

JAERI-M
84-205

知識工学を用いた原子炉事故診断システム
の推論機構：IERIAS

1984年11月

横林 正雄・吉田 一雄・山本 稔*・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開している研究報告書です。
入手の問合わせは、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, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山 田 軽 印 刷 所

知識工学を用いた原子炉事故診断システムの推論機構：IERIAS

日本原子力研究所東海研究所安全解析部

横林 正雄・吉田 一雄・山本 稔^{*}・鴻坂 厚夫

(1984年10月受理)

本報告書は原子力発電プラントで発生した事故の原因、種類の診断に用いるために開発した推論機構 IERIAS について述べたものである。

この診断システムは知識工学的手法を用いており、推論機構と知識ベースから構成されている。推論機構 IERIAS は、時間依存のプラントデータを取扱かえるように設計されており、主な特徴は、

- ① 時間の履歴を考慮している。
- ② データ数の増大に対処するため知識ベースのユニット化を可能にしている。
- ③ 使用言語には記号処理に適した UTILISP を用いている。

IERIAS と PWR プラントシミュレータによる解析結果から作成した知識ベースを用いて診断を実行したところ、IERIAS はプラント診断に有効であることがわかった。

* 東洋情報システム株式会社

IERIAS : Inference Engine for Reactor Accident Diagnostic System
using Knowledge Engineering Technique

Masao YOKOBAYASHI, Kazuo YOSHIDA, Minoru YAMAMOTO* and Atsuo KOHSAKA

Department of Nuclear Safety Evaluation
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 19, 1984)

This report describes an inference engine IERIAS which has been developed for a diagnostic system to identify the cause and type of an abnormal transient of a reactor plant. This system using knowledge engineering technique consists of a knowledge base and an inference engine.

The inference engine IERIAS is designed so as to treat time-varying data of a plant. The major features of IERIAS are ; (1) history of transients can be treated, (2) knowledge base can be divided into some knowledge units, (3) program language UTILISP is used which is suitable for symbolic data manipulation.

Inference was made using IERIAS with a knowledge base which was created from simulated results of various transients by a PWR plant simulator. The results showed a good applicability of IERIAS for reactor diagnosis.

Keywords: Knowledge Engineering, Inference Engine, IERIAS, UTILISP
Language, Reactor Diagnosis, Knowledge Base, Knowledge Unit,
Reactor Accidents

* Toyo Information System Corp.

目 次

1. 緒 言	1
2. 推論機構 IERIAS の機能	4
3. 知識ベースの特徴	6
3.1 データ定義	6
3.2 ルール記述	7
4. 診断実行例及び検討	12
5. 結 論	22
謝 辞	22
参考文献	23

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Functions of Inference Engine IERIAS	4
3. Features of Knowledge Base	6
3.1 Data Definition	6
3.2 Rule Representation	7
4. Diagnostic Results and Discussion	12
5. Conclusion	22
Acknowledgement	22
Reference	23

List of Tables

- Table 1.1 Comparison of capabilities between IERIAS and EXPERT.
Table 2.1 Top level commands of IERIAS for inference execution.
Table 2.2 Commands of IERIAS for consultation.
Table 4.1 Relation between CPU time of inference and number of evaluated rules.

List of Figures

- Fig.1.1 Concept of reactor accident diagnostic system using knowledge engineering technique.
Fig.2.1 Concept of IERIAS structure.
Fig.3.1 Concept of knowledge base structure.
Fig.3.2 Example of hypotheses in knowledge base.
Fig.3.3 Example of findings in knowledge base.
Fig.3.4 Example of rules.
Fig.4.1 Event sequence of transient responses caused by SG U-tube rupture.
Fig.4.2 Example of case file.
Fig.4.3 Flow chart of inference execution of IERIAS.
Fig.4.4 Example of diagnostic results.
Fig.4.5 Example of command 'TRACE' output which shows whether the rules have been applied or not.
Fig.4.6 Example of IERIAS execution.

1. 緒 言

原研では原子力発電プラントで発生した事故の原因、種類を同定するために知識工学を応用したシステムの開発を行っている。図 1.1 に本システム概念図を示す。本システムの中核を成すのは知識ベース (Knowledge Base) と推論機構 (Inference Engine) であり、知識ベースは図の白矢印で示すようにプラントの弁やポンプの作動条件、警報の発信条件等の設計データ、事故データ及び解析コードによる解析結果から得られた過渡応答の特徴等を収集し、形式化したデータ (ルールと呼ばれている) を集大成したものである。推論機構は図の黒矢印で示すように知識ベースとプラントからの過渡データを基に推論を実行し、事故の原因や種類を同定 (Identification) する。これらの診断は図のように計算機端末機との対話型で行う。

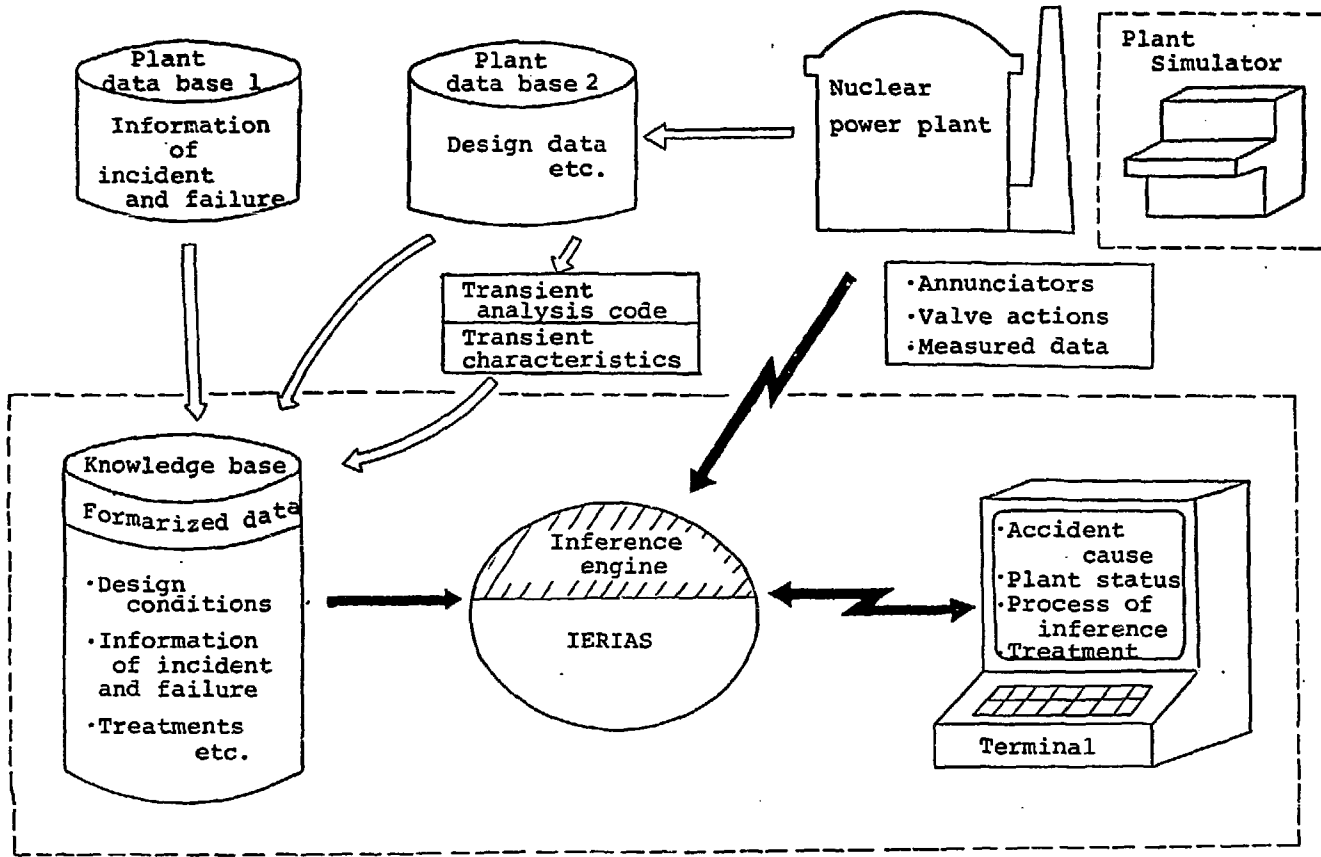
当初フィジビリティスタディとして推論機構 EXPERT¹⁾ と「むつ」原子炉の事故解析データから編集した知識ベースを用いてパイロットシステムを作成し、事故例について診断を実行した。^{2), 3)} その結果、知識工学的手法の主要な特徴であるところの、①推論機構と知識ベースとが分離しているため、知識ベースの追加修正が容易である、②可能な原因についてもれなく推論できる、③事故原因が確率の高い順に得られ、かつ診断理由もわかる、ことなどを確認すると共に、本手法による原子炉事故診断への適用可能性を把握した。

しかしながら EXPERT は定常的な現象を対象とした推論機構であり、原子炉事故のような過渡現象を取扱うことができないために、新しく推論機構 IERIAS を開発した。^{4), 5), 6)} IERIAS の特徴は表 1.1 に示すように、

- ① 弁、ポンプの作動回数とその時刻、警報の発信時刻および主要パラメータの挙動など過渡応答の特徴を考慮できるようにしたこと、
 - ② データ数の増大に対処するため知識ベースを分割して、知識ユニットとして取扱う機能を持たせたこと、
 - ③ EXPERT は FORTRAN と ASSEMBLER を使用言語としているためにルール表現の制限が多く、対話に必要なバックワード推論もできないので、記号処理に適した言語の UTILISP⁷⁾ を用いることにより、これらの問題点の解決をはかったこと、
- である。UTILISP は LISP (List Processor) の一種で計算処理の速いことが特徴である。

推論機構 IERIAS と PWR プラントシミュレータによる事故解析結果^{8), 9)} から作成した知識ベースを用いて事故例について診断を実施したところ、過渡状況の信号変化に伴って診断精度が高くなることから IERIAS はプラント診断に適した推論機構であることが判った。

以下の章では IERIAS の機能と特徴及び診断例について述べている。



← Flow diagram of accident diagnosis
 ← Data acquisition for knowledge base

Fig.1.1 Concept of reactor accident diagnostic system using knowledge engineering technique.

Table 1.1 Comparison of capabilities between IERIAS and EXPERT.

Item	IERIAS	EXPERT
Program language	UTI-LISP	FORTRAN and ASSEMBLER
Time variation characteristics (valve, pump, alarm etc.)	Yes	No
Divisability of knowledge base (Knowledge unit)	Yes	No
Restriction on rule representation	No	Yes
Input format	Lump or sequential	sequential

2. 推論機構IERIASの機能

プラント診断を目的として開発されたIERIASは前節で述べたように、時間依存データの取扱いに工夫をこらしていること、データ数の増大に対処するため知識ベースを知識ユニットに分割することができるなどの特徴を有している。

一方IERIASの機能概要については図2.1に示すように、入力されたデータは推論機構と知識ベースを用いて、ワーキングメモリ上で推論され出力される。

推論機構は次の機能を有している。

- ① データの一括入力又は個別入力機能
- ② 推論実行機能
- ③ コマンド(表2.2参照)によるコンサルテーション機能

知識ベースに対しては、

- ① 知識ベースの翻訳
- ② 知識ベースの編集
- ③ ケースファイル(入力用プラントデータ)の作成、編集
- ④ 知識ベースのテスト(推論実行時のルールの適用状況のチェック)
- ⑤ 知識ベースとケースファイルのロード及びセーブ

の機能を有している。これらの機能は計算機端末機を通して会話形式で実行することができ、そのときに用いるコマンドを表2.1に示す。

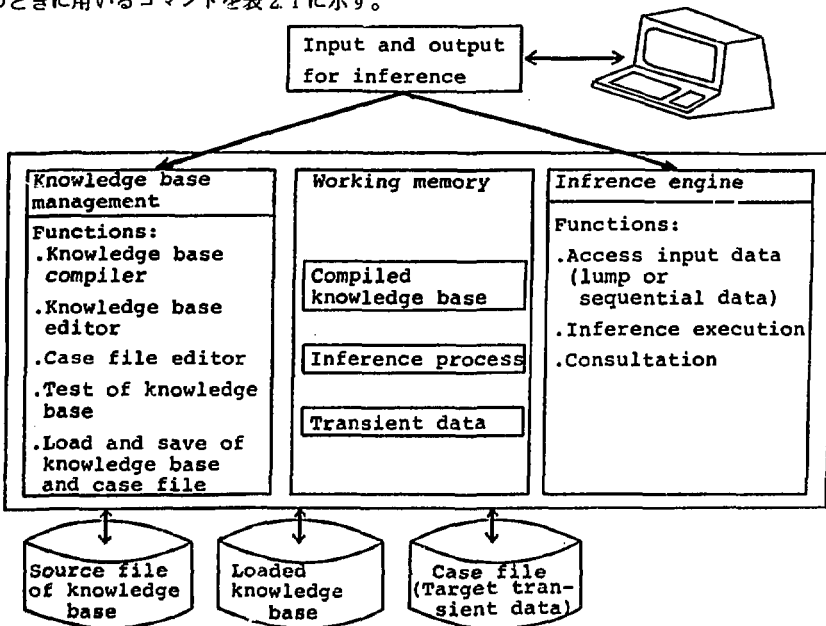


Fig.2.1 Concept of IERIAS structure

Table 2.1 Top level commands of IERIAS for inference execution.

COMP	: Compiler of knowledge base
ED	: Editor of knowledge base and case file (target transient data file)
LOAD	: Loading of knowledge base and case file
SAVE	: Saving of knowledge base and case file
CASE	: Creation of case file
RUN	: Inference execution
LIST	: Search of knowledge base
TEST	: Check of knowledge base whether rules are used or not
PPD	: Modification of source file of knowledge base and case file
QUIT	: Finish of inference

Table 2.2 Commands of IERIAS for consultation.

DX	: List of diagnosis results and recommendation
UF	: List of unknown findings
NR	: List of applied negative rules
CR	: List of contradict rules
FIND MNEs	: List of finding values MNEs
FIX MNEs	: Reset of finding values MNEs
HELP	: List of all command messages
HYP0 MNEs	: Explanation of the inference histories of taxonomies MNEs
RULE MNEs	: List of rules requested by MNEs
RM	: Modification of specific value
SUM	: Summary of findings
RFIN0 MNEs	: Explanation of the rules used for finding of MNEs
CRF	: List of contradict findings
PC	: Change of control parameter of output of hypotheses
STATUS	: Explanation of CPU time of inference and count of evaluated rules
TRACE	: Check of all rules whether applied or not TEST of top level command must be used together

MNEs denote input parameters which are mnemonics of finding or hypotheses

3. 知識ベースの特徴

知識ベースとして以下に示している例は、PWRプラントシミュレータを用いて事故解析を行った結果から作成したものである。

本シミュレータは、出力822MWe、3ループのPWRプラントを模擬したもので、冷態停止から燃焼末期の定格出力状態までの広い運転範囲を有している。本シミュレータには、機器の故障を模擬した49種類のマルファンクションが用意されており、今回作成した知識ベースでは、このうち44種類を事故例として採用している。

3.1 データ定義

IERIASに用いる知識ベースの構成は図3.1に示すようにデータ定義とルール群から成っており、前者は仮説 (Hypothesis) と生起事象 (Finding)、後者はこれらを組合せたルール集合である。

仮説は図3.2に示すように事故分類 (Taxonomy)、中間仮説 (Intermediate Hypothesis) 及び対応策 (Treatment) の3項目から成る。分類では、事故仮説を立て、それを大、中、小分類というように階層化構造にする。この区別は図3.2のようにドット (・) の数で行われる。階層化する理由は、例えば、中分類の事故仮説が見つければ、その下位 (小分類) の事故仮説が想定されていない場合でも、ある程度に対応策をとることができることによる。従って、階層は深い方がより詳細な診断が可能である。中間仮説は推論を効率的に行うために内部変数として用いる。図3.2の例では中間仮説を知識ユニットの適用条件に用いている。この他の使用例はルールの説明のところで述べる。対応策は事故仮説に対応する措置を記述している。

生起事象にはプラントデータの状況、即ち、弁やポンプの作動状態、警報の発信状態および温度や圧力等主要パラメータの変化状態などがあり、診断に必要なこれらの信号を図3.3のように定義する。信号の状態には、真偽 (True or False) または可否 (Yes or No) で表現可能なものと数値で表わすものがあり、前者に対しては、MULTIPLE CHOICE, CHECKLIST及びYESNOの型で定義し、後者に対してはNUMERICALの型で定義する。

信号の変化は診断に重要なので、変化した値とその時刻を記憶しておくことができる。その記憶回数は、前者は (n) の型で、後者は (n - 1) の型で定義する。ここで1とあるのは入力データを用いる場合であり、1の代わりにRとすればルールから数値を決めることを意味している。数値についてはNUMERICALを宣言すれば入力された値がそのまま用いられるが、信号の変化幅の制限値を決めておくこともできる。これは0%から100%の範囲の場合は (0 - 100) のように定義する。制限値を越えたときはRange Overのメッセージが出力されると共にルールに適用するときは制限された値が使用される。

このように定義した生起事象は図3.3のようにBEGINとENDで囲む。

3.2 ルール記述

ルール記述は

条件部 (Condition Part) → 実行部 (Action Part)

の型で表わされ、生起事象と仮説の用い方により次の3つの表現型式を用いる。

FFルール：生起事象間の関係

FHルール：生起事象と仮説との関係

HHルール：仮説間の関係

実行部の仮説には、条件部に対する確信度 (Certainty Factor) と呼ばれる経験的重みを $-1.0 \sim 1.0$ の範囲で用いる。 -1.0 は条件部に対する完全否定、 1.0 は完全肯定であり、 0.0 は無関係を意味する。その中間の値 $0.0 \sim 1.0$ 及び $-1.0 \sim 0.0$ はそれぞれ肯定及び否定の度合いを表わす。

確信度を用いる理由は、多くの情報を並列構造で並べておくことにより、データが多少得られない場合でも、残りのデータから事故仮説を合成していくという柔軟性にある。例えば、生起事象 A, B, C, D により仮説 α が同定されるとき直列構造で表現すると

$$A \& B \& C \& D \rightarrow \alpha$$

となる。確信度を用いて並列構造で表現する場合はそれを合計して α は 90% というように同定される。

$$\left. \begin{array}{l} A \rightarrow \alpha, 0.40 \\ B \rightarrow \alpha, 0.35 \\ C \rightarrow \alpha, 0.45 \\ D \rightarrow \alpha, 0.50 \end{array} \right\} \rightarrow \alpha, 0.9$$

直列構造では生起事象 A が故障により得られない場合は α は同定できないが、並列構造ならば残りの B, C, D から α は 80% と同定できる。プラント診断のように多くのデータを用い、その中に誤信号が混入する可能性を考慮すると、このような柔軟性を持たせておくことは必要不可欠であると考ええる。

ルールの条件部の記述には次の3つのタイプがある。

AND結合 (すべての条件を満たす)

A & B & C &

OR結合 (n 個の条件を満たす)

n : A, B, C,

AFTER結合 (時間の前後関係を満たす)

A AFTER B AFTER C

これらの記述は適宜に織り混ぜて使用することができる。

次にルール表現例について述べる。まず FF ルールでは、主にプラントの設計に係わる関係を記述している。例えば主給水ポンプ (PMSGFW) がトリップすればタービントリップシグナルに通信した (TURSTR) という警報が発信されタービントリップとなる場合には次のルールで表現される。

F(PMSGFW,#,F) -> F(TURSTR,T)

(1)
ここで条件部に#の記号を用いているのは、主給水ポンプがトリップしたことがあれば(過去に True から False になったことがあれば)、主給水ポンプ回復後(Falseから Trueになる)もこのルールは満足されることを意味している。NUMERICALを用いたときも同様であり、#記号は過去に設定条件を満たす値になったことがあるかどうかの検索のために用いている。

FHルールについては、例えば発電機トリップの警報(ATRPG)が発信された後にタービントリップの警報(ATRPTR)が発信されたときには発電機系統に異常が発生した(FGENES)疑いが強いという場合には次のルールで表現される。

F(ATRPTR,T) AFTER F(ATRPG,T) -> H(FGENES,0.60) (2)

また、先にタービントリップになると40秒後に発電機トリップとなるシーケンスになっている。これを

F(ATRPG,T) AFTER(0.35:0.45) F(ATRPTR,T) -> H(FGENES,-0.30) (3)

と表現すれば、タービントリップ後35~45秒(データ取得サンプリングタイムを考慮して幅を持たせることが必要。時間は分、秒の形で表わす)で発電機が極めて小さい(ここでは負の確信度を与えている)という意味になる。

HHルールに関しては、IF-THEN形式で表わされるプロダクションルールもHHルールに含めて取扱っている。IF部に用いるのは生起事象でも仮説でもよく、またTHEN部に用いるルールの条件部には仮説と生起事象の両方を用いることもできる。

以上基本的なルール表現について述べたが、この他に中間仮説の使用例を挙げると、いくつかの生起事象をまとめて

(2 : F(LEVSG1,#,0:13),F(LEVSG2,#,0:13),F(LEVSG3,#,0:13)) -> H(IHSGLL,1.0) (4)

と表現すれば、3基の蒸気発生器水位(LEVSG1~3)のうち2基以上が13%以下になったとき、中間仮説IHSGLLの確信度が1.0となる。以後はこの中間仮説をルールの条件部に使用すれば、いくつかの生起事象を何度もくり返して使用する必要はなく便利である。また、条件部に対してメッセージを出力することもできる。例えば3基のSGのうち2基以上のSG水位が低くなりルール(4)が満足されると、スクラム信号(SCRAM)が発信されるが、発信されないときは次のように記述してメッセージを出力させる。

H(IHSGLL,0.9:*) & F(SCRAM,F) -> M("SCRAM SIGNAL IS NOT ACTUATED DISPIE SG LOW LEVEL") (5)

ここで*記号は無限大を意味する。但し、*:0.9と記述すれば*記号は無限小を意味する。

以上示したようなルール表現は作成を容易にするためにわかり易く記述されているが、推論を実行するときはIERIASの持っているコンパイル機能により、LISP表現に変換する。例えばルール(2)は変換後次のように表わされる。

(SETQ MS2-6-5 '(((AFTER (F ATRPTR T) (F ATRPCE T))) (H FGENES 0.6000000+00))) (6)

ここでSETQはLISPの関数であり、HS2-6-5はルールの番号(これについては次章で述べる)である。

なお、知識ユニットについては、図のようにKUの記号を用いて定義し、ユニット番号は定義順に付けられる。知識ユニットを推論実行時に用いるかどうかは、CONDの項で定義した適用条件により判定する。

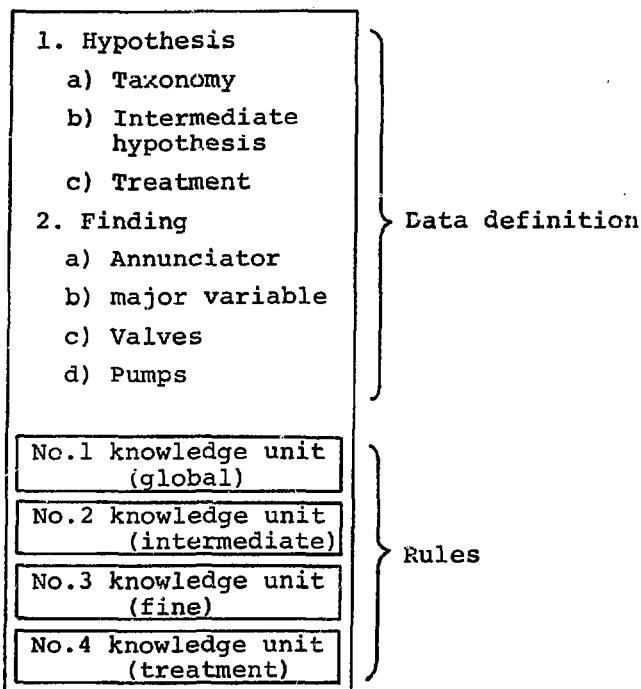


Fig.3.1 Concept of knowledge base structure

***DATA DEFINITION

**HYPOTHESES

*TAXONOMY

NRA NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT
 FPCS ..FAILURE OF PRIMARY COOLANT SYSTEM (0.18)
 FPCSLP ..LEAK OF PRIMARY COOLANT LOOP (0.30)
 RCSUTR ...SG U-TUBE RUPTURE (0.25)
 RCSSL ...SMALL LEAK OF REACTOR COOLANT SYSTEM (0.40)
 RCRVSO ...PRESSURIZER RELIEF VALVE STICKS OPEN (0.30)

*INTERMEDIATE HYPOSESES

IHTAX1 APPLY CONDITION OF KNOWLEDGE UNIT NO.2
 IHTAX2 APPLY CONDITION OF KNOWLEDGE UNIT NO.3

*TREATMENT

TREAT01 TAKE ACTION OF TREATMENT NO.1
 TREAT02 TAKE ACTION OF TREATMENT NO.2
 TREAT03 TAKE ACTION OF TREATMENT NO.3

'.' indicates the superset-subset relationship.
 '*' indicates the section-subsection relationship.
 () denotes accident rates.

Fig.3.2 Example of hypotheses in knowledge base.


```

**FINDINGS
*BEGIN QUESTIONNAIRE
*MULTIPLE CHOICE:
NPPA  NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT
OTA   OTHER ACCIDENT
*CHECKLIST (5)
ANNUNCIATORS OF PRIMARY LOOP:
AFLRCSL  LOW REACTOR COOLANT FLOW
ATEAVRF  DEVIATION OF TAVG/TREF
ATEAVGH  AVERAGE TEMPERATURE HIGH
ATEAVGL  AVERAGE TEMPERATURE LOW

+NUMERICAL (0 100) (7 I)
LEVSG1  SG-1 NARRC/W RANGE LEVEL (%)
+NUMERICAL (7 I)
GFRCSI  GRADIENT OF COOLANT FLOW NO.1 LOOP (% MIN)

*YESNO (5)
YTEMCHI  COLD LEG TEMPERATURE HIGHER THAN HOT LEG OF LOOP-1
*END QUESTIONNAIRE

```

Fig.3.3 Example of findings in knowledge base.

```

**KU
*COND H(IHTAX1, 0.4 : 1.0)
*FF RULES
F(PMSGFW,#,F) -> F(TURSTR,T)
(2 : F(LEVSG1,#,0:13),F(LEVSG2,#,0:13),F(LEVSG3,#,0:13)) -> F(SSGLEL,T)

*FH RULES
(1 : F(APREPR, T),F(APREPRH, T)) -> H(FPRPRC, 0.1),H(FPRHTR, 0.1)
F(ATRPT, T) AFTER F(ATRPG, T) -> H(FGENES, 0.6)
(2 : F(LEVSG1,#,0:13),F(LEVSG2,#,0:13),F(LEVSG3,#,0:13)) -> H(IHSGLL,1.0)

*HH RULES
*IF
H(FPCSLP, 0.4 : 1.0)
*THEN
(1 : F(AFLCHAH,#,T),F(FLCHAG,#,20:*)) -> H(RCSUTR, 0.30)
*END
H(RCSUTR, 0.6 : 1.0) -> H(TREAT05, 0.96)
H(IHSGLL, 0.9 : *) & F(SCRAM,F) -> M('SCRAM SIGNAL IS NOT ACTUATED DISPIE SG
LOW LEVEL')

```

Fig.3.4 Example of rules.

4. 診断実行例及び検討

蒸気発生器（SG）U字管破断時の過渡応答データを入力して、診断を実行する。この過渡応答の主要事象シーケンスは図4.1に示すように、一次冷却水の漏洩により、加圧器圧力及び水位が低下し、水位補充のため充てん流量が増加する。しかし漏洩流量の方が大きいため約31分で加圧器圧力により原子炉スクラムとなり、タービン及び発電機が停止し、一次側には安全系の高圧注入水が補充されることにより主要な初期過渡現象は終了する。この過渡現象の推論機構への入力データは図4.2に示すようにケースファイル（図ではCASE 15が用いられている）として170種類の信号を用いて作成している。SGU字管破断は8時に発生したと仮定しており、図では信号の値と時刻を（T 802.20）のように表わし、これは8時2分20秒にTrueになったことを意味している。

診断実行時のフローチャートは図4.3に示すように、入力データを用いてFFルール及びFHルールを評価し、その結果に基づいてプロダクションルールの評価を行った後、未使用の知識ユニットを適用条件に従って評価する。結果が出力された後は、さらに詳細な情報を得るためにコンサルテーションを行い診断に役立てる。

上記過渡現象に対する診断として、図4.4にSGU字管破断発生後2分、3分及び4分経過した時点での診断結果を示している。図中に（-1-）、（-2-）、（-3-）とあるのは知識ユニットの番号であり、それぞれ事故仮説の大、中、小分類に相当している。2分経過後の診断では、事故原因を判定するには至らず、3分経過後の診断で中分類の結果から一次冷却水の漏洩が発生したことは判るが、漏洩個所が一次冷却ループからSGU字管からの区別はできていない。4分経過後で初めてSGU字管破断が83%の確信度で同定され、対応策も示されている。診断結果に対し表2.2に示すコマンドからHYPOを用いて診断理由を尋ねると、次のように使用された生起事象と確信度が示される。

C> HYPO RCSUTR

HISTORY OF <RCSUTR:SG U-TUBE RUPTURE>

```
CF    RULE NAME  MNEMONIC&VALUE IN IF-PART OF RULE.
0.70  HS3-2-8   FRADM    -0.10 FAILURE OF RADIATION MONITOR
      ARADMAL   T    RADIATION MONITOR ALARM
0.30  HS3-2-4   AFLCHAH  F    CHARGING FLOW HIGH
      FLCHAG    22.2 CHARGING FLOW (TON HR)
0.17  CF IMPLIED BY PREDECESSOR POSITIVE
0.00  CF IMPLIED BY PREDECESSOR NEGATIVE
```

ラディエーションモニタと充てん流量の信号から0.7と0.3の確信度がそれぞれ得られている。0.17とあるのはRCSUTRの上位分類「一次冷却系からの漏洩」の確信度と事故仮説で与えたRCSUTRの発生頻度との積として得られた値である。

CF 0.00とあるのは負の確信度を持ったルールが適用されていないことを意味している。

負の確信度はある生起事象が発生すれば、ある事故仮説は成立しないというように、他の事故仮説と明確に区別するために便利であるが、その反面、複合事故に対し同定されるべき事故仮説の確信度が相殺されて小さくなる恐れがあることに留意すべきである。

RCSUTRの確信度0.83は次のようにして求める。

$$0.70 \oplus 0.30 \quad ; \quad 0.70 + (1-0.70) \times 0.30 = 0.79$$

$$0.79 \oplus 0.17 \quad ; \quad 0.79 + (1-0.79) \times 0.17 = 0.8257$$

負の確信度がある場合は、負の確信度同志で合計し、正の合計の確信度と加算する。これらの確信度の計算法はMYCIN¹⁰⁾のそれと同様であり、文献(3)で述べた通りである。また文献(11)にも詳説されている。

ルールは番号で示されており、例えばHS3-2-8とあるのはNo.3知識ユニットの2番目のHHルールのTHEN部の8番目のルールを意味している。その内容はコマンドRULEを用いると次のように示される。

C> RULE HS3-2-8 HS3-2-4

HH RULE

HS3-2-8 : H(FRADM,-1.0:0.0)&F(ARADMAL,T) -> H(RCSUTR,0.70)

HH RULE

HS3-2-4 : (1:F(AFLCHAH,#,T),F(FLCHAG,#,20:*)) -> H(RCSUTR,0.30)

ここでFRADMという略号で示されているのは、SG2次側の冷却水をチェックしているラディエーションモニタの警報(ARADMAL)が故障しているという中間仮説である。ルールからFRADMは問題なし(低い確信度が得られた)とされ、HS3-2-8のルールの確信度が負という条件を満たしている。2番目のHS3-2-4は一次冷却材の充てん流量に注目したもので、実際に用いられた値はコマンドFINDにより次のように示される。

C> FIND AFLCHAH FLCHAG

'FIND'

MNEMONIC	VALUE	TIME-ID	EXPLANATION
AFLCHAH	F	0	CHARGING FLOW HIGH
FLCHAG	22.30	802	CHARGING FLOW (TON HR)
	12.70	0	

充てん流量大の警報(AFLCHAH)は発信されていないが、充てん流量の値は12.7t/hから22.2t/hまで増加しており、HS3-2-4のルールのAFLCHAHがTrue又はFLCHAGが20t/h以上という条件を満たしている。

4分経過時の推論実行に使われたルール数、計算時間(CPU時間:msec)はコマンドTAUSを用いると次のように表示される。

C> STATUS

```

*** IERIAS SYSTEM STATUS ***
SESSION CPU TIME      = 23598
INFERENCE CPU TIME    = 1161
NUMBER OF EVAL RULES  = 175
NUMBER OF ACTION RULES = 19

```

本コンピュータはFACOM-M380であり、セッションのCPUは23秒使用しており、推論に要したCPU時間は1.16秒であることがわかる。使用されたルールは175で、このうち条件部を満足し、実行部へ達したのは19ルールであることを示している。LISP言語を使用するときは、計算の過程で生じた不要な領域を消去し再利用するガベージコレクションと呼ばれている機能が働き、推論実行の回数が増加するとガベージコレクションの回数も増加するためCPU時間が多くなる。表4.1に使用されたルール数と最小CPU時間の関係を示す。ガベージコレクションの回数が多いときは表に()で示した値のようにCPU時間は約3割増加する。ガベージコレクションの回数を減少させるためにはセッションの使用領域を拡張することが必要である。(現在は2.5 Mbで使用している)従って、使用セッション領域が充分確保できる場合は、ルール数が増大しても、1回の推論に要する時間は最少であり、オンラインによる診断も可能である。

最後に知識ベースのデバッグ作業に適したコマンドとしてTRACEについて述べる。このコマンドを用いると知識ベースのすべてのルールについて適用されたかどうか順番に図4.5のように表示される。但し、このコマンドを用いるときはトップレベルコマンドのTEST(表2.1参照)をあらかじめセットしておくことが必要である。この他、表2.2に示すコマンドを必要に応じて使用することにより、診断を効率的に進めることができる。参考として図4.6に推論実行時の入力例を示す。

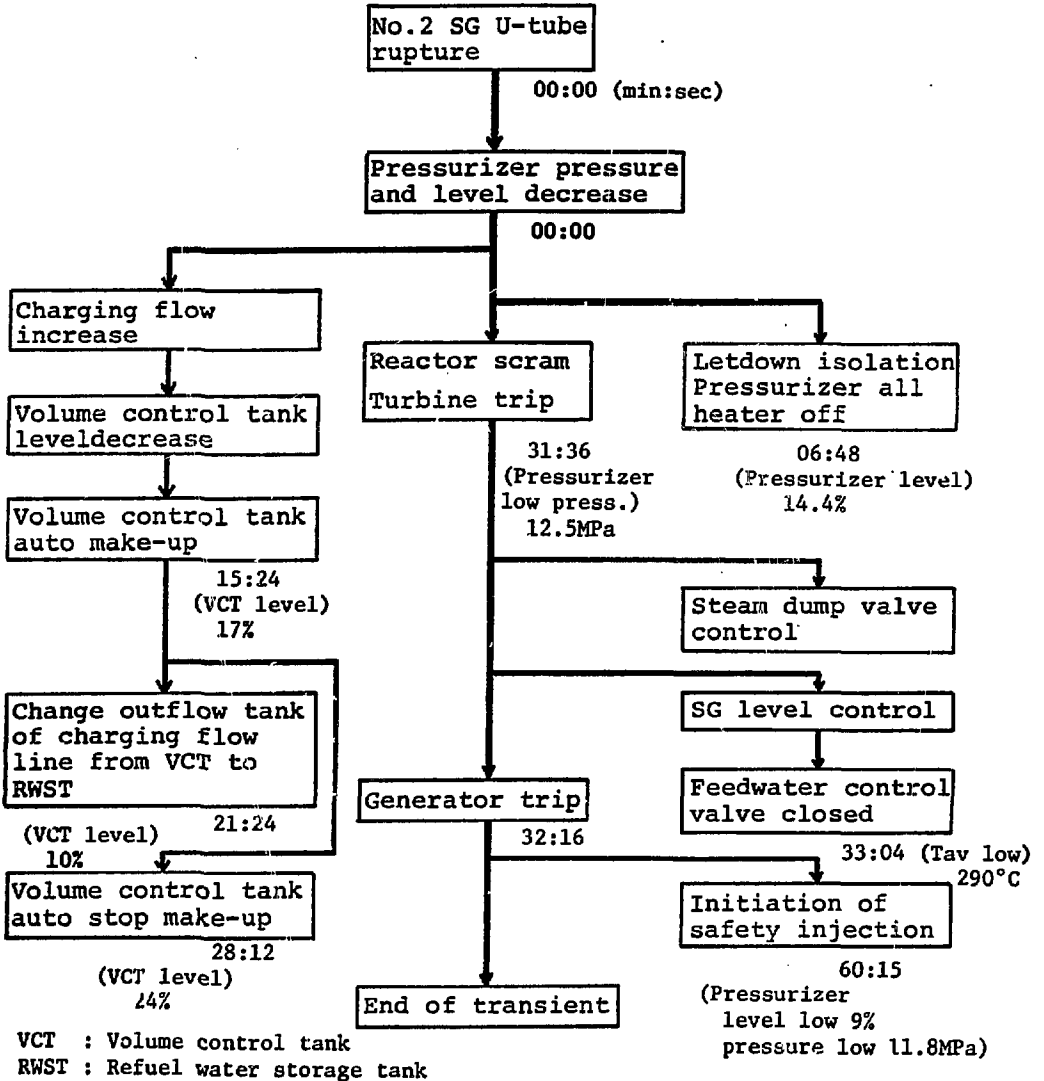


Fig.4.1 Flow sequence of transient responses caused by SG U-tube rupture.

```

(SETQ #CASE 'CASE15)
(SETQ CASE15 '(CASE15 (NPPA ((T 800)(F 0)))
(QTHA ((F 000)))
(ATRPRE ((T 831.36)(F 0)))
(ATRPTR ((T 831.36)(F 0)))
(ATRPGE ((T 832.16)(F 0)))
(ACRDSTP ((F 000)))
(ACRDBTM ((T 831.36)(F 0)))
(ACRDWIL ((T 819.20)(F 0)))
(ALEVPRH ((F 000)))
(ALEVPRL ((T 801.00)(F 0)))
(APREPRH ((F 0)))
(APREPRL ((T 802.20)(F 0)))
(ATEPRLH ((F 000)))
(ATEPRTH ((F 000)))
:
(FLRCS1 ((100 000)))
(FLRCS2 ((100 000)))
(FLRCS3 ((100 000)))
(PREPRZ ((160 850)(153 830)(162 810)(160 0)))
(LEVPRZ ((0 840)(0 820)(45 0)))
(LEVPRT ((0 000)))
(TEMPRL ((50 000)))
(TEMPRT ((25 000)))
(PREPRT ((+0.1000000 +00 000)))
(TEMHL1 ((286 840)(322 0)))
(TEMHL2 ((286 840)(322 0)))
(TEMHL3 ((286 840)(322 0)))
(TEMCL1 ((285 840)(287 0)))
(TEMCL2 ((285 840)(287 0)))
(TEMCL3 ((285 840)(287 0)))
(TEMAVE ((285 840)(304 0)))
(TEMDEV ((0.7 840)(0 0)))
(QFLUX ((0 834)(84 820)(100 0)))
(LCRODA ((0 831)(220 0)))
(LCRODB ((0 831)(220 0)))
:
(VF498 ((F 833.04)(T 0)))
(VM151A ((F 000)))
(VM151B ((F 000)))
(VM151C ((F 000)))
(VL102A ((F 000)))
(VL123A ((F 000)))
(YREVFL1 ((N 000)))
(YREVFL2 ((N 000)))
(YREVFL3 ((N 000)))
(YTEMCH1 ((N 000)))
(YTEMCH2 ((N 000)))
(YTEMCH3 ((N 000))))

```

Fig.4.2 Example of case file

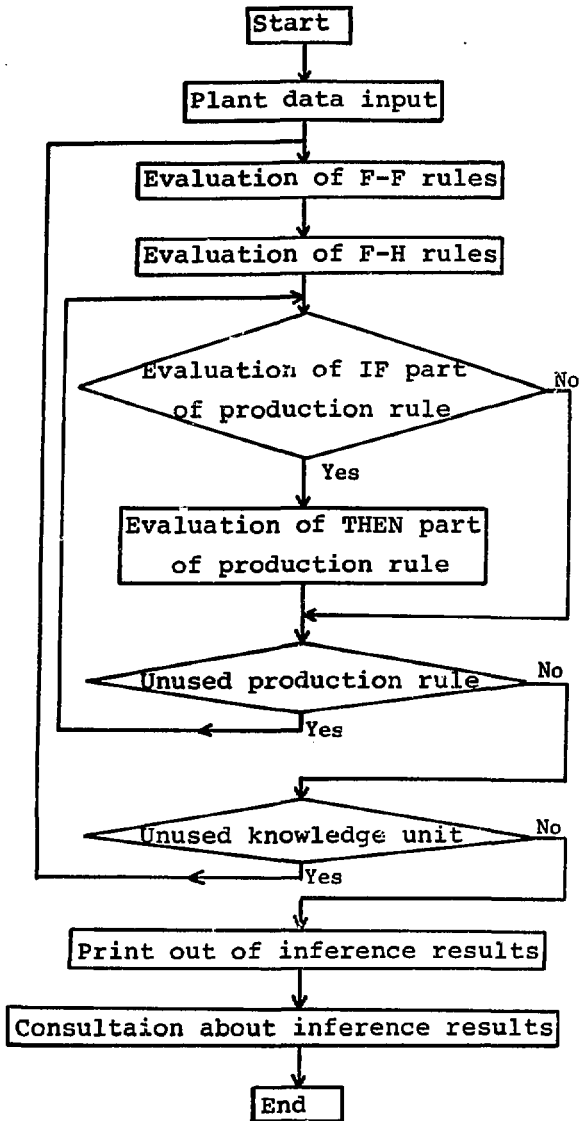


Fig.4.3 Flow chart of inference execution of IERIAS.

(a) The first inference execution at 8:02

** TAXONOMY CERTAINTY (-1-) 1984 AUG. 14,08:02:00

CERTAIN FACTOR	TAXONOMY MNEMONIC	EXPLANATION
0.20	FPRZ	FAILURE OF PRESSURIZER SYSTEM

** TAXONOMY CERTAINTY (-2-) 1984 AUG. 14,08:02:00

CERTAIN FACTOR	TAXONOMY MNEMONIC	EXPLANATION
0.23	FPRPC	FAILURE OF PRESSURIZER PRESSURE CONTROL SYSTEM
0.15	FPRHTR	FAILURE OF PRESSURIZER HEATER

I DON'T FIND ANYTHING ABOUT TAXONOMY.
 I DON'T FIND ANYTHING ABOUT TREATMENT.
 NO CONTRADICTORY FINDING EXISTS.
 NO CONTRADICTORY RULE IS APPLIED.
 FINDINGS ARE ALL CLEAR.

(b) The second inference execution at 8:03

** TAXONOMY CERTAINTY (-1-) 1984 AUG. 14,08:03:00

CERTAIN FACTOR	TAXONOMY MNEMONIC	EXPLANATION
0.54	FPCS	FAILURE OF PRIMARY COOLANT SYSTEM
0.32	FPRZ	FAILURE OF PRESSURIZER SYSTEM

** TAXONOMY CERTAINTY (-2-) 1984 AUG. 14,08:03:00

CERTAIN FACTOR	TAXONOMY MNEMONIC	EXPLANATION
0.71	FPCSLP	LEAK OF PRIMARY COOLANT LOOP
0.39	FPRPC	FAILURE OF PRESSURIZER PRESSURE CONTROL SYSTEM
0.27	FPRHTR	FAILURE OF PRESSURIZER HEATER

** TAXONOMY CERTAINTY (-3-) 1984 AUG. 14,08:03:00

CERTAIN FACTOR	TAXONOMY MNEMONIC	EXPLANATION
0.48	RCSLSL	SMALL LEAK OF REACTOR COOLANT SYSTEM
0.42	RCSUTR	SG U-TUBE RUPTURE
0.21	RCRVSO	PRESSURIZER RELIEF VALVE STICKS OPEN

I DON'T FIND ANYTHING ABOUT TREATMENT.
 NO CONTRADICTORY FINDING EXISTS.
 NO CONTRADICTORY RULE IS APPLIED.
 FINDINGS ARE ALL CLEAR.

Fig.4.4 Example of diagnostic results

(c) The third inference execution at 8:04

** TAXONOMY CERTAINTY (-1-) 1984 AUG. 14,08:04:00

CERTAIN	TAXONOMY	
FACTOR	MNEMONIC	EXPLANATION
0.82	FPCS	FAILURE OF PRIMARY COOLANT SYSTEM
0.32	FPRZ	FAILURE OF PRESSURIZER SYSTEM

** TAXONOMY CERTAINTY (-2-) 1984 AUG. 14,08:04:00

CERTAIN	TAXONOMY	
FACTOR	MNEMONIC	EXPLANATION
0.84	FPCSLP	LEAK OF PRIMARY COOL. IT LOOP
0.39	FPRPRC	FAILURE OF PRESSURIZER PRESSURE CONTROL SYSTEM
0.27	FPRHTR	FAILURE OF PRESSURIZER HEATER

** TAXONOMY CERTAINTY (-3-) 1984 AUG. 14,08:04:00

CERTAIN	TAXONOMY	
FACTOR	MNEMONIC	EXPLANATION
0.83	RCSUTR	SG U-TUBE RUPTURE
0.25	RCRVSO	PRESSURIZER RELIEF VALVE STICKS OPEN

TREATMENT RECOMMENDATION 1984 AUG. 14,08:04:00

CERTAIN	TREATMENT	
FACTOR	MNEMONIC	EXPLANATION
0.76	TREAT05	TAKE ACTION OF TREATMENT NO.5

NO CONTRADICTORY FINDING EXISTS.
 NO CONTRADICTORY RULE IS APPLIED.
 FINDINGS ARE ALL CLEAR.

Fig.4.4 Continued

Table 4.1 Relation between CPU time of inference and number of evaluated rules.

Evaluated rule number	CPU time(sec)
249 (124)	1.58 (1.95)
210 (75)	1.35 (1.71)
175 (19)	1.16 (1.51)
158 (4)	1.07 (1.43)
99 (0)	0.82 (0.84)

On left side, number of evaluated rules together with number of rules which satisfied condition part are shown. On right side, the minimum and the maximum CPU time are shown.

C) TRACE

```

** IERIAS RULE APPLIED HISTORY **
FF1-1 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-1 : F(PRCONT,#,0.62:*) -> F(AINISG,T)
FF1-2 1 (APPLIED)
      FF1-2 : F(LCRODD,#,0:10) -> F(ACRDBTM,T)
FF1-3 1 (APPLIED)
      FF1-3 : F(LCRODD,#,220:*) -> F(ACRDWIL,T)
FF1-4 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-4 : F(LEVPRH,#,0.05:*) -> F(ALEVPRH,T)
FF1-5 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-5 : F(LEVPRH,#,-1:-0.06) -> F(ALEVPRH,T)
FF1-6 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-6 : F(PREPRZ,#,163:*) -> F(APREPRH,T)
FF1-7 1 (APPLIED)
      FF1-7 : F(PREPRZ,#,0:154) -> F(APREPRH,T)
FF1-8 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-8 : F(TEMPRL,#,77:*) -> F(ATEPRH,T)
FF1-9 -1 (NONAPPLIED)
      FF1-9 : F(TEMPRT,#,52:*) -> F(ATEPRH,T)
HS2-1-3 1 (APPLIED)
      HS2-1-3 : F(AFLRCSL,F) -> H(FPCSPM,-0.50)
HS2-1-4 1 (APPLIED)
      HS2-1-4 : F(ACRDWIL,T) -> H(FPCSLP,0.20)
HS2-1-5 1 (APPLIED)
      HS2-1-5 : F(ALEVPRH,T)&F(APREPRH,T) -> H(FPCSLP,0.30)
HS2-1-6 -1 (NONAPPLIED)
      HS2-1-6 : F(PMCNSP,T) -> H(FPCSLP,0.50)
HS2-1-7 1 (APPLIED)
      HS2-1-7 : F(ESSACT,T) -> H(FPCSLP,0.30)
HS2-1-8 -0.1000000+00 (NONAPPLIED)
      HS2-1-8 : F(ARADMAL,T)&H(FRADM,+:0.00) -> H(FPCSLP,0.40)
HS2-2-1 1 (APPLIED)
      HS2-2-1 : (1:F(APREPRH,T),F(APREPRH,T)) -> H(FPRPRC,0.15),H(FPRHTR,0.10)
HS2-2-2 1 (APPLIED)
      HS2-2-2 : (1:F(ALEVPRH,T),F(ALEVPRH,T)) -> H(FPRPRC,0.15),H(FPRHTR,0.10)
HS2-2-3 -1 (NONAPPLIED)
      HS2-2-3 : (1:F(ATEPRH,T),F(ATEPRH,T)) -> H(FPRPRC,0.15)
HS2-2-4 -1 (NONAPPLIED)
      HS2-2-4 : F(HTRBUP,T)&F(HTRPRP,F) -> H(FPRHTR,0.60)
HS2-3-1 1 (APPLIED)

```

Fig.4.5 Example of command "TRACE" output which shows whether the rules have been applied or not.

READY

IERIAS> (IERIAS)

```
*****
*
*      WELCOME TO IERIAS   (VERSION 1.)  *
*
*      1984-3-30          *
*
*
*****
```

ENTER COMMAND <COMP/ED/LOAD/SAVE/CASE/RUN/LIST/TEST/PFD/QUIT> COMPENTER TEXT FILE NAME/CAN : "SRSDATA"

***** COMPILE START *****

***** COMPILE END *****

ENTER COMMAND <COMP/ED/LOAD/SAVE/CASE/RUN/LIST/TEST/PFD/QUIT> LOADENTER FILE NAME=> "CASE(CASE15)"

***** LOADING END *****

ENTER COMMAND <COMP/ED/LOAD/SAVE/CASE/RUN/LIST/TEST/PFD/QUIT> RUN

***** RUN MODE START *****

ENTER RUN TIME : 804DO YOU USE INITIAL QUESTION MODE? (Y/N)=> N

(Inference results)

DO YOU SAVE THIS RUN RESULT (Y/N/A)=> Y

***** CONSULTATION MODE START *****

ENTER <QUIT/DX/UF/NR/CR/HELP/FIND/FIX/HYPO/SUM/CRF/RULE/RED/WHY/PC/STATUS/TRACE>

C>

(Consultation)

Underline denotes input by user.

Fig.4.6 Example of IERIAS execution.

5. 結 論

原子力発電プラントで発生した事故の種類・原因を同定するために推論機構 IERIASを開発した。知識ベースにはPWRプラントシミュレータによる異常過渡現象の解析結果から作成した。この知識ベースとIERIASを用いて事故例について推論を実行したところ

- ① 時間変化データを取扱うことができた、
- ② 知識ベースを知識ユニットに分割することにより、ルールの管理が容易になり、推論に要する時間も短縮された、
- ③ 端末機からのコンサルテーション機能を用いて診断に必要な情報を得ることにより診断を効率的に進めることができた、

これらのとこはIERIASのプログラミング言語にLISP (UTILISP) を用いたことが有効に作用している。またデータの一括入力を可能にしたことから診断の効率化にも有効であった。

以上のことからIERIASはプラント診断に有力な推論機構であるとの結論を得た。

謝 辞

推論機構 IERIAS の開発に際し、東京理科大学の溝口文雄助教授、東洋情報システム(株)の岡田二郎氏には貴重なコメントを頂いた。また計算センターの浅井清主任研究員、藤井実、中村康弘氏には基本設計の討論に参加して頂いた。

また、内藤倣孝核燃料施設安全解析室長には終始協力を頂いた。

以上の方々に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Weiss, S. M and Kulikowski, C. A. : "EXPERT : A System for Development Consultation Models" CBM-TR-97 (1979)
- 2) 横林正雄, 岡田二郎, 溝口文雄 「知識工学的手法を用いた原子炉異常診断システムの開発」 原子力学会分科会 C-29 (1981)
- 3) 岡田二郎, 横林正雄, 溝口文雄 「知識工学的手法による原子炉事故診断システムの開発」 日本原子力学会誌 Vol. 25, No. 6 P 469-479 (1983)
- 4) 横林正雄, 山本稔 「原子炉事故同定用推論機構 IERIAS の開発」 原子力学会分科会 C-11 (1983)
- 5) 横林正雄 「原子炉事故診断システム — 知識工学の原子炉事故同定への応用 —」 第3回システムサイエンスシンポジウム (1984)
- 6) Yokobayashi, M, Yoshida, K, Yamamoto, M and Kosaka, A : "Development of Inference Engine IERIAS for Reactor Accident Diagnosis using Knowledge Engineering Technique" (日本原子力学会欧文誌投稿中)
- 7) Chikayama, T : "UTILISP Manual" METR 81-6 (1981)
- 8) 村上喜光, 内藤彰, 横林正雄 「PWRプラントシミュレータによる事故解析・その1・一次系の事故解析」 JAERI-M 83-048 (1983)
- 9) 内藤彰, 村上喜光, 横林正雄 「PWRプラントシミュレータによる事故解析・その2・二次系の事故解析」 JAERI-M 83-081 (1983)
- 10) Shortliffe : "Computer-Based Medical Consultations: MYCIN" American Elsevier (1976)
- 11) 石塚満 「不確かな知識の取り扱い」 計測と制御 Vol. 22, No. 9 P 774~779 (1983)