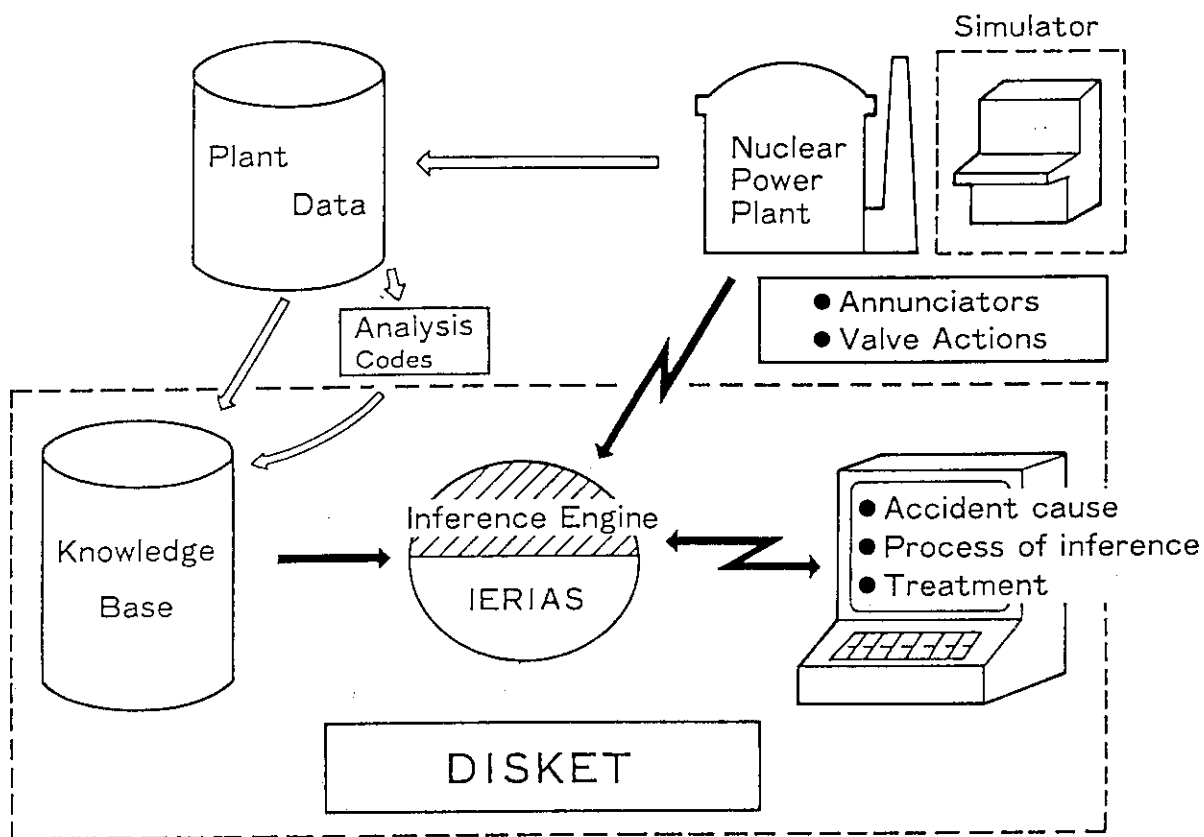


Fig.1.1 Concept of DISKET system

2. 診断の方法

2.1 パイロットシステムの概要

JRR-3を対象にしたDISKETを中心とする異常診断予測システムの概念をFig. 2.1に示す。知識ベースには、国内外の研究炉の事故・故障情報を格納したデータベースシステムIDAS-RR²¹⁾内の情報に基づく知識、研究炉動特性シミュレーションコードTHYDE-JRR3²²⁾等を用いた異常事象解析の結果及び研究炉の設計、運転等に関する情報から得られる知識が収納される。推論機構IERIASには、小型計算機にインストールしてオンライン診断システムとして用いることができるようにFORTRAN言語により書き直したバージョン^{3), 20)}を用いている。また、事象の進展を予測するための高速計算コード²³⁾が含まれていることが本システムの特徴の一つである。

JRR-3の使用目的は材料の照射試験であり、一様な照射条件を維持するためには原子炉の安定な運転を確保することが重要である。そこで、Fig. 2.1に示す研究炉異常診断予測システムでは、Fig. 2.2のように早期故障検知、信号の有効性の確認、スクラム回避用診断、詳細異常診断及び事故の進展予測の各機能が必要となる。この内のスクラム回避用診断のエキスパートシステムを試作した。スクラムは照射を中断させるため、安全性を損なわぬ限り極力避ける必要があり、そこで、本パイロットシステムはこれを支援するためのエキスパートシステムである。

本パイロットシステムで用いている診断手順をFig. 2.3に示す。先ずスクラム項目の設定値として用いられている種々の計測値の定常値からのずれをチェックし、それらのうちの一つが有意の値を越えた場合に異常発生と判断し種々のスクラム条件についてスクラム作動に到るまでの時間を計算する（計算方法は第2.2.2節で述べる）。計算結果から各スクラム条件項目のうちスクラム作動までの時間余裕が最短の項目を抽出し、この項目を起点として原因となる故障箇所の推論を実行する。実行方法の詳細は、次節で述べる。

このような機能を持つパイロットシステムを実現させるためには次項が必要である。

①スクラム作動までの時間余裕等の計算や計算結果の利用を知識ベース内で取り扱うことができるようにする。

②スクラム作動までの時間余裕が最短の項目を起点として、その項目でスクラムに至る理由を追求するためには、多くのルールを並べて順次検索するのではなく、温度や水位などの主要変数の変化の原因を記述したルールを変数毎にひとまとめにして取り扱うことができるようにする。

上記の①については計算式の導入を、②については変数毎にルールをひとまとめにして取

り扱うためにフレームの概念（2.2.2節参照）を導入することで解決を図っており、これら2つが従来のシステムと異なる点である。

このためにDISKETに対し次のような拡張を行った。詳細は次の2.2節で述べる。

なお、本パイロットシステムはFACOM M-780計算機上で稼働しており、現在フレーム数27、ルール数84である。

2.2 改良点

2.2.1 計算式の導入

従来の診断用エキスパートシステムには、専門家が持つ経験的知識を用いた診断が行われてきた。しかし、複雑な系の種々の事象に対応した診断を行うためには、経験的な浅い知識だけでなく、物理現象等に関する深い知識を用いて状況に応じて対処する方法が試みられている²⁴⁾。そこで、浅い知識だけでなく数式を用いたスクラム作動時間の計算、物理法則によりある点の圧力と流量から別の点の圧力の算出、プロセス量から相関式を用いた他の状態量の推定等を行い、かつルールにその数式を用いれば、より詳細な知識表現をすることができる。例えば重水濃度が変化したとき中性子束検出器の測定値の変化は、Fig. 2.4で示され、これを重水濃度の3次式で表すときは、

```
*EQUATION DFLUX : ESTIMATED DELTA FLUX AS A FUNCTION OF HEAVY WATER CONCENTRA.
DFLUX=-4.91667E-2*CONHW**3+13.6725*CONHW**2-1270.46*CONHW+39487.7
```

のように定義し、これをルール表現の中で、

```
E(DFLUX,0.05:*) & FR(CRDWITHD,F) -> GOTO FR(CRDWITHD) (R-1)
```

のように記述する。ここでEは数式を、FRはフレームを意味する。このルールは

「数式DFLUXが0.05以上になり、且つフレームCRDWITHD（制御棒引き抜き）が未検素(False)ならばフレームCRDWITHDを検索せよ」

という意味である。

次にスクラム作動に到るまでの時間余裕の計算について述べる。本パイロットシステムではスクラム条件として以下の項目を用いている（定格値は計算コードによるヒートバランスから求めた値である）。

(スクラム条件項目)	(設定値)	(定格値)
・中性子束高	110%	100%
・一次冷却材流量低	2040m ³ /hr	2400m ³ /hr
・炉心出口温度高	50℃	39℃
・炉心出入口温度差大	7.7℃	7.0℃
・原子炉プール水位低	-50cm	0cm
・重水温度高	50℃	38.7℃
・重水流量低	59.5m ³ /hr	70m ³ /hr
・重水溢流タンク水位高	5cm	0cm

スクラム作動までの時間はスクラム設定値までの変化余裕とそのパラメータの変化率とから次式で計算している。

$$\Delta t = (P - P_{SET}) / G_P \quad (1)$$

ここで、

- Δt : スクラム作動まで時間余裕
- P : スクラム条件に用いるパラメータ
- P_{SET} : スクラム設定値
- G_P : パラメータの変化率

計算では零割を避けるために除数 (G_P) に 1.0×10^{-20} 以下は 1.0×10^{-20} のリミットを設けている。各スクラム条件項目に対するこれらの計算は全て知識ベースの中で EQUATION として定義しルール中に記述している。

2. 2. 2 フレームの導入

DISKETの知識ベースは前述のようにいくつかのルール群を知識ユニットとして分割して取り扱うことができる。本システムでは定常からのずれを検知し、スクラム作動までの時間余裕を計算するルール群と故障原因を同定するルール群とに分け Fig. 2. 5 に示すようにそれぞれ知識ユニット 1、2 とする。知識ユニット 1 では計算された時間余裕が最小となるスクラム項目を決定するところまでを扱う。知識ユニット 2 では故障原因の同定を扱い、このために全節②で述べたように「炉心入口温度上昇」などの主要パラメータの挙動毎に「出力が上昇したため」などの直接の原因をフレームの形で記述する。フレーム方式を用いると、主要変数の変化の原因から原因へと移る方式を取ることで事象のシナリオを予め想定しておく必要がないと言う利点がある。

一般に知識ベースにフレームを用いるときのデータ構造に関しては、スロット名、スロット値、インヘリタンス（性質の継承）、デモン（手続きの起動）などがよく用いられる。本報告で用いたフレーム構造ではDISKETの知識ベースで用いているルール表現を最大限生かして、Fig. 2.6に示すような形で定義している。即ち、DISKETではIF-THENタイプのプロダクションルールを

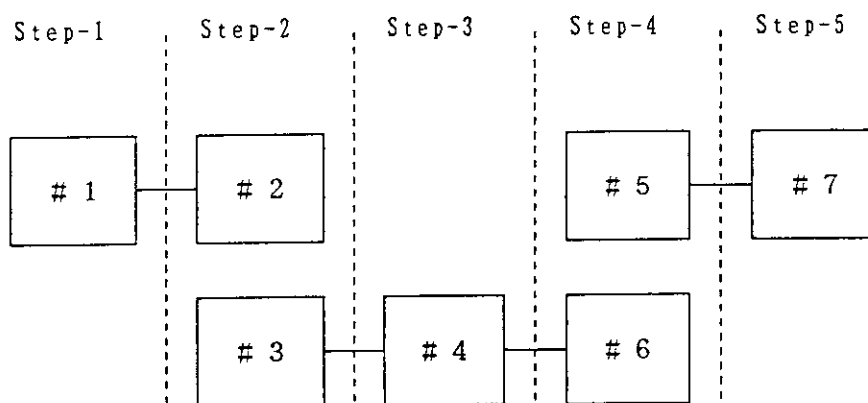
条件部 → 結論部

の形で表している。条件部と結論部の種類がスロットの種類に、条件部の値がスロット値に、実行部の内容がデモンの内容に対応している。図の例では条件部を満足すればフレームkへ行くことを意味している。

2. 2. 3 推論の制御

一つのフレームから関連する他のフレームへの移行のときに、無限ループの問題がある。例えば「炉心出口温度上昇」のフレームから関連するフレームを検索しているとき、原因の一つに「炉心出口温度上昇」が出てくればこの名前のフレームに戻ることで無限ループに陥る。そこでこれを避けるために、一度検索したフレームは再検索しないという条件を付けた。前記のルール(R-1)で、「フレーム CRDWITHD が未検索なら」の条件が使用されているのはこのためである。

また、一つのフレームから複数のフレームへの移行は、



のように各ステップ終了後に次のステップへ移る。

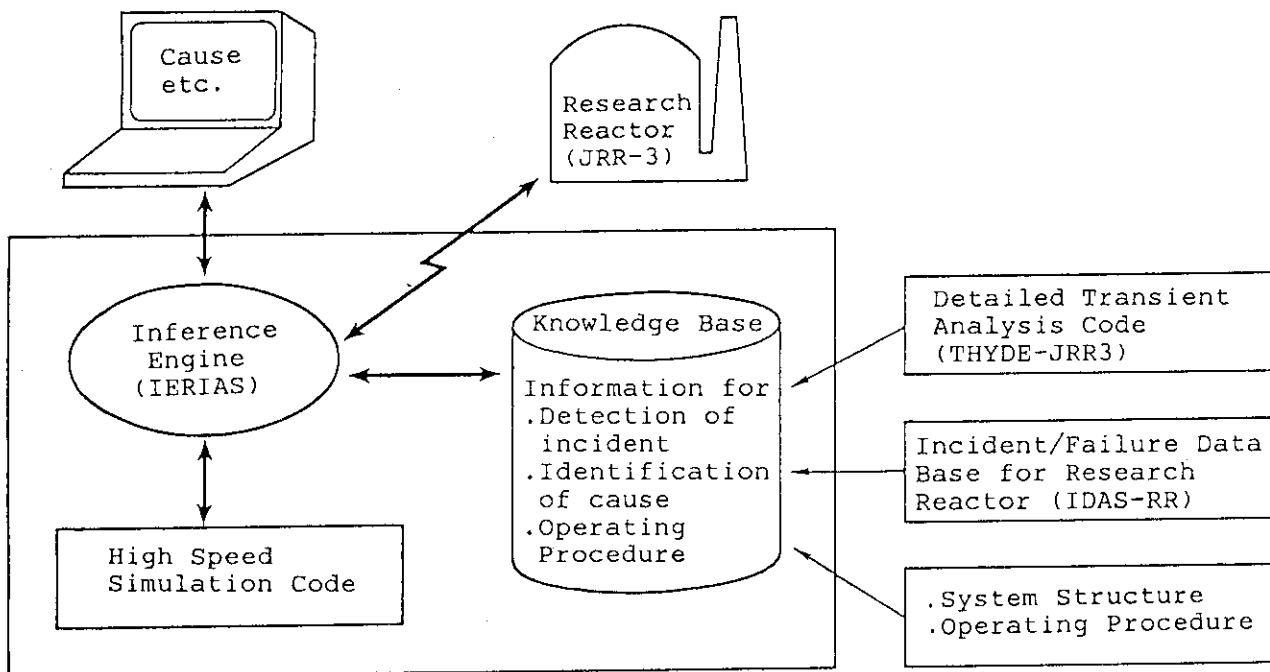


Fig.2.1 Application of DISKET to JRR-3

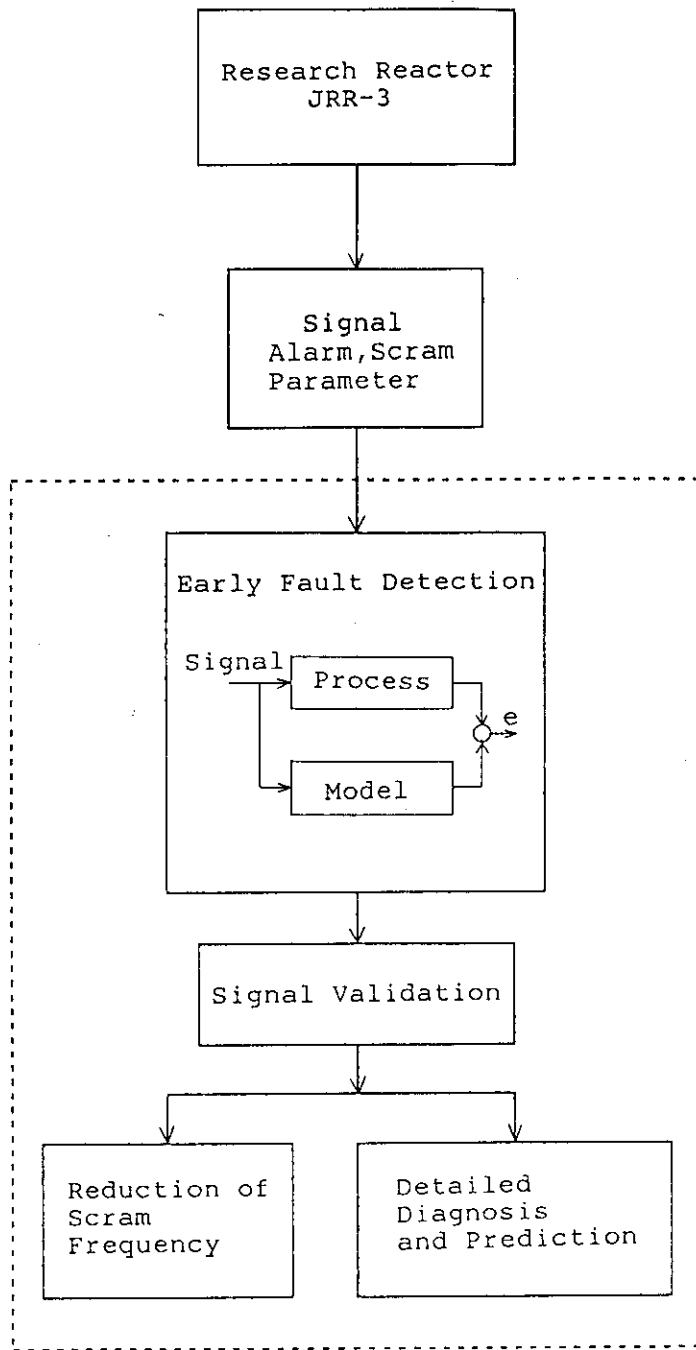


Fig.2.2 Functions of accident diagnosis and prediction system for JRR-3

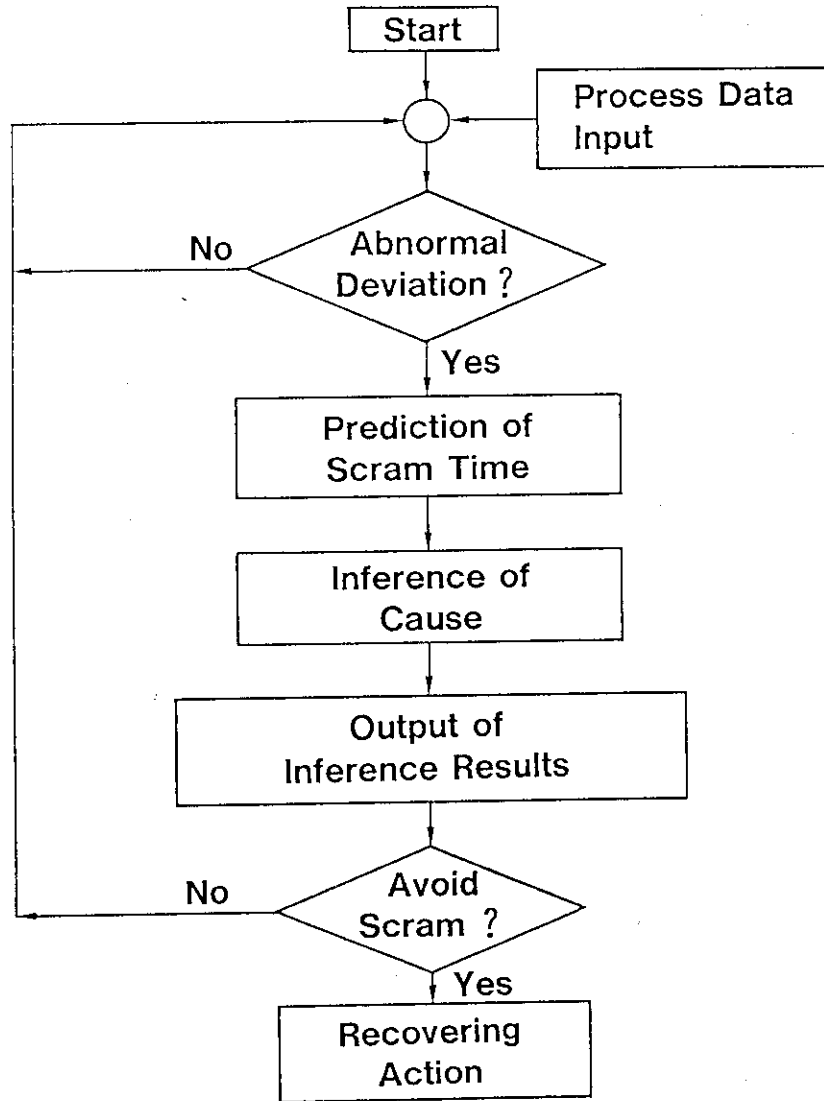


Fig.2.3 Diagnosis procedure for reduction of scram frequency

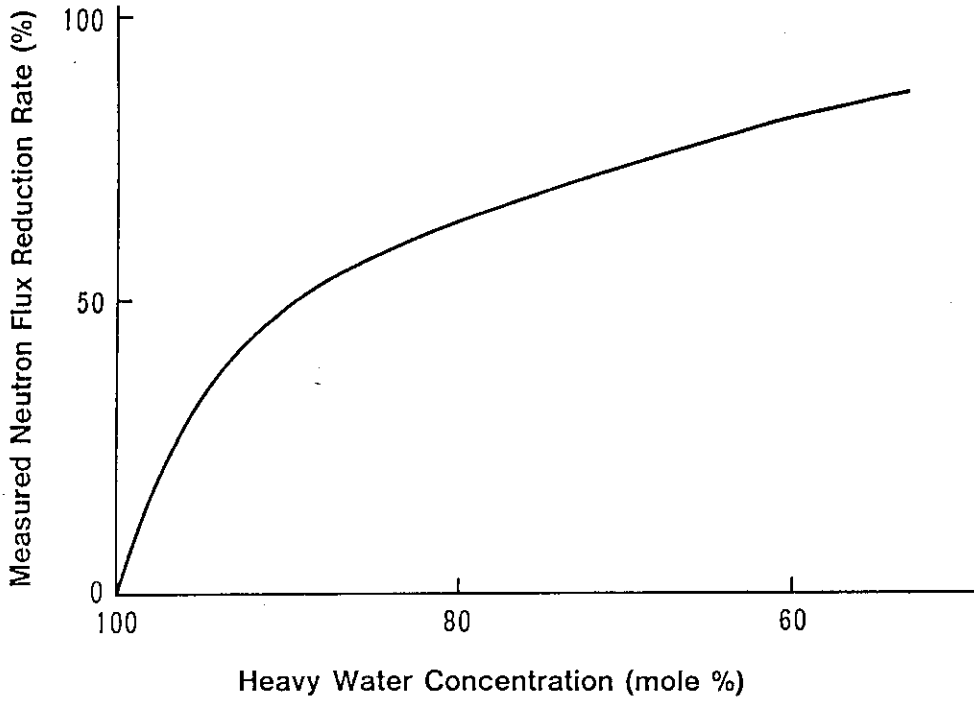


Fig.2.4 Relation between heavy water concentration and reduction rate of measured neutron flux

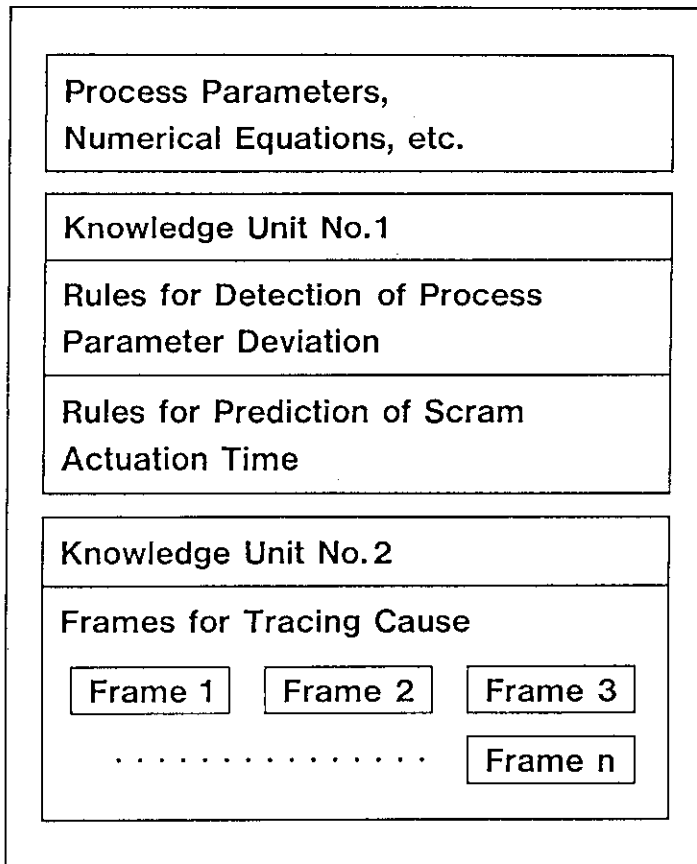


Fig.2.5 Structured knowledge base for reduction of scram frequency

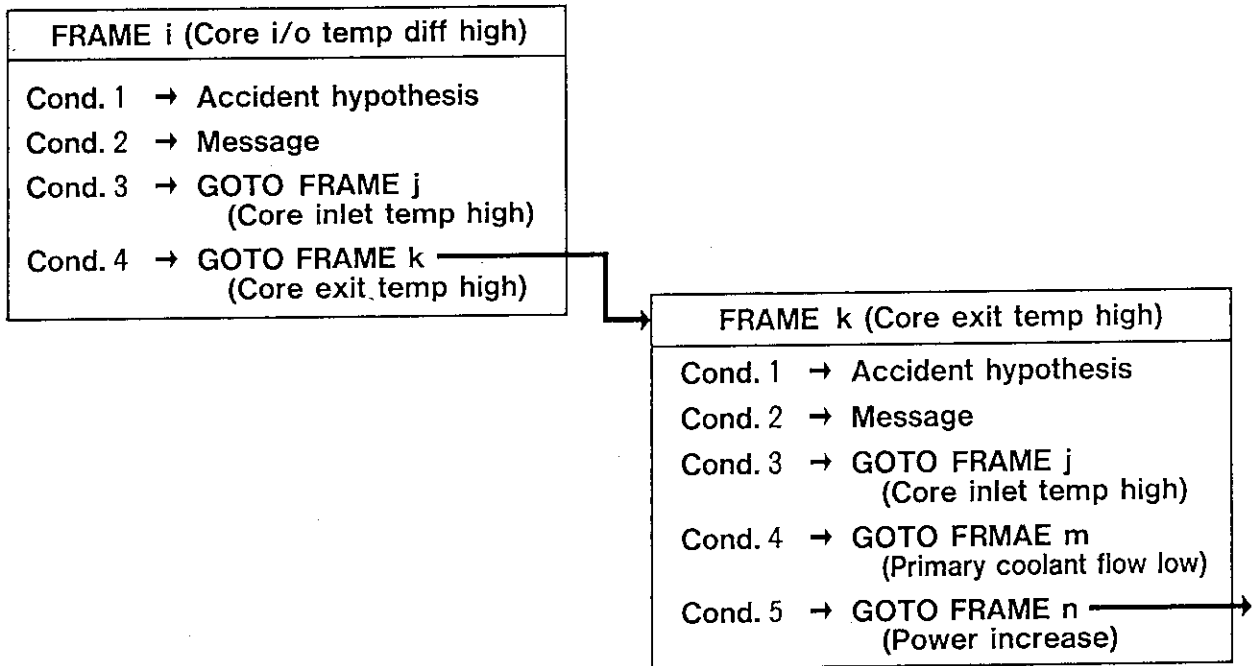


Fig.2.6 Frame definition and control in DISKET

3. 診断実行例

JRR-3は出力20MWの軽水冷却重水反射体付プール型原子炉で、各種の照射試験、ビーム実験を行うための研究炉である。

JRR-3はFig. 3.1に示すように大きく分けて1次系、2次系、重水系と3つの系統から構成されている。1次冷却水及び重水は自由水面でヘリウムと接しており、これらの冷却水の熱は熱交換器を通して2次冷却水に伝達され冷却塔ファンにより冷却される。

パイロットシステムを評価するために、冷却塔ファン故障、1次冷却材の重水タンクへの漏洩及び両者の複合事象の3ケースを行った。以下にその結果について述べる。

3.1 冷却塔ファン故障

冷却塔ファンが故障（回転数の低下）した場合の主要な過渡応答をFig. 3.2に示す。冷却塔の冷却能力低下により2次冷却材温度が上昇するため冷却塔ポンドの冷却水出口温度も上昇する。それに伴って1次側及び重水側の除熱が悪くなりこれらの温度も上昇する。

本パイロットシステムでは、前述のようにスクラム設定値に用いられているパラメータの定常からのずれをチェックしており、早期異常として「炉心出口温度」の増加が検出され、検出時間からスクラム作動までの時間余裕は(1)式の計算により約7400秒と予測された。このとき、他のスクラム項目については、次のようにスクラム時間余裕が計算されている。10²⁰近傍の時間が示されているのは、前述したように(1)式の零割を避けるために分母の値に10⁻²⁰のリミットを設けているためであり、有意な値は10⁵~10⁸秒以下である。

・ 中性子束高	1.0x10 ²¹	(秒)
・ 一次冷却材流量低	3.6x10 ²²	
・ 炉心出口温度高	7.4x10 ³	
・ 炉心出入口温度差大	7.1x10 ¹⁹	
・ 原子炉プール水位低	5.0x10 ²¹	
・ 重水温度高	9.1x10 ³	
・ 重水流量低	1.1x10 ²¹	
・ 重水溢流タンク水位高	5.0x10 ²⁰	

推論結果として異常原因「冷却塔ファン故障」が同定され、その対応策として「冷却塔ファンの運転モードを手動にしてファン回転数を調節せよ」のメッセージが示された。

Fig. 3.3に異常原因の同定結果、スクラム作動時間のうち最短のスクラム項目とその場合の対応策が順に示されている。

推論過程で使用されたフレームを追跡してみると、Fig. 3.4に示すように「炉心出口温度上昇」から開始され、その原因の「炉心入口温度上昇」、「炉心流量低下」、「炉心出力（中性子束）上昇」を順次チェックして条件部を満足した項目である「炉心入口温度上昇」のフレームへ移り、さらに「熱交換器能力低下」、「2次冷却材温度上昇」とたどり最後に5つめのフレーム「冷却塔機能低下」に到っている。異常原因が同定された後は、Fig. 3.3のメッセージにより冷却塔ファンの運転モードを手動に切り換えファン回転数を調節すれば冷却材温度は、徐々に正常値へ回復していきスクラム作動を回避することができる。Fig. 3.5はメッセージ表示後5分でファン回転数を調節した場合の過渡応答を解析コードにより計算した結果である。

3. 2 1次冷却材の重水タンクへの漏洩

1次冷却材が重水タンク側へ漏洩した場合の主要な過渡応答をFig. 3.6に示す。まず重水濃度の低下により、重水の反射体としての効果が低下する。これにより重水タンクの外側に設置されている中性子束検出器による測定値が低下する。しかしこの測定値は検出器が設置されている位置での値であり、炉心内の中性子束はあまり変化していない。原子炉は出力制御系により中性子束が一定に保持できるように運転されているため、測定値の減少分だけ制御棒が引き抜かれ、中性子束検出器による測定値が低下しているにも拘らず、炉心内の中性子束は増加する。従ってFig. 3.6に示すように中性子束は炉心における値と測定値の差が大きくなり、この中性子束上昇により炉心出口温度は上昇する。また1次冷却材が重水側へ混入するため重水溢流タンクの水位が上昇する。

このような特徴をもつ過渡応答に対し、まず早期異常として「炉心出入口温度差」の増加が検出され、かつ「1次冷却水の重水系への漏洩」が同定され「原子炉の運転を停止せよ」のメッセージが提示される。

早期異常が検知されたときの各スクラム項目については、次のようにスクラム時間余裕が計算されている。

・ 中性子束高	1.0×10^{21}	(秒)
・ 一次冷却材流量低	3.6×10^{22}	
・ 炉心出口温度高	4.7×10^3	
・ 炉心出入口温度差大	1.3×10^2	
・ 原子炉プール水位低	5.0×10^{21}	

・ 重水温度高	1.0×10^4
・ 重水流量低	1.1×10^{21}
・ 重水溢流タンク水位高	4.3×10^2

この中からスクラム時間余裕が最小の項目として「炉心出入口温度差大」が抽出された。

実行された推論過程を追跡すると、Fig. 3.7に示すように「炉心出入口温度差大」のフレームから出発し、「炉心出口温度上昇」、「炉心出力（実際の中性子束）上昇」、「制御棒引き抜き」、「照射材料による反応度上昇」、「炉心出力（中性子束検出器）低下」、「照射材料による反応度低下」、「重水濃度低下」の8つのフレームをチェックして結論に到っている。但し、この場合は異常原因が漏洩であるため原子炉は停止せざるをえない。

3. 3 複合事象の診断

次にこれら2つの過渡応答の外乱を同時に加えた場合には、上記2つを組み合わせた過渡応答になる。（但し、推論機能のチェックのためスクラムは設定値を越えても作動させていない。）早期に異常が検出されるのは応答の速い「炉心出入口温度差」の増加であり、推論はこの項目から開始され「1次冷却水の重水系への漏洩」が同定される。推論の過程で「炉心出口温度高」が検出された後は3. 1節の過程をたどり「冷却塔ファン故障」が同定される。しかし、それ以前に1次冷却水の漏洩から「原子炉の停止」が提示されている。この推論過程をFig. 3.8に示す。12のフレームを検索することにより2つの外乱が同定されており複合事象の診断も可能であることが示された。

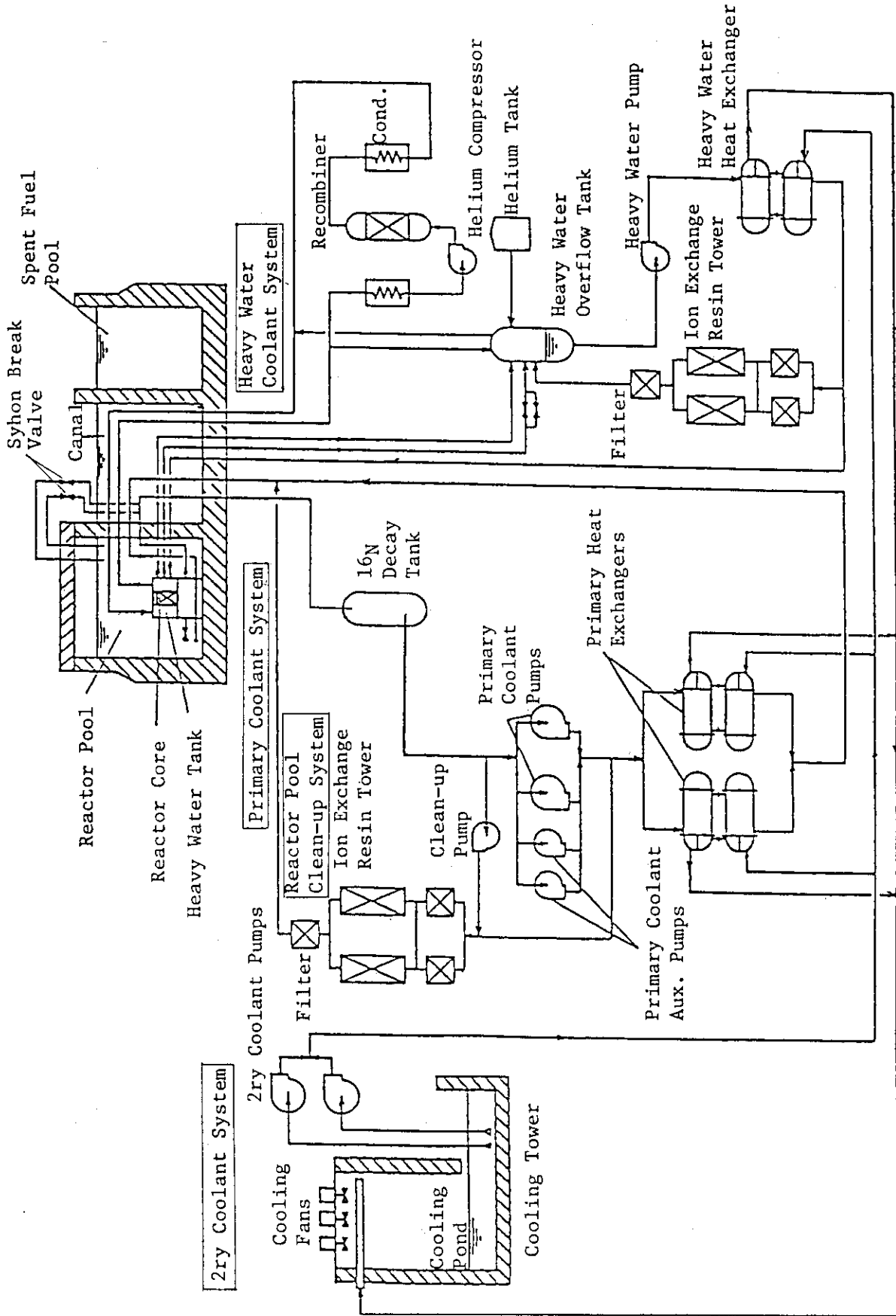


Fig.3.1 JRR-3 overview

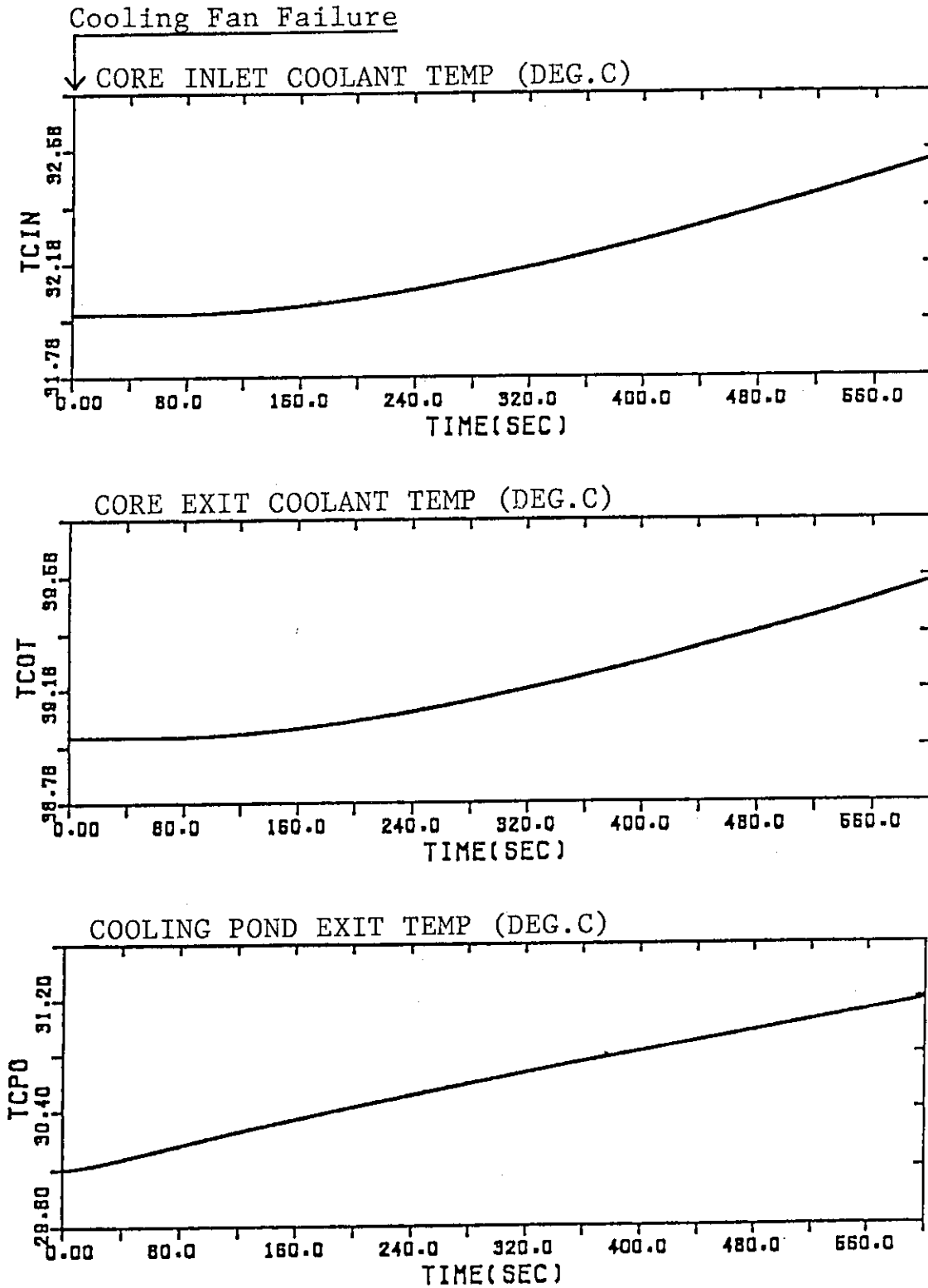


Fig.3.2 Transient responses following cooling fan failures

*** ACCIDENT HYPOTHESIS *** (- GRADE 2 -)

CF	MNEMONIC	DESCRIPTION
0.86	CLGFFREQL	COOLING FAN FREQUENCY LOW

***** MESSAGE *****

PREDICTED SCRAM TIME DUE TO CORE EXIT TEMP HIGH [SEC]
7436.0

***** MESSAGE *****

COOLING TOWER CONTROL SYSTEM ABNORMAL
CHANGE INTO MANUAL MODE
ADJUST FAN FREQUENCY

Fig.3.3 Diagnosis result for cooling fan failure

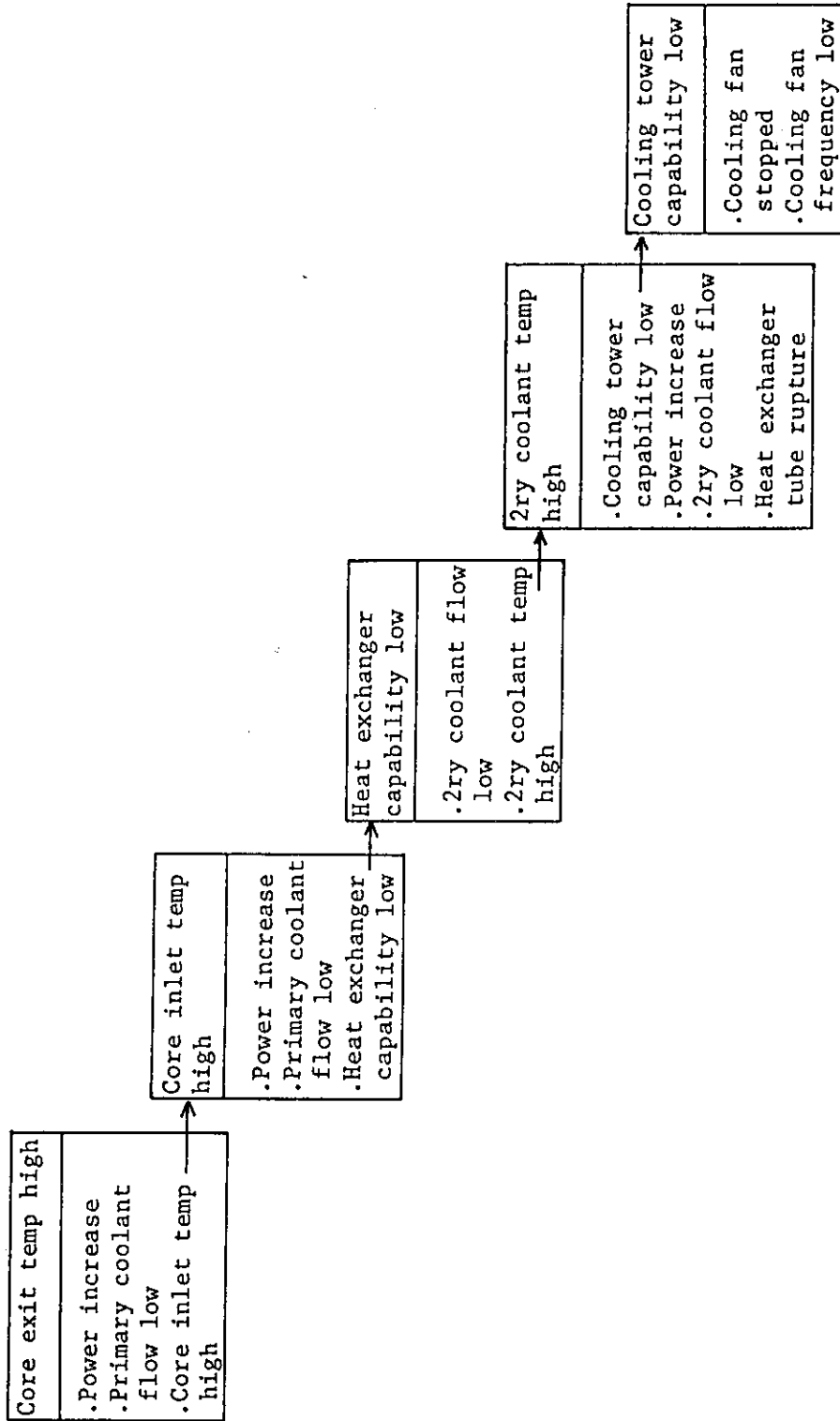


Fig.3.4 Trace of inference for cooling fan failure

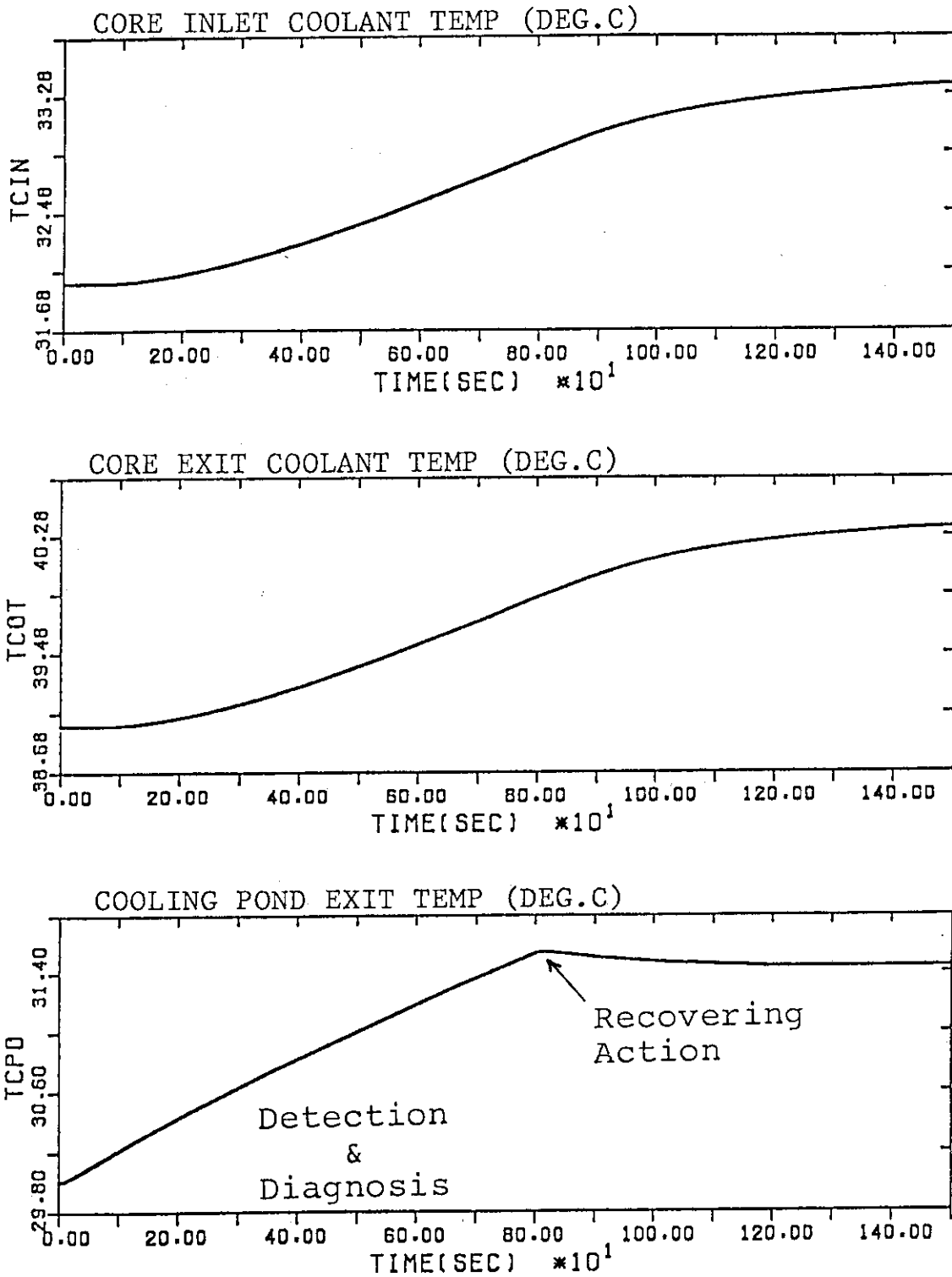


Fig.3.5 Transient responses to recovery action

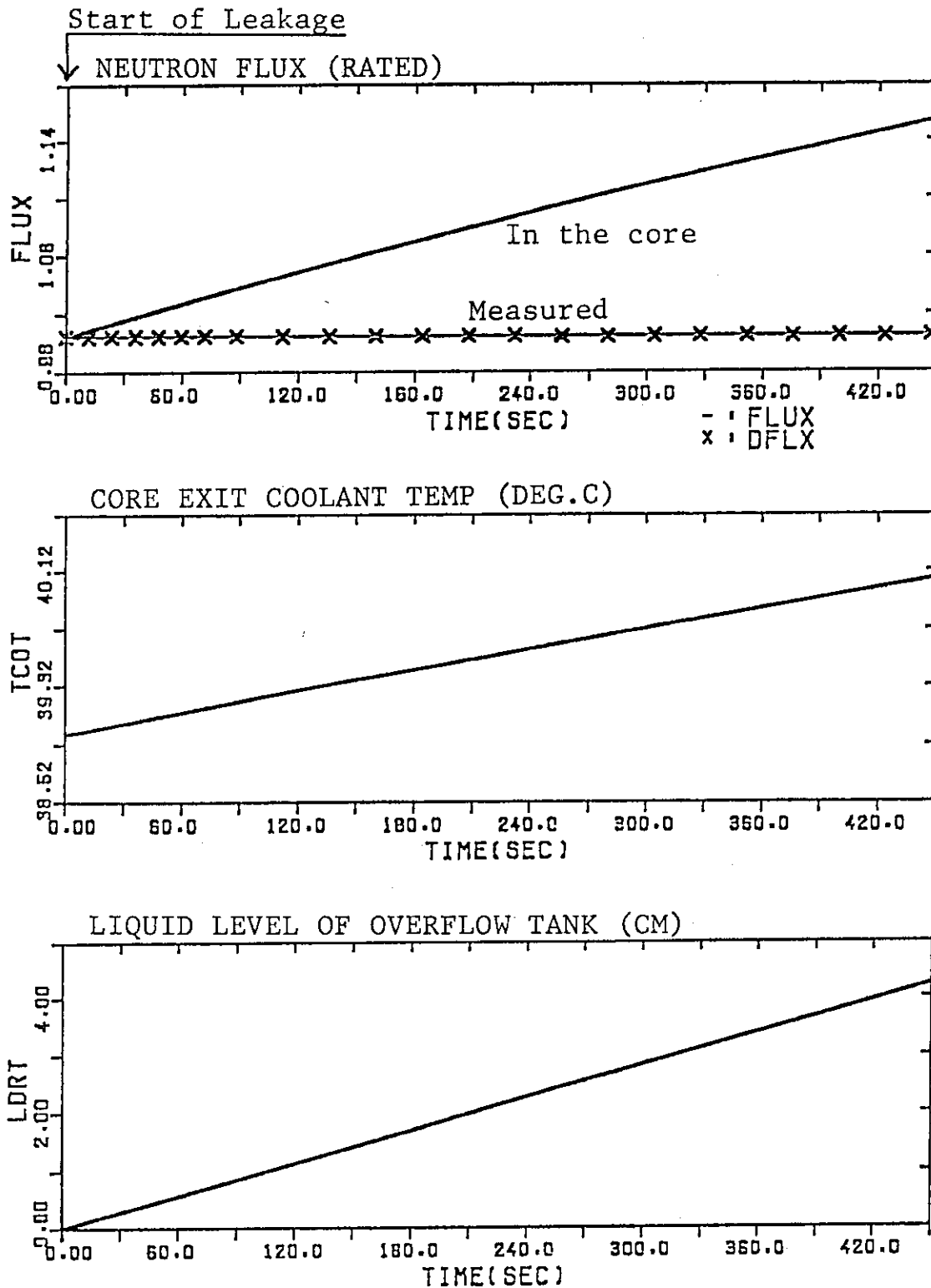


Fig.3.6 Transient responses following primary coolant leakage to heavy water tank

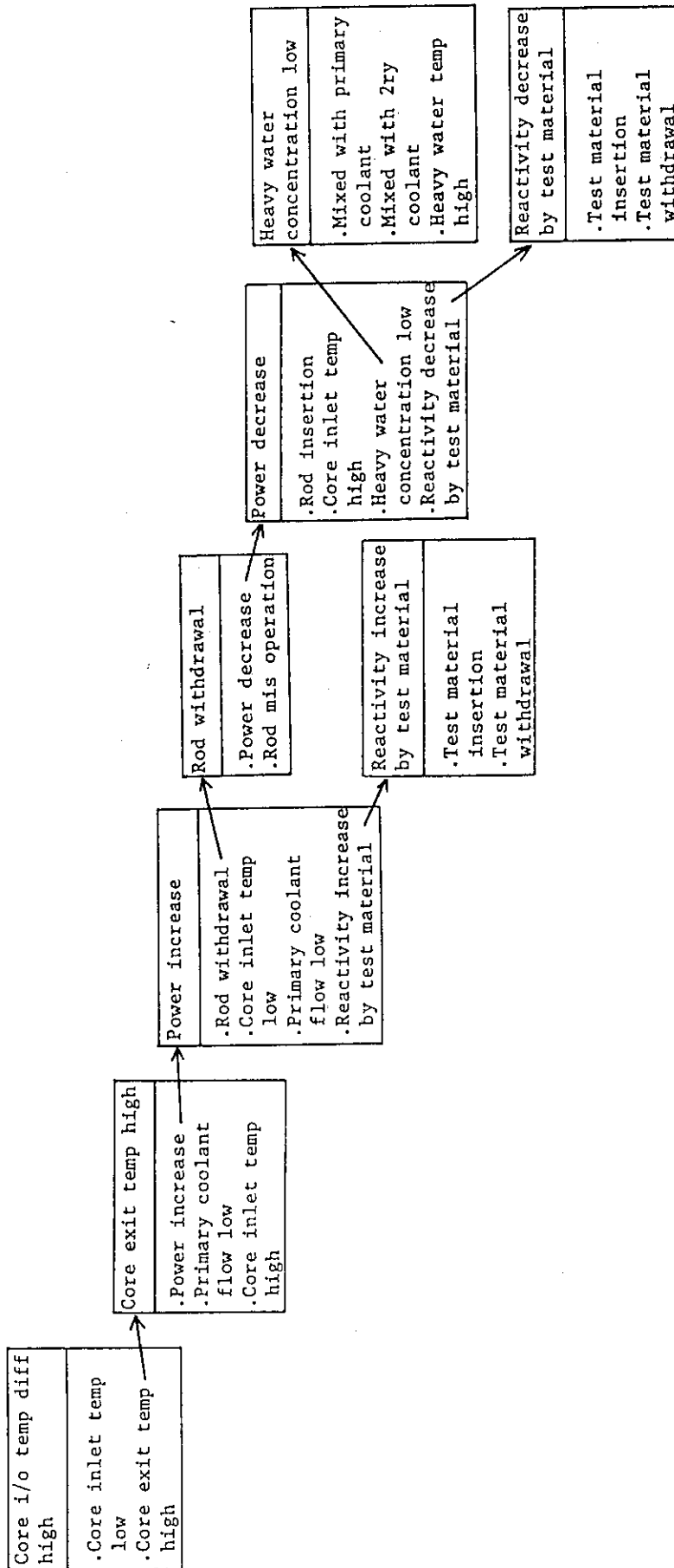


Fig.3.7 Trace of inference for primary coolant leakage to heavy water tank

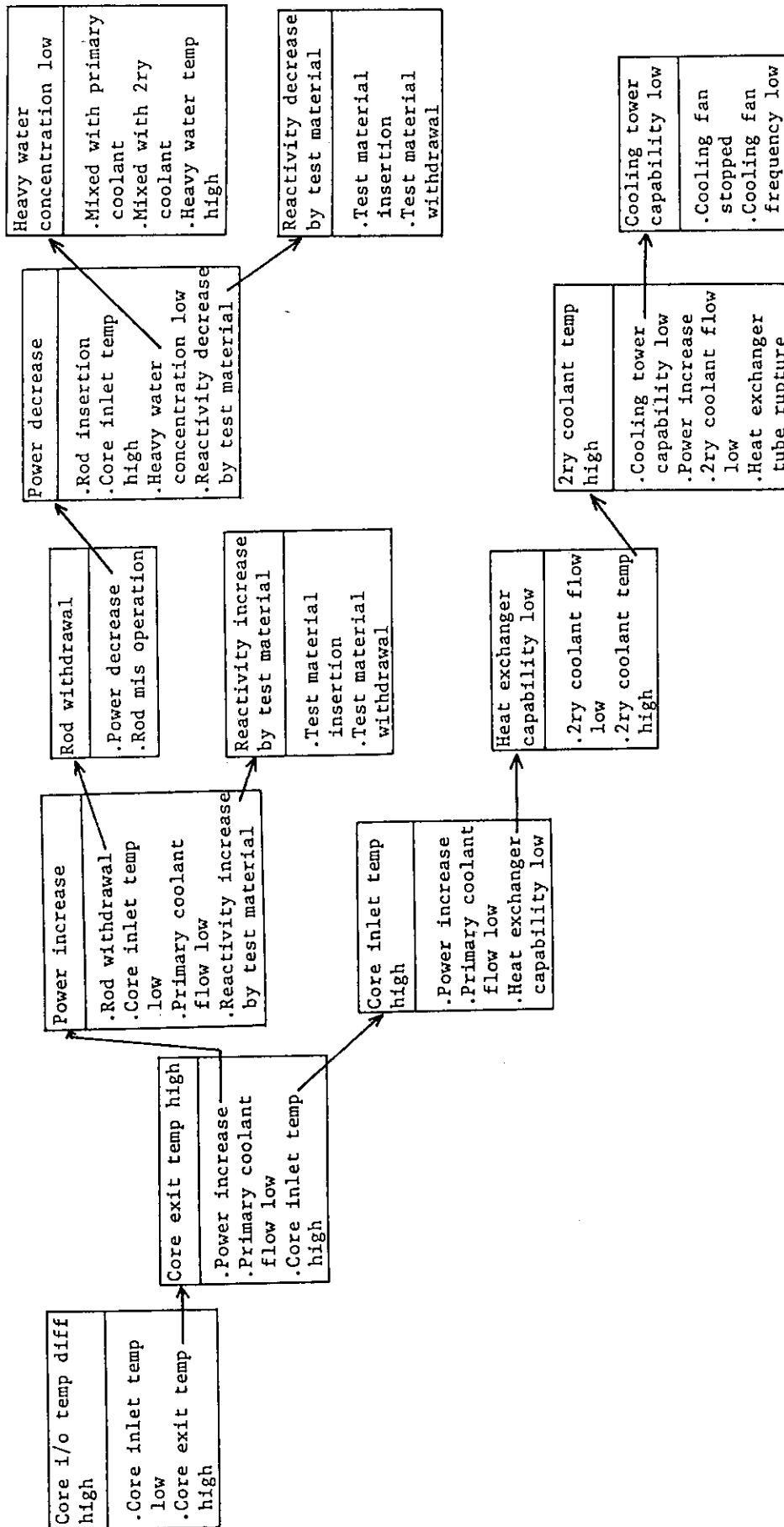


Fig.3.8 Trace of inference for double failures

4 . 結 言

本パイロットシステムの開発及びテストランの結果を通してDISKETの改良した2点について次のことがわかった。

- ・フレーム方式による故障診断は従来のルールを順次検索する方式に比べて効率的である。

- ・数式を知識ベースの中に定義しルールに用いる方式は知識表現の詳細化に有用である。

また、本パイロットシステムを3種類の事故事象によりテストしたところ、いずれのケースも異常原因の同定ができ、スクラム作動回避のための操作が可能であることが示された。

今後は、スクラム時間の予測方法等の改良を行うと共にパイロットシステムで定常からのずれをチェックする機能をFig. 2.2の早期異常検知の結果を用いる等の、異常診断予測システム全体の機能配分を考慮して、スクラム回避エキスパートシステムの改良を行う予定である。

謝 辞

本パイロットシステムの開発に当り、大西信秋室長（現企画室調査役）をはじめとする研究炉管理部研究炉技術開発室の方々の協力に感謝します。

4 . 結 言

本パイロットシステムの開発及びテストランの結果を通してDISKETの改良した2点について次のことがわかった。

- ・フレーム方式による故障診断は従来のルールを順次検索する方式に比べて効率的である。

- ・数式を知識ベースの中に定義しルールに用いる方式は知識表現の詳細化に有用である。

また、本パイロットシステムを3種類の事故事象によりテストしたところ、いずれのケースも異常原因の同定ができ、スクラム作動回避のための操作が可能であることが示された。

今後は、スクラム時間の予測方法等の改良を行うと共にパイロットシステムで定常からのずれをチェックする機能をFig. 2.2の早期異常検知の結果を用いる等の、異常診断予測システム全体の機能配分を考慮して、スクラム回避エキスパートシステムの改良を行う予定である。

謝 辞

本パイロットシステムの開発に当り、大西信秋室長（現企画室調査役）をはじめとする研究炉管理部研究炉技術開発室の方々の協力に感謝します。

参考文献

- 1) M. Yokobayashi, K. Yoshida, A. Koksaka and M. Yamamoto : "Development of Reactor Accident Diagnostic System DISKET using Knowledge Engineering Technique." J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 23, No. 4, PP. 300-314 (1986).
- 2) R. L. Osborne : "Online, Artificial Intelligence-Based Turbine Generator Diagnosis." AI Magazine Fall PP. 97-103 (1986).
- 3) O. Berg, Rolf-Einer Grini and M. Yokobayashi : "Early Fault Detection and Diagnosis for Nuclear Power Plant." Kerntechnik Vol. 50, No. 2, PP. 90-95 (1987)
- 4) 亀山高範、上形知道、岡芳明、近藤俊介、都甲泰正 「パーソナルコンピュータを用いた原子炉異常診断用エキスパートシステムの開発」 日本原子力学会誌 Vol. 30, No. 1, PP. 42-48 (1988).
- 5) K. Yoshida and J. A. Naser : "A Proof-of-Concept Transient Diagnostic Expert System for BWRs." EPRI NP-5827-SR (1988)
- 6) N. Yamada, B. Chandrasekaran, R. Bhatnager : "Knowledge Based Operation Guidance System for Nuclear Power Plant Based on Generic Task Methodology." J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 26, No. 7, PP. 655-669 (1989).
- 7) 氏田博士、木口高志、小野寺勝重、駒田正興 「原子力プラント保守支援システムの開発」 日本原子力学会誌 Vol. 29, No. 6, PP. 538-547 (1987).
- 8) 藤井誠、関英治、田井一郎、盛岡俊彦 「柔軟な推論機能と知識編集支援機能を備えた原子力機器点検保守支援システムの開発」 日本原子力学会誌 Vol. 30, No. 12, PP. 1110-1118 (1988).
- 9) K. Fukuzaki, K. Yoshida, Y. Kobayashi, H. Matsuura and K. Hoshi : "Knowledge Based System for Control Rod Programming of BWRs." J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 25, No. 2, PP. 120-130 (1988).

- 10) 笠原高保、西沢靖雄、加藤監治「プラント保守作業における作業間の干渉判定と干渉回避手段決定法の開発」日本原子力学会誌 Vol.30, No.11, PP.1030-1037 (1988).
- 11) 和田裕、福崎孝治、小林康弘「BWR炉心管理運転のための知識ベースシステムの知識管理支援方式」日本原子力学会誌 Vol.31, No.3, PP.380-389 (1989).
- 12) 吉川龍生、関水浩一、小原玉義、池田大二郎、岩田真嗣、田中豪「原子力発電プラントのアイソレーション支援システムの開発」日本原子力学会誌 Vol.32, No.2, PP.169-178 (1990).
- 13) 木下光夫、山田直之、木口高志「ルールベース制御を用いた制御棒自動操作方式」日本原子力学会誌 Vol.30, No.3, PP.276-285 (1988).
- 14) 石岡卓也、竹垣盛一、大井忠「プラント制御用エキスパートシェルERIC」オートメーション 第33巻 第6号 PP.17-21 (1988).
- 15) 横林正雄、岡田二郎、溝口文雄「知識工学的手法による原子炉異常診断システムの開発」日本原子力学会 分科会C29 (1981)
- 16) 吉田一雄、横林正雄「原子炉異常診断エキスパートシステムDISKET」JAERI-M 89-184 (1989).
- 17) T.Chikayama : "UTILISP manual." METR81-6 (1981)
- 18) 横林正雄、松本潔、村山洋二、神永雅紀、鴻坂厚夫「ルール記述に基づく早期スクラム予知システムの開発」日本原子力学会 秋の大会G24 (1987)
- 19) M.Yokobayashi, K.Matsumoto, Y.Murayama, M.Kaminaga and A.Kohsaka : "Early Fault Detection Expert System to Reduce Scram Frequency in Research Reactor." Enlarged Halden Program Group Meeting on Computerised Man-Machine Communication, Loen Norway, (1988)

- 20) 横林正雄、吉田一雄「原子炉異常診断エキスパートシステムDISKETの異なる記述言語による性能比較」 日本原子力学会誌 (投稿中)
- 21) 松本潔、鴻坂厚夫、神永雅紀、村山洋二、大西信秋、間庭正樹「研究炉事故・故障データベースシステム：IDAS-RR -使用手引書-」 JAERI-M 90-55 (1990)
- 22) 松本潔、平野雅司他「研究炉動特性解析コード：THYDE-JRR3」 (近刊)
- 23) 横林正雄、松本潔、吉田一雄他「研究炉高速シミュレーションコード」 (近刊)
- 24) 柳吉珠、志村正道「機械系におけるモデルに基づいた診断と知識獲得」 情報処理学会論文誌 Vol.30 No.5 (1989)