

JAERI - M
85-023

PWRプラントシミュレータの事故解析
データに対する多変量解析

1985年3月

藤井 実・横林正雄・室伏 昭*

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, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 輪高野高速印刷

PWR プラントシミュレータの事故解析データに対する多変量解析

日本原子力研究所東海研究所計算センター

藤井 実・横林 正雄⁺・室伏 昭^{*}

(1985年1月30日受理)

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、知識工学を用いた原子炉事故診断システムを開発している。この診断システムは、知識ベースと IERIAS と名付けた推論機構で構成される。知識ベースは、PWR プラントシミュレータの事故解析データから、専門家の知識、経験によって試行錯誤的に作成されているのが現状である。

本報告は、知識ベース作成時における多変量解析法の利用可能性を検討したもので、この事故解析データに対する多変量解析結果と知識ベースにおける解析結果の利用方法を述べてある。本報告の結果と解析方法は、知識ベースを作成する専門家にとって有用と考える。

+ 安全解析部

* 原子力データセンター

Multivariate Analysis for the Accident Data from a PWR Plant Simulator

Minoru FUJII, Masao YOKOBAYASHI⁺, and Akira MUROFUSHI^{*}

Computing Center, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 30, 1985)

In JAERI, a reactor accident diagnostic system using a method of knowledge engineering has been developed to identify the cause and type of an abnormal transient of a reactor plant. This system consists of a knowledge base and the inference engine named IERIAS. This knowledge base has been created with the trial and error of an expert using the data from a PWR plant simulator.

In this report is described results of multivariate analysis for the simulated data and the use of these results for the knowledge base. This analysis is aimed at the examination for the usability of multivariate analysis for the knowledge base creation. The results and analyzing methods are useful for creating the knowlege bases by experts.

Keywords: Multivariate Analysis, Factor Analysis, Cluster Analysis,
Knowledge Engineering, Knowledge Base, Reactor Diagnosis,
Diagnostic System, IERIAS

+ Department of Nuclear Safety Evaluation, Tokai Research
Establishment, JAERI.

* Nuclear Energy Data Center.

目 次

1. はじめに	1
2. PWR プラントシミュレータによる事故解析データ	3
3. 模擬事故データに対する因子分析	10
3.1 模擬事故項目に対する因子分析	10
3.2 アラーム項目に対する因子分析	26
4. 模擬事故データに対するクラスター分析	42
4.1 使用するクラスター分析手法	42
4.2 模擬事故項目に対するクラスター分析	43
4.3 アラーム項目に対するクラスター分析	53
5. 知識ベース作成時における多変量解析結果の利用方法	63
5.1 知識工学と多変量解析	63
5.2 因子分析結果と知識ベース	64
5.3 クラスター分析結果と知識ベース	66
6. おわりに	70
謝 辞	70
参考文献	71
付録 模擬事故データの相関行列	72

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Accident data from a PWR plant simulator	3
3. Factor analysis for simulated accident data	10
3.1 Factor analysis for simulated accidents	10
3.2 Factor analysis for alarms	26
4. Cluster analysis for simulated accident data	42
4.1 Methods used for cluster analysis	42
4.2 Cluster analysis for simulated accidents	43
4.3 Cluster analysis for alarms	53
5. The use of multivariate analysis results for creating a knowledge base	63
5.1 Knowledge engineering and multivariate analysis	63
5.2 Factor analysis results and a knowledge base	64
5.3 Cluster analysis results and a knowledge base	66
6. Concluding Remarks	70
Acknowledgement	70
References	71
Appendix Correlation Matrices of simulated accident data	72

1. はじめに

米国のスリーマイルアイランドにおける原子炉事故（TMI事故）以来、各国で原子炉の事故診断システムの開発が活発化している。

原研においても、事故時炉内解析システムの開発が試みられ、その一環として、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用いた原子炉事故診断システムの開発が行われている¹⁾。この診断システムは、Fig. 1.1に示すように知識ベースと推論機構から成る。推論機構は、EXPERT²⁾を参考にして、IERIAS³⁾ (Inference Engine for Reactor accident IdentificAtion System)が開発されている。IERIASは、原子炉事故の過渡現象を取り扱うことができるなどの特徴を有している。知識ベースは、PWRプラントシミュレータによる事故解析データ^{4),5)}から専門家の知識、経験にもとづいて作成され、この診断システムの有用性の検討に供されている。

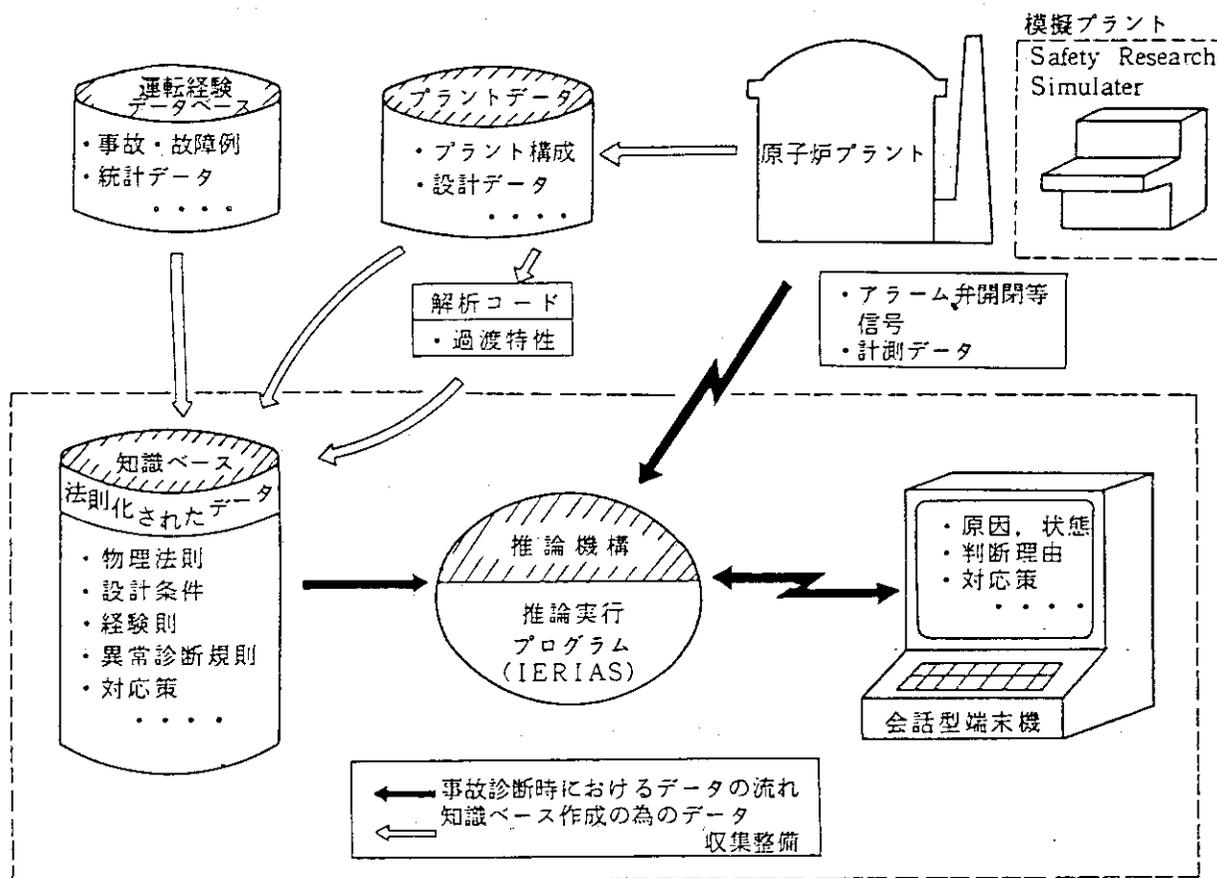


Fig.1.1 Concept of reactor accident diagnostic system using IERIAS.

しかし、知識工学分野では推論機構の研究に比べ知識ベース作成方法の研究は著しく立ち遅れ、知識ベース作成に関しては、診断対象分野の専門家にすべて委ねられている⁶⁾。このことは、診断対象分野の専門家が知識工学の未決部分で試行錯誤を必要とし、実用レベルの知識ベースを作成する上で大

きな障害となっている。原子炉事故診断システムの知識ベースも原子力の専門家によって試行錯誤的に作成されているのが現状で、

- ・作成された知識ベースに定量的な裏付けがない、
- ・知識ベース作成方法の指針がないため、多大の労力、時間を試行錯誤に費している

など、知識工学上の問題点が多い。

本報告では、知識ベース作成における上記の問題点を解決するひとつの方向として、知識ベース作成時における多変量解析法⁷⁾の利用可能性を検討する。PWRプラントシミュレータによる事故解析データに対して多変量解析を行い、その結果を知識ベースに利用する方法を検討する。

因子分析結果を知識ベースに反映させる試みは、鬼沢ら⁸⁾によってなされている。しかし、これは、 m 個の症状と排他的な n 個の疾患を特性項目として因子抽出した場合、主要 n 因子がそれぞれ n 個の疾患のいずれかと必ず1対1に対応することを前提とした方法である。因子分析の立場から言えば、この前提が成立するのは極めて特異なデータに対してのみである。疾患が排他的であることを考慮すると、一般には項目数の多い症状因子が主要因子として抽出されることが多く、上記前提は一般には成り立たない。また、主要因子に対する疾患の因子負荷量をすべて1に近いものとして、主要因子に対する症状の因子負荷量しか真理値に反映させていない点も近似がひどく、一般の診断システムでは利用できない考え方である。

本報告で事故解析データに適用した多変量解析法は、因子分析法とクラスター分析法⁷⁾である。分析結果の検討から、以下のことがわかった。

- (1) 因子分析における主因子情報は、
 - (i) 診断手順、質問内容、
 - (ii) 作成しておくべき診断ルールの検出、
 - (iii) 確信度計算⁶⁾における証拠の独立性
 に利用可能である。
- (2) 主因子と模擬事故項目、主因子とアラーム項目のそれぞれの相関係数は、確信度情報に利用可能である。
- (3) 主因子情報の表示方法として、Fig. 3.1は知識ベース作成時に有効である。
- (4) クラスター分析は、使用したデータにおける特性項目の分類に役立つ。しかし、クラスター分析結果による特性項目の分類結果と専門家による特性項目の分類方法は、原子炉の模擬事故項目については大きく異なっている。
- (5) 知識ベースを作成する場合、多変量解析法の適用可能なデータがあれば、因子分析、クラスター分析を行うことは、そのデータを知識ベースに反映させる場合多いに役立つ。しかし、知識ベース作成においては、多変量解析法が適用されなかったデータや専門家の知識、経験などの情報量が一般には多いことを考慮すると、多変量解析結果は、現在の研究水準では知識ベース作成の参考資料として役立つのとどまる。

2章では、PWRプラントシミュレータによる事故解析データと本報告で多変量解析に使用した模擬事故データとの関係について述べる。3、4章では、模擬事故データに対して、因子分析、クラスター分析を適用した結果を示す。クラスター分析の中では、最近離法、最遠離法、平均離法という類似しないもの(類別しやすいもの)からクラスターを作る新しい分析方法を試みている。5章では、多変量解析結果の知識ベースへの利用方法について述べる。

2. PWR プラントシミュレータによる事故解析データ

データ収集に使用した PWR プラントシミュレータは、出力 822 MWe、3 ループの PWR プラントを模擬したものである。対象プラントは、VEPCO (Virginia Electric Power Company) の Surry-1 である。このシミュレータは、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カバーするように設計され、プラントの弁、ポンプ機器などの故障を模擬した 49 種類のマルチファンクションが備わっている。

プラントシミュレータの設計データ、マルチファンクション、模擬されている数学モデルなどについては、文献 4)、5) に詳しい。

IERIAS 開発の一環として、このプラントシミュレータを使って、原子炉の一次冷却系、二次冷却系、核計装系の事故解析が行われ、一次系 26 項目、二次系 17 項目、核計装系 4 項目の合計 47 項目の事故解析データが得られた。^{4),5)}

事故解析データとしては、主要パラメータの過渡応答、発信された警報の時間、種類等が記録されている。一次冷却材ポンプ 1 台停止の模擬事故ケースについて得られた事故解析データを Table 2.1, Fig. 2.1 (一部) に示す。

本報告の分析で使うデータは、これらのデータのうち、模擬事故に対してアラーム (警報) が発生したかどうかを示す Table 2.2 の 0, 1 データである。以後、このデータを模擬事故データと呼ぶ。原データは、44 行 × 50 列のマトリックス・データである。行が模擬事故 (44 項目)、列がアラーム (50 項目) を示す。各項目名は、Table 2.3 に示す。

本報告は、Table 2.2 に対して、因子分析、クラスター分析を行う。このため、Table 2.2 において、アラームが全く発生しなかった事故 (列要素がすべて 0 である行 = 9, 10, 23, 29, 31 行) とすべての事故において発生しなかったアラーム (行要素がすべて 0 である列 = 14, 16, 20, 37, 40, 41, 43, 49, 50 列) のデータは除く。

また、以下の行と行、列と列は、全く同じデータをもつので、今回の分析では、番号の大きい方 (28, 41, 42 行と 39, 46 列) を除いた。

行	{	28 行目のデータと 27 行目のデータ
	{	41 行目のデータと 37 行目のデータ
	{	42 行目のデータと 17 行目のデータ
列	{	39 列目のデータと 5 列目のデータ
	{	46 列目のデータと 3 列目のデータ

以上より、本報告において分析対象とする模擬事故データは、Table 2.4 の 36 行 × 39 列のデータとなる。Table 2.4 は、行が模擬事故項目で、列がアラーム項目である。これは、模擬事故項目の分析に使用される。アラーム項目の分析には、Table 2.4 の行と列を変えた Table 2.5 の 39 行 × 36 列のデータが用いられる。Table 2.5 は、行がアラーム事故項目で列が模擬事故項目である。

Table 2.1 Main Events and Annunciators in the case of Loss of Reactor Coolant Pump "B"

TIME [MIN:SEC]	EVENTS	TIME [MIN:SEC]	ANNUNCIATORS
00:00	Reactor Coolant Pump "B" Trip	00:00	Reactor Scram
	Reactor Scram		Turbine Runback
	Turbine Trip		Rod Bottom
	Steam Dump Valve Position 100%		Turbine Trip
			Tavg/Tref Deviation
			Low Steam Line Pressure
00:41	Generator Trip		Steam Dump Armed
	"B" Coolant Loop Flow Reverse		Low Reactor Coolant Flow
01:46	Steam Dump Valve Position 50%		SG Level Error
02:43	Feedwater Control Valves Close		Auto Stop Oil to Drain
03:48	Steam Dump Valve Position 0%	00:24	Pressurizer Level Low
04:38	Auxiliary SG Feedwater Pump on (SG Level < 13% 2/3 Loops)	00:41	Exciter Field Breaker Trip
			Generator Trip
		03:26	Tavg Low
		04:03	SG "B" Alarm

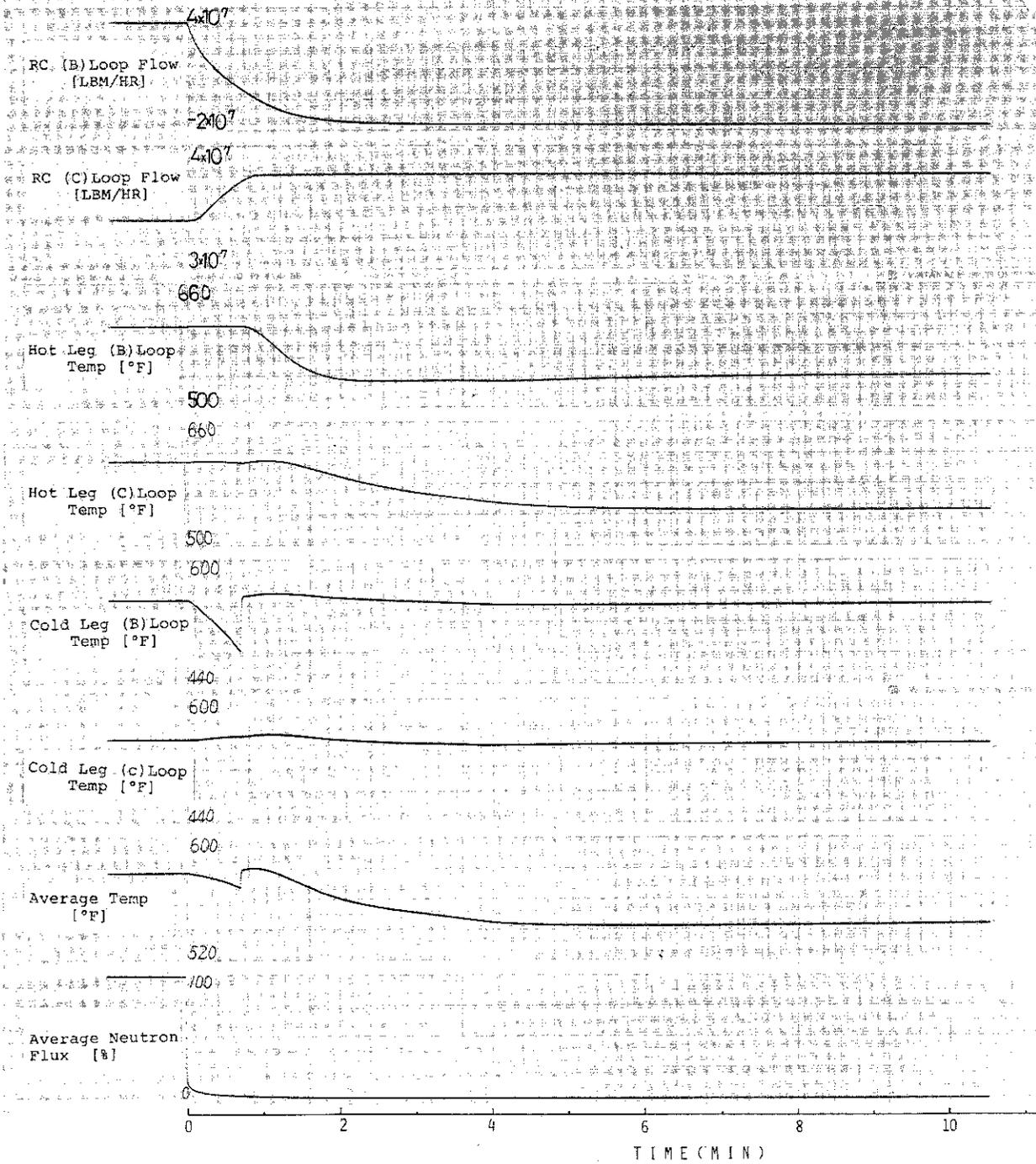


Fig.2.1 Transient Behaviors Caused by Loss of Reactor Coolant Pump B

Table 2.2 Original alarm data for simulated accidents of a PWR plant simulator.

	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	
1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 2.3 Simulated accidents and alarms.

(ROW)	模擬事故	(COLUMN)	アラーム	
1	RCSP11	1	ATRPRE	原子炉トリップ
2	RCSP12	2	ATRPTR	タービントリップ
3	RCSP1A	3	ATRPGE	発電機トリップ
4	RCSP1S	4	AINISI	安全注入系始動
5	RCSUTR	5	AINISG	CLSI
6	RCSLSL	6	ACRDSTP	制御棒停止
7	PSPV01	7	ACRDBTM	制御棒全挿入
8	PSPVCS	8	ACRDWIL	制御棒引抜限界
9	PHTBFN	9	ALEVPRH	加圧器水位高
10	PHTPFF	10	ALEVPRL	加圧器水位低
11	PRFVSD	11	APREPRH	加圧器圧力高
12	CHAGFL	12	APREPRL	加圧器圧力低
13	CLADRU	13	ATEPRLH	加圧器逃しライン温度高
14	CRDDR1	14	ATEPRVH	加圧器逃しタンク温度高
15	CRDEJ1	15	APRERTH	加圧器逃しタンク圧力高
16	CRDUCI	16	ALEVRWL	燃料貯蔵タンク水位低
17	CRDUCW	17	AFLRCSL	主冷却水流量低
18	CRDMDF	18	APREVTH	体積制御タンク圧力高
19	CRDWDF	19	APREVTL	体積制御タンク圧力低
20	CRDMAS	20	ATEMVTH	体積制御タンク温度高
21	CRDMIS	21	ATEMLDH	レットダウン流量温度高
22	CRDRTF	22	AFLCHAH	充填流量高
23	TGVFO1	23	AFLCHAL	充填流量低
24	TGVFC1	24	ATEAVRF	平均・設定温度偏差大
25	SDVLA	25	ATEAVGH	平均温度高
26	SGSLL	26	ATEAVGL	平均温度低
27	FWFPL	27	ALESGE	蒸気発生器水位エラー
28	FWFTL	28	ALESGBH	蒸気発生器2水位高
29	CCWPL	29	ALESGBL	蒸気発生器2水位低
30	CCWTL	30	ALESGBH	蒸気発生器3水位高
31	HPHDPL	31	ALESGBL	蒸気発生器3水位低
32	TURTRP	32	AFLSLH	主蒸気流量高
33	GENTRP	33	APRSLL	主蒸気圧力低
34	TURRBF	34	AVISOLC	主蒸気隔離弁閉
35	CPRPFH	35	AVSDVAR	主蒸気ダンプ準備完了
36	CPRPFL	36	AVISOWF	給水ライン隔離
37	CLATEH	37	AHTRWFT	給水ヒータ故障
38	CVTLFH	38	APRECVL	復水器真空度低
39	CVTLFL	39	APRECON	格納容器圧力高
40	CSHPFH	40	ALHPHDH	高圧ヒータドレン水位高
41	CSHPFL	41	ALHPHDL	高圧ヒータドレン水位低
42	CEHCAL	42	ARUNBTR	タービンランバック
43	CSGLFH	43	ASPTURL	タービン速度低
44	CSGLFL	44	AOFTDRL	ドレンへの自動給油停止
		45	AVOLRGT	電圧調整故障
		46	ATRPXF	励磁気ブレーカトリップ
		47	ATRPBR4	4KVブレーカ自動停止
		48	APADMAL	ラジエーションモニタ
		49	ABLCSI	安全注入系ブロック
		50	ASFLUXH	停止時高中性子束

Table 2.4 Data for analysis of simulated accidents.

模擬事故+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1 主冷却ポンプ1台停止	111000100100001000001011100001010011000
2 主冷却ポンプ2台停止	1110001001000010000010111000010010011000
3 主冷却ポンプ全数停止	111000101000001000001001000010010011010
4 主冷却ポンプ1台軸固着	111000101000001000001101100010010011000
5 蒸気発生器伝熱管破損	110000110101000010001001100010010011001
6 主冷却管小破断	00000001010100001010101000000000000000
7 加圧器スプレイ弁誤開	1110001010010000000000001000010010011000
8 加圧器スプレイ弁誤閉	00000000010010000000000000000000000000
9 加圧器逃し弁開固着	111100100101110000101001000010011011000
10 充填流量喪失	000000000001000001010000000000000000010
11 被覆管破損	000000000000000000000000000000000000001
12 制御棒1本落下	0000001000000000000001000000010000010000
13 制御棒1本飛出	1110001001000000000100001000011010011000
14 制御棒連続挿入	00000000010000001000101000000100000000
15 制御棒連続引抜	00000001000000000000000000000000000000
16 制御棒動作不可	00000000110000000000010000000000000000
17 制御棒引抜誤信号	1110001011000000000001001000010010011000
18 制御棒最大速度駆動	00000001100000000000010000000000000000
19 制御棒最低速度駆動	00000001010000000000010000000000000000
20 原子炉自動停止不可	0010000000000000000001101000010010001000
21 タービン制御弁誤閉	0000000000000000000001000000010010000000
22 大気放出弁からの漏洩	0000010000000000000001001000000000010000
23 主蒸気管破断	111111101011000000011011010111111011000
24 給水流量部分喪失	1110001010000000000001011010110010011000
25 復水器循環水全喪失	1110001010000000000001001010100000111000
26 タービントリップ	1110001010000000000001001000010010011000
27 発電機トリップ	1110001010000000000001001000010010001100
28 タービン自動ランバク不可	000001100000000000000000000000000000010000
29 加圧器圧力制御系高誤検知	111000101010100000001001000010010011000
30 加圧器圧力制御系低誤検知	1110001001011100001011001000010010011000
31 低温側温度検出器高誤検知	00000000000000000000010000000000000000
32 体積制御タンク水位誤高	00000000010000001001000000000000000000
33 体積制御タンク水位誤低	00000001000000010000100000000000000000
34 主蒸気ヘッダー圧高誤検知	100000000100000000001011010101001000000
35 蒸気発生器水位制御誤高	1110001010000000000001001001010110011000
36 蒸気発生器水位制御誤低	1110011010000000000001001000110010011000
+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*

Table 2.5 Data for analysis of alarms.

アラーム+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1 原子炉トリップ	111110101000100010000011111011000111
2 タービントリップ	111110101000100010000011111011000011
3 発電機トリップ	111100101000100010010011111011000011
4 安全注入系始動	0000000010000000000000100000000000
5 C L S I	0000000000000000000000100000000000
6 制御棒停止	000000000000000000000011000010000001
7 制御棒全挿入	1111101010011000100000111111111000011
8 制御棒引抜限界	000011000000001001100000000000001000
9 加圧器水位高	001100100000000111000011111010000011
10 加圧器水位低	110011011000110110100000000001010100
11 加圧器圧力高	000000000000000000000010000010000000
12 加圧器圧力低	000011101100000000000010000001000000
13 加圧器逃しライン温度高	000000011000000000000000000011000000
14 加圧器逃しタンク圧力高	0000000010000000000000000000000000
15 主冷却水流量低	1111000000000000000000000000000000
16 体積制御タンク圧力高	000000000000000000000000000000001000
17 体積制御タンク圧力低	000011000000010000000000000000010000
18 レットダウン流量温度高	000000000100000000000000000000100000
19 充填流量高	0000010010001000000000000000000000
20 充填流量低	000000000100000000000010000001010000
21 平均・設定温度偏差大	111111001001010111111111111011101111
22 平均温度高	000100000000000000001000000000000000
23 平均温度低	110001000000010000000011000000000100
24 蒸気発生器水位エラー	111110101000100010010111111011000111
25 蒸気発生器2水位高	1001100000000000000000000000000000
26 蒸気発生器2水位低	000000000000000000000011100000000100
27 蒸気発生器3水位高	00000000000000000000000000000000010
28 蒸気発生器3水位低	000000000000000000000011100000000101
29 主蒸気流量高	011110101001100010011011011011000011
30 主蒸気圧力低	100000000000110000000010000000000100
31 主蒸気隔離弁閉	000000000000000000000010000000000010
32 主蒸気ダンプ準備完了	111110101000100010011011011011000011
33 給水ライン隔離	000000001000000000000010000000000100
34 復水器真空度低	0000000000000000000000010000000000
35 タービンランバック	111110101001100010000111110111000011
36 ドレンへの自動給油停止	111110101000100010010011111011000011
37 電圧調整故障	0000000000000000000000001000000000
38 4KVブレーカ自動停止	0010000001000000000000000000000000
39 ラジエーションモニタ	0000100000100000000000000000000000

3. 模擬事故データに対する因子分析

Table 2.4の模擬事故データ（36行×39列）に対して因子分析を行う。このデータから、

(I) 模擬事故（行）項目の主因子

(II) アラーム（列）項目の主因子

を抽出し、それぞれ事故項目、アラーム項目の集約を行う。

因子分析は、富士通の統計データ処理パッケージ ANALYST⁹⁾を用いて行う。ANALYSTは、重回帰分析、因子分析、主成分分析、数量化理論などの多変量解析を行う機能をもっている。

ANALYST/ANALYZE¹⁰⁾のFACTOR（因子分析）コマンドを用いて因子抽出を行った。

FACTORの標準使用では、相関行列を因子抽出行列として用い、因子抽出は主因子法を、因子回転はバリマックス回転を用いている。

3.1 模擬事故項目に対する因子分析

模擬事故36項目に対して因子分析を行った。固有値1.0以上の因子が9個抽出された。この累積寄与率は82.2%である。この因子負荷行列をTable 3.1に示す。さらにこの主要9因子の特徴づけを容易にするため、因子軸の回転（バリマックス回転）を行い、Table 3.2の因子負荷行列を得た。以後の分析には、Table 3.2の因子軸回転後の因子負荷行列を用いる。なお、Table 3.1、Table 3.2のA(1)～A(36)は、Table 2.4の行番号（模擬事故項目）に対応している。

これらの主要事故因子9個それぞれについて、因子負荷量（相関）の高い模擬事故項目から順に並べて図示したものがFig. 3.1の左半分の図である。また、主要事故因子9個（因子負荷量）とアラーム項目39個（0, 1データ）の間の相関をとり、各主要事故因子毎に、相関の高いアラーム項目から順に並べて図示したものがFig. 3.1の右半分の図である。Fig. 3.1は、左半分が主要事故因子と模擬事故項目の関係、右半分が主要事故因子とアラーム項目の関係を示している。

Fig. 3.1-(1)から(9)に示した主要事故因子9個の解釈を以下に行う。第1事故因子は、原子炉スクラムを伴う事故で1～3, 7, 24, 29, 32, 35, 36のアラームが発生するものである。第2事故因子は、制御棒速度制御の故障で8の制御棒引抜き限界アラームが発生するものと考えられる。第3事故因子は、過出力と誤認したり、センサーが低いのに高いと誤認する事故で、10, 17, 23, 26, 30などの低いという通知をするアラームが発生するものと考えられる。第4事故因子は、温度の高くなる事故、第5事故因子は制御棒落下などで6の制御棒停止アラームの発生する事故、第6事故因子は加圧器スプレイ弁が閉じたときの事故、第7事故因子は制御棒制御系の異常、第8事故因子は充填流量の減少事故、第9事故因子は被覆管破損事故に関するものと解釈される。

Table 3.3, Table 3.4は、それぞれ主要事故因子と模擬事故項目の相関係数、主要事故因子とアラーム項目の相関係数を一覧表の形で示したものである。

次に、因子パターン（因子負荷量）を2次元的に表示する。Fig. 3.2に第1因子軸と第2因子軸を座標とした因子軸回転前の因子パターンを図示する。Fig. 3.3は、因子軸回転後の因子パターンである。Fig. 3.2とFig. 3.3を比較すると、因子軸回転により、Fig. 3.3の模擬事故A(1)～A(36)は因子軸の近くに集められているのがよくわかる。

Table 3.1 Unrotated factor pattern (loading matrix) for simulated accidents.

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6	因子7	因子8	因子9
A(1)	0.688625	0.087315	0.334060	-0.156526	-0.018055	-0.231050	-0.243565	0.123724	0.018363
A(2)	0.845999	0.064595	0.279367	-0.010062	-0.004485	-0.071002	-0.192344	0.102180	-0.031685
A(3)	0.870111	-0.132501	-0.106281	0.097220	-0.054191	0.026890	0.047761	-0.027017	0.086565
A(4)	0.836236	-0.135572	-0.119501	0.100024	-0.097125	-0.017498	-0.130367	-0.080596	0.040139
A(5)	0.606779	0.254664	0.185330	0.371237	0.219141	-0.114916	-0.233978	0.150561	0.304603
A(6)	-0.054422	0.741717	0.239922	0.112662	0.079666	-0.083236	0.015574	0.322430	0.057098
A(7)	0.833868	-0.339930	0.047422	0.224837	0.013402	-0.095627	0.165139	0.109074	0.093841
A(8)	-0.055016	0.309242	0.617358	0.146753	0.030440	-0.041021	0.108354	-0.517697	-0.304132
A(9)	0.651217	0.002799	0.329387	0.178756	0.079130	0.093370	-0.020170	-0.002889	0.324844
A(10)	-0.232932	-0.071008	0.111225	0.262780	0.137160	0.456886	0.534016	0.352293	0.259416
A(11)	-0.135152	-0.032352	-0.052465	0.141031	0.049405	-0.002690	-0.460367	-0.266498	0.664860
A(12)	0.591802	0.194656	-0.166976	-0.057662	0.474435	0.282439	-0.135737	-0.031187	-0.045452
A(13)	0.723028	-0.172301	0.408659	0.110501	0.034910	-0.193355	-0.151608	0.108154	-0.113029
A(14)	0.034404	0.667421	0.424260	-0.366819	-0.071599	0.027351	-0.150072	0.137123	0.134956
A(15)	-0.116688	0.418499	-0.353923	0.475587	0.107277	-0.525186	0.038024	0.263907	-0.125167
A(16)	0.293886	0.672223	0.062196	-0.143297	-0.148692	0.063916	0.298489	-0.446145	0.151109
A(17)	0.954429	0.051937	0.139816	0.081504	-0.032229	-0.066352	0.078424	-0.130787	0.048334
A(18)	0.219264	0.662930	-0.545995	0.107930	-0.095759	-0.167908	0.277537	-0.115929	0.093576
A(19)	0.137164	0.909299	0.016898	0.166805	0.060293	-0.156995	0.034024	-0.043428	-0.082319
A(20)	0.629712	0.053554	-0.105665	0.122849	-0.322041	0.321592	-0.248477	0.104769	-0.144506
A(21)	0.511156	0.314797	-0.177668	0.103106	-0.165222	0.544715	-0.259504	0.096052	-0.113284
A(22)	0.418517	0.228170	-0.201501	-0.359908	0.523914	0.137878	-0.060284	-0.034337	-0.051859
A(23)	0.540596	-0.188333	-0.068621	-0.433457	0.005048	0.038096	0.253091	0.317177	0.000472
A(24)	0.849518	-0.086006	-0.079347	-0.240766	-0.136564	-0.140664	0.074567	0.119434	0.085246
A(25)	0.682781	-0.093384	-0.157615	-0.298903	-0.028216	-0.297372	0.260135	-0.095837	0.141080
A(26)	0.975705	-0.099231	-0.092427	0.065310	-0.039905	-0.022910	0.054672	-0.031300	0.059470
A(27)	0.842173	-0.080071	-0.114858	0.088735	-0.280798	-0.011408	0.050535	-0.049503	0.052885
A(28)	0.272099	-0.179784	-0.077085	-0.192662	0.860235	-0.092996	-0.008228	-0.100353	-0.043265
A(29)	0.867795	-0.117373	-0.047871	0.096741	-0.039868	0.015713	0.088765	-0.191916	-0.103731
A(30)	0.725528	0.017822	0.369207	0.275864	-0.139062	0.234591	0.220187	0.071170	-0.041963
A(31)	0.338814	0.680281	-0.288987	-0.246432	-0.023670	0.394879	-0.054012	-0.044332	0.014565
A(32)	-0.146562	0.335283	0.609464	0.097687	0.087341	0.096684	0.239043	0.000646	0.277997
A(33)	0.050101	0.677451	-0.477544	0.170117	0.045477	-0.082304	-0.055937	0.113039	-0.142067
A(34)	0.177472	0.361275	0.269587	-0.634153	-0.231625	-0.191238	0.202239	0.202239	-0.018100
A(35)	0.857066	-0.134726	-0.140027	0.047159	-0.061229	-0.004010	0.044943	-0.071814	0.029468
A(36)	0.887178	-0.132685	-0.160981	-0.122341	0.087782	-0.053163	0.092173	-0.034996	0.036258
因子部序	13.184179	4.757815	2.722751	1.978150	1.716393	1.568110	1.351767	1.230108	1.096563

Table 3.2 Rotated factor pattern (loading matrix) for simulated accidents.

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6	因子7	因子8	因子9
A(1)	0.655360	0.000118	0.470142	0.013475	0.105003	0.092213	-0.213592	-0.164652	0.060247
A(2)	0.800810	0.014077	0.318785	0.167773	0.132201	0.134134	-0.198408	-0.069332	0.025071
A(3)	0.868558	-0.007443	-0.083447	0.152498	0.101433	-0.087602	0.079929	0.003976	0.022932
A(4)	0.828373	-0.006844	-0.084338	0.199086	0.071240	-0.061407	0.014839	-0.161435	0.093126
A(5)	0.592895	0.356269	0.175745	0.088308	0.162006	0.130547	-0.247269	0.194147	0.421147
A(6)	-0.134663	0.569438	0.522260	0.094916	0.001183	0.189584	-0.060412	0.281578	0.032597
A(7)	0.915559	-0.054575	-0.156497	-0.078839	0.038896	-0.079589	-0.127886	0.153905	-0.034141
A(8)	-0.054748	-0.013169	0.134923	-0.079973	-0.047120	0.911464	0.091963	-0.025160	-0.079580
A(9)	0.612876	-0.014357	0.045861	0.212552	0.133567	0.381645	-0.233936	0.039735	-0.206385
A(10)	-0.181679	-0.067113	-0.157638	0.012891	-0.054737	-0.107530	0.011007	0.870525	-0.099200
A(11)	-0.097499	-0.077057	-0.053448	-0.014103	-0.012046	-0.070776	0.041799	-0.058792	0.860556
A(12)	0.403028	0.114730	0.008374	0.368884	0.054490	-0.020159	0.037057	0.038246	0.048068
A(13)	0.757329	-0.077704	0.174174	-0.039527	0.052863	0.213950	-0.391930	-0.057082	-0.028456
A(14)	-0.097578	0.129337	0.842931	0.167828	0.038958	0.196636	0.094100	0.062498	0.093304
A(15)	-0.081856	0.904288	-0.135270	-0.185198	-0.079123	-0.072171	-0.147238	-0.055317	-0.032365
A(16)	0.201541	0.230817	0.334405	0.127263	0.030779	0.371058	0.730588	0.052023	0.053004
A(17)	0.943347	0.046350	0.110679	0.085950	0.116847	0.182232	0.110862	0.001106	0.017825
A(18)	0.147082	0.724749	0.006089	0.104116	0.020297	-0.102914	0.603097	-0.035993	-0.010073
A(19)	0.017489	0.748982	0.360356	0.170788	0.082193	0.360344	0.232203	0.020802	0.021142
A(20)	0.555128	0.012453	0.012734	0.622041	-0.117911	-0.057570	-0.059773	-0.092725	-0.039827
A(21)	0.344403	0.123352	0.061209	0.818454	0.063424	-0.020243	0.052808	0.034311	0.012195
A(22)	0.211303	0.075323	0.165769	0.177520	0.742791	-0.080049	0.152110	-0.070263	-0.053078
A(23)	0.496752	-0.208856	0.235397	-0.017553	0.207480	-0.399164	0.073029	0.088667	-0.353217
A(24)	0.832543	-0.044637	0.220866	0.021815	0.093279	-0.259838	0.117215	-0.109473	-0.112036
A(25)	0.694645	-0.025310	0.119166	-0.247785	0.167084	-0.213287	0.331884	-0.146939	-0.105831
A(26)	0.964042	0.022392	-0.033383	0.139498	0.141429	-0.068411	0.089928	-0.031555	-0.007701
A(27)	0.859524	0.014376	-0.050457	0.208193	-0.102954	-0.077155	0.148004	-0.063139	-0.011758
A(28)	0.170656	-0.057693	-0.131599	-0.258022	0.882069	0.006754	-0.121796	-0.028108	0.007590
A(29)	0.856179	-0.030586	-0.136510	0.146350	0.128909	0.110432	0.122131	-0.093095	-0.096830
A(30)	0.713617	-0.021363	0.033233	0.175660	0.145571	0.324434	-0.113044	0.419940	-0.110167
A(31)	0.101386	0.286796	0.324556	0.619298	0.279141	-0.046883	0.471006	-0.002680	-0.005965
A(32)	-0.122162	0.003330	0.376008	-0.138588	-0.070895	0.429384	0.048674	0.524109	0.155902
A(33)	-0.080854	0.772817	0.040945	0.300568	-0.113231	-0.080450	0.185714	-0.109562	-0.042485
A(34)	0.091212	-0.031308	0.811930	-0.031263	-0.074132	-0.073060	0.133455	-0.174498	-0.211618
A(35)	0.848109	-0.013184	-0.090939	0.139791	0.116966	-0.082812	0.111492	-0.075575	-0.019982
A(36)	0.847213	-0.033186	-0.007016	0.048837	0.299506	-0.155040	0.138261	-0.083576	-0.077406
因子番号	12.155628	3.215105	2.832534	2.278008	2.250470	2.131659	1.926306	1.555049	1.261077

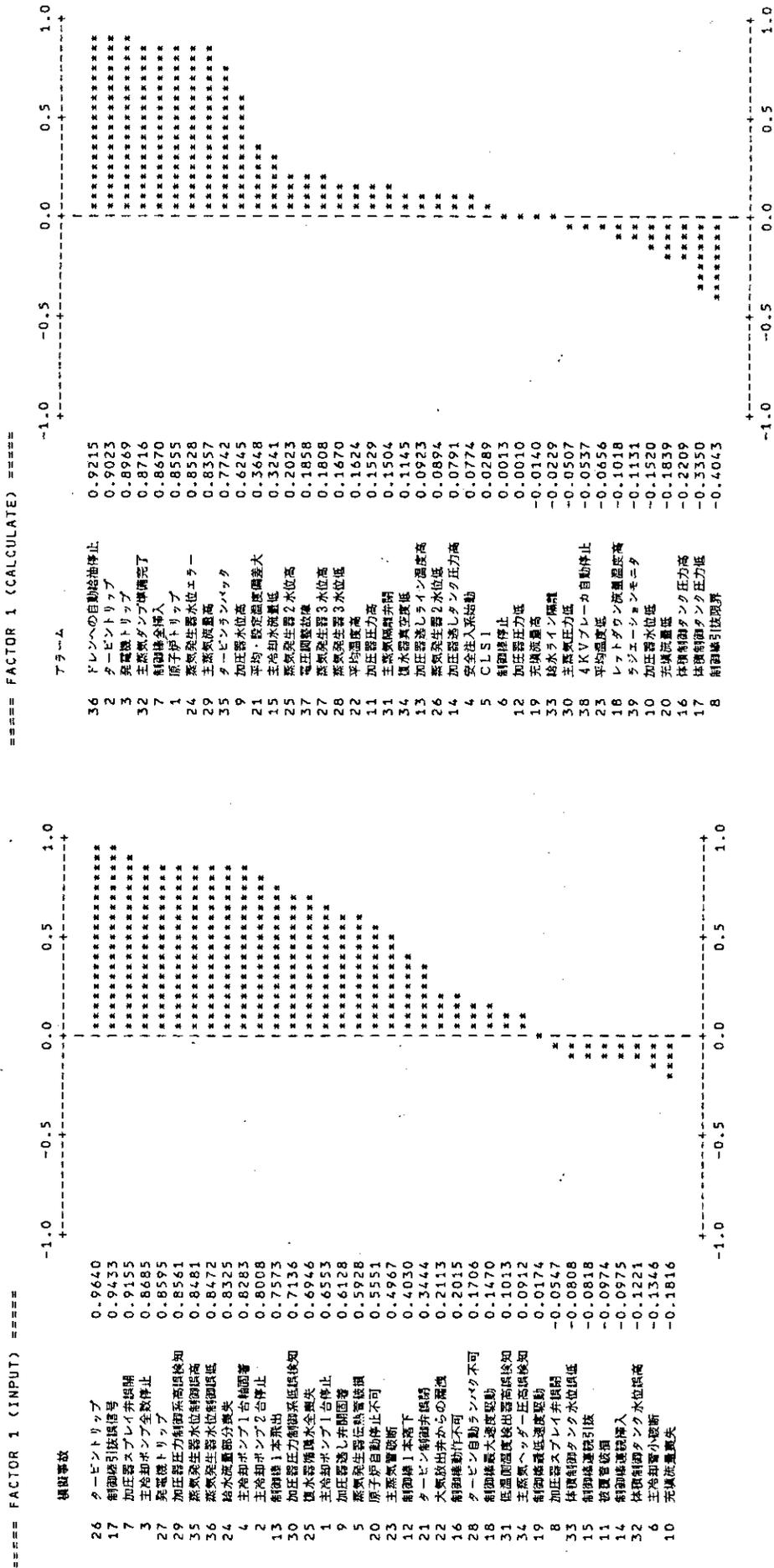


Fig.3.1-(1) Sorted correlation data between 1st accident factor and simulated accidents (left figure), and between 1st accident factor and alarms (right figure).

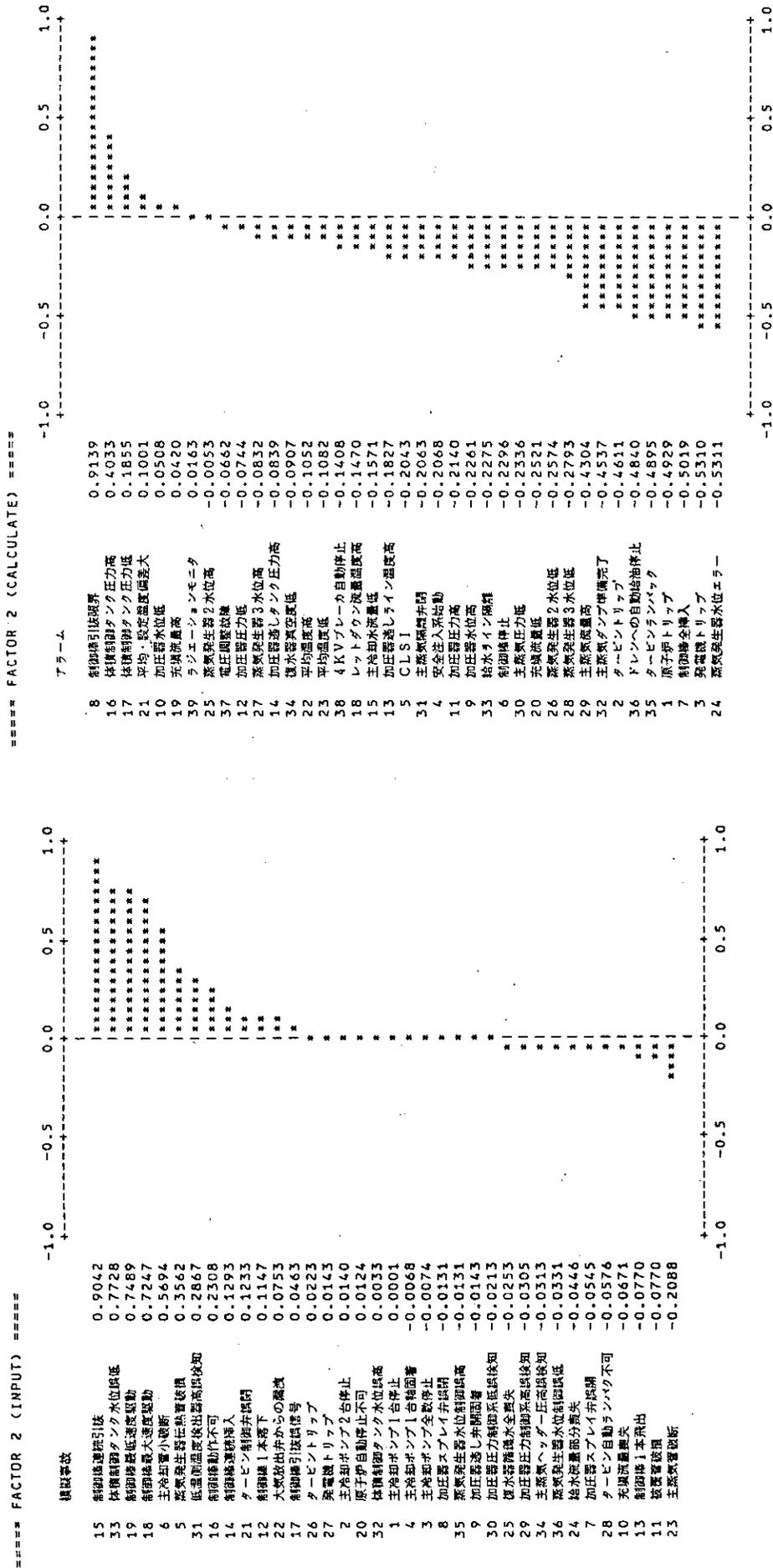


Fig.3.1-(2) Sorted correlation data between 2nd accident factor and simulated accidents (left figure), and between 2nd accident factor and alarms (right figure).

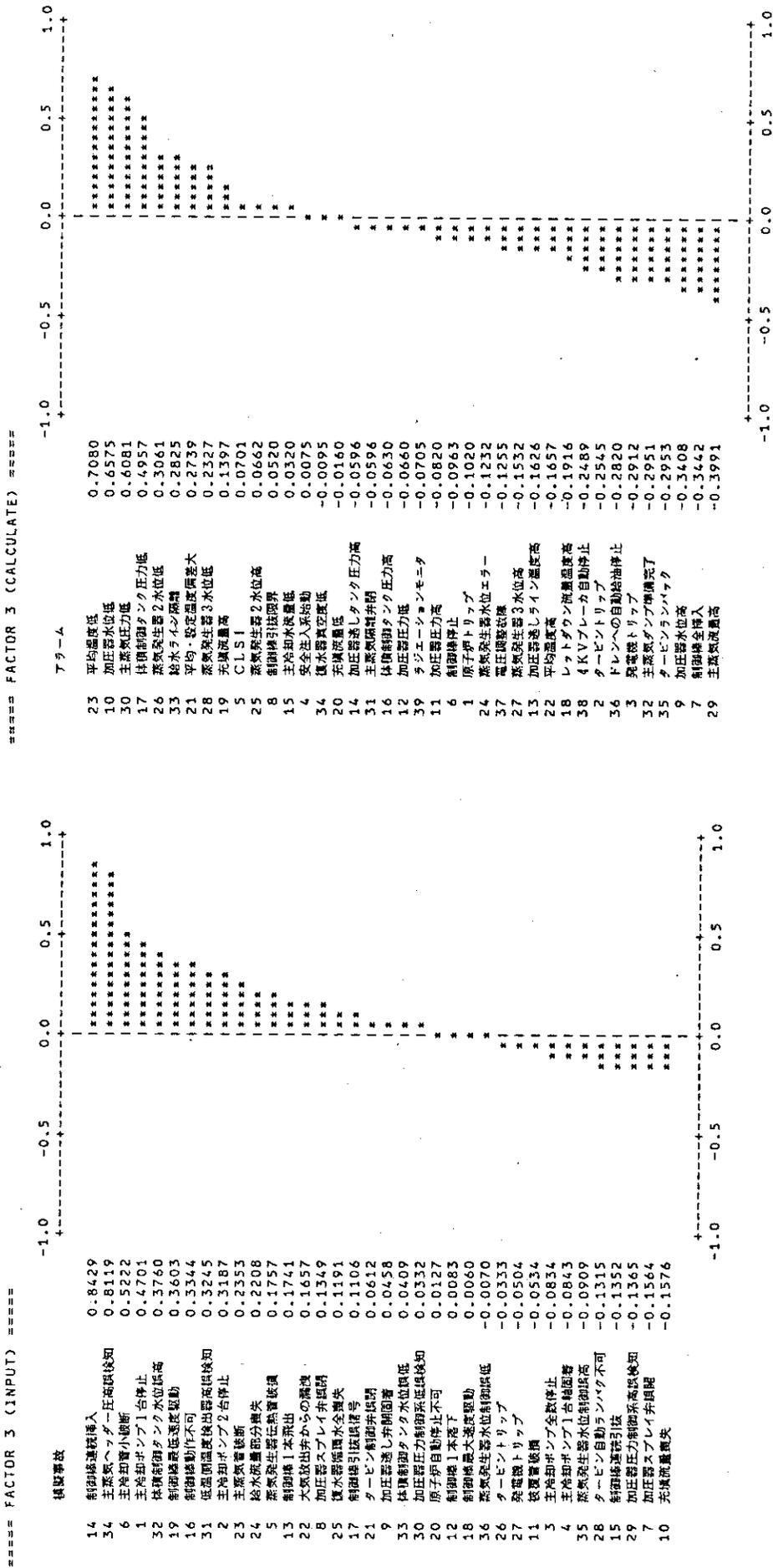


Fig.3.1-(3) Sorted correlation data between 3rd accident factor and simulated accidents (left figure), and between 3rd accident factor and alarms (right figure).

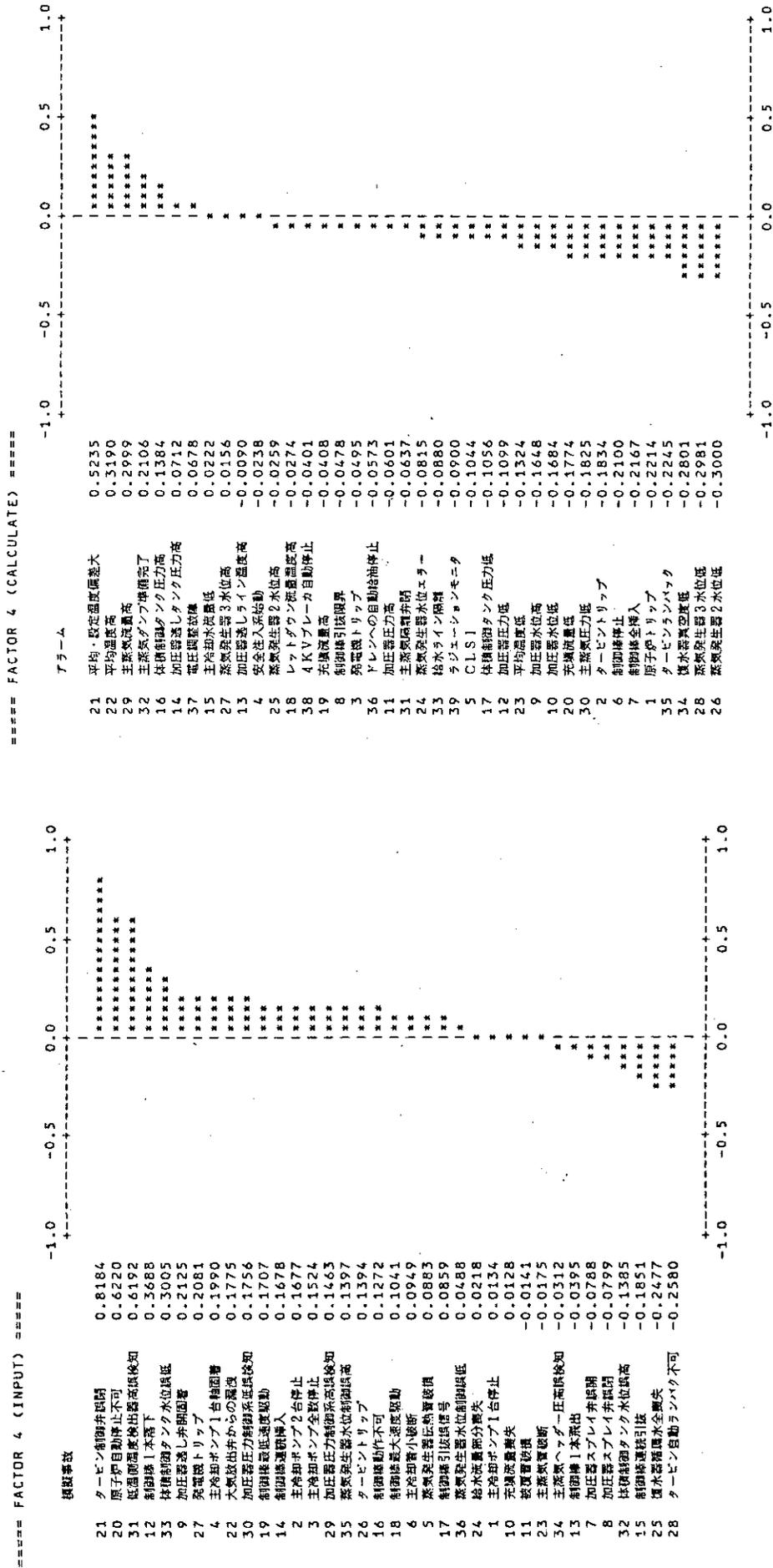


Fig.3.1-(4) Sorted correlation data between 4th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 4th accident factor and alarms (right figure).

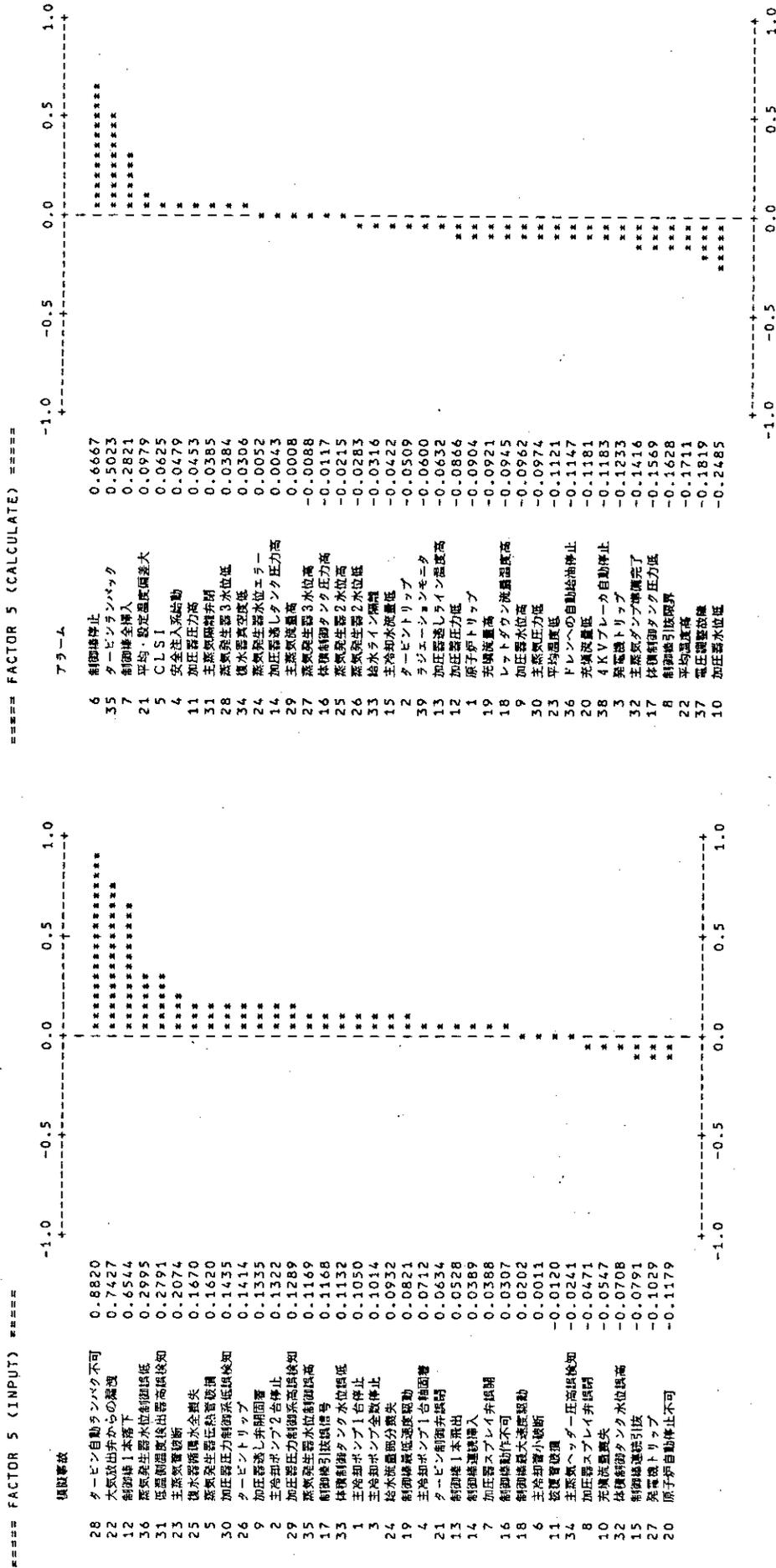


Fig.3.1-(5) Sorted correlation data between 5th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 5th accident factor and alarms (right figure).

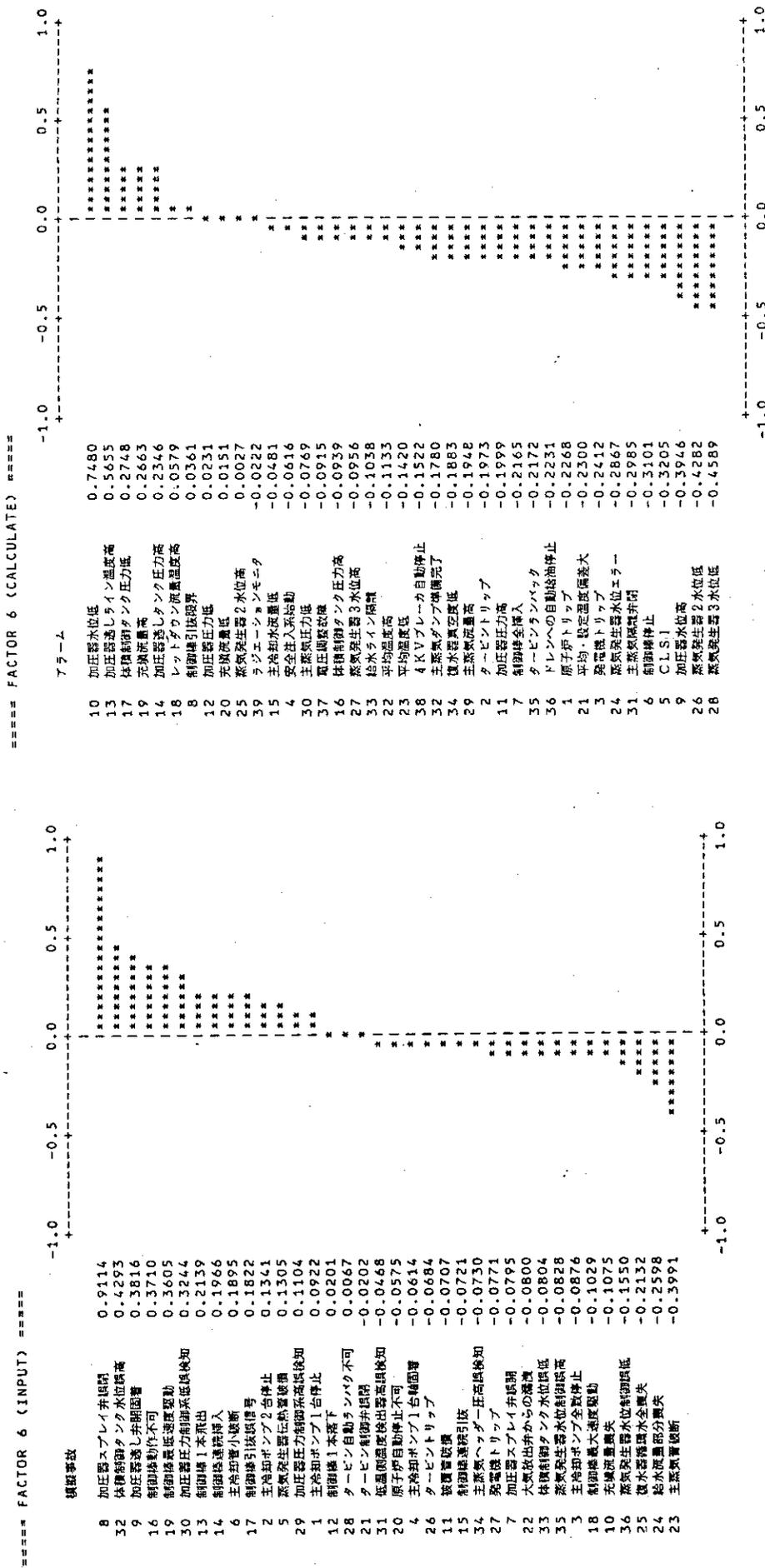


Fig.3.1-(6) Sorted correlation data between 6th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 6th accident factor and alarms (right figure).

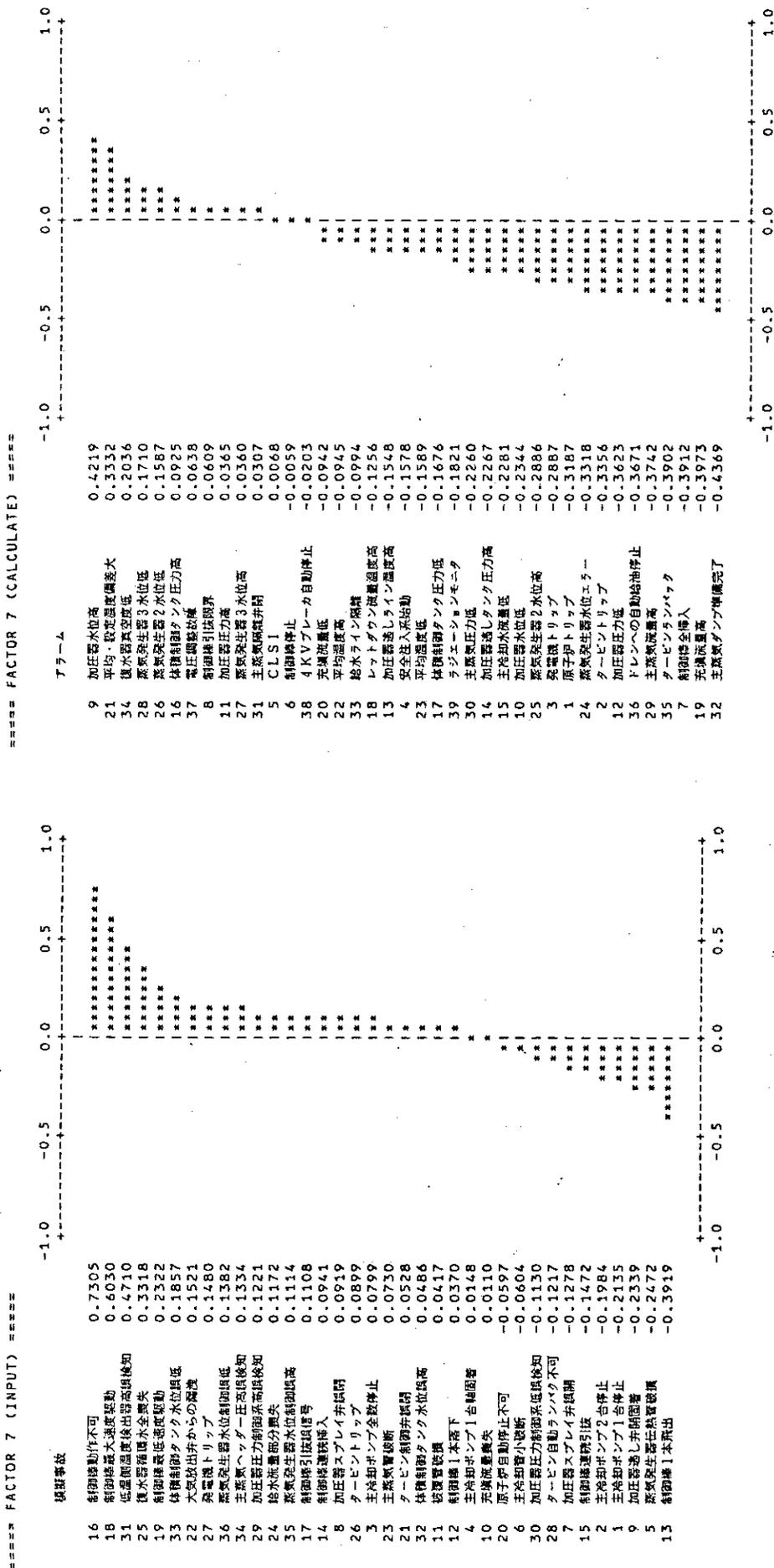


Fig.3.1-(7) Sorted correlation data between 7th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 7th accident factor and alarms (right figure).

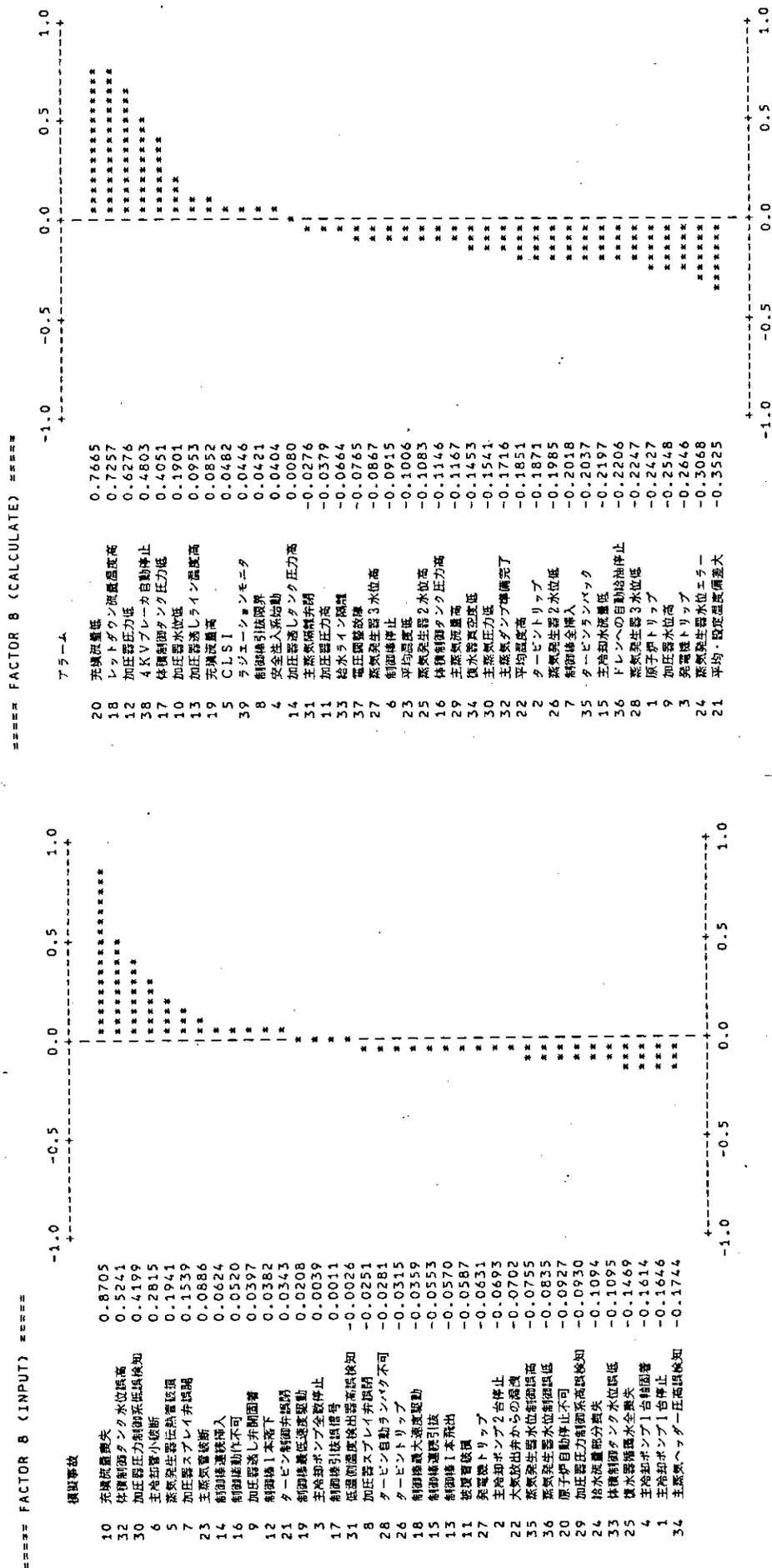


Fig.3.1-(8) Sorted correlation data between 8th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 8th accident factor and alarms (right figure).

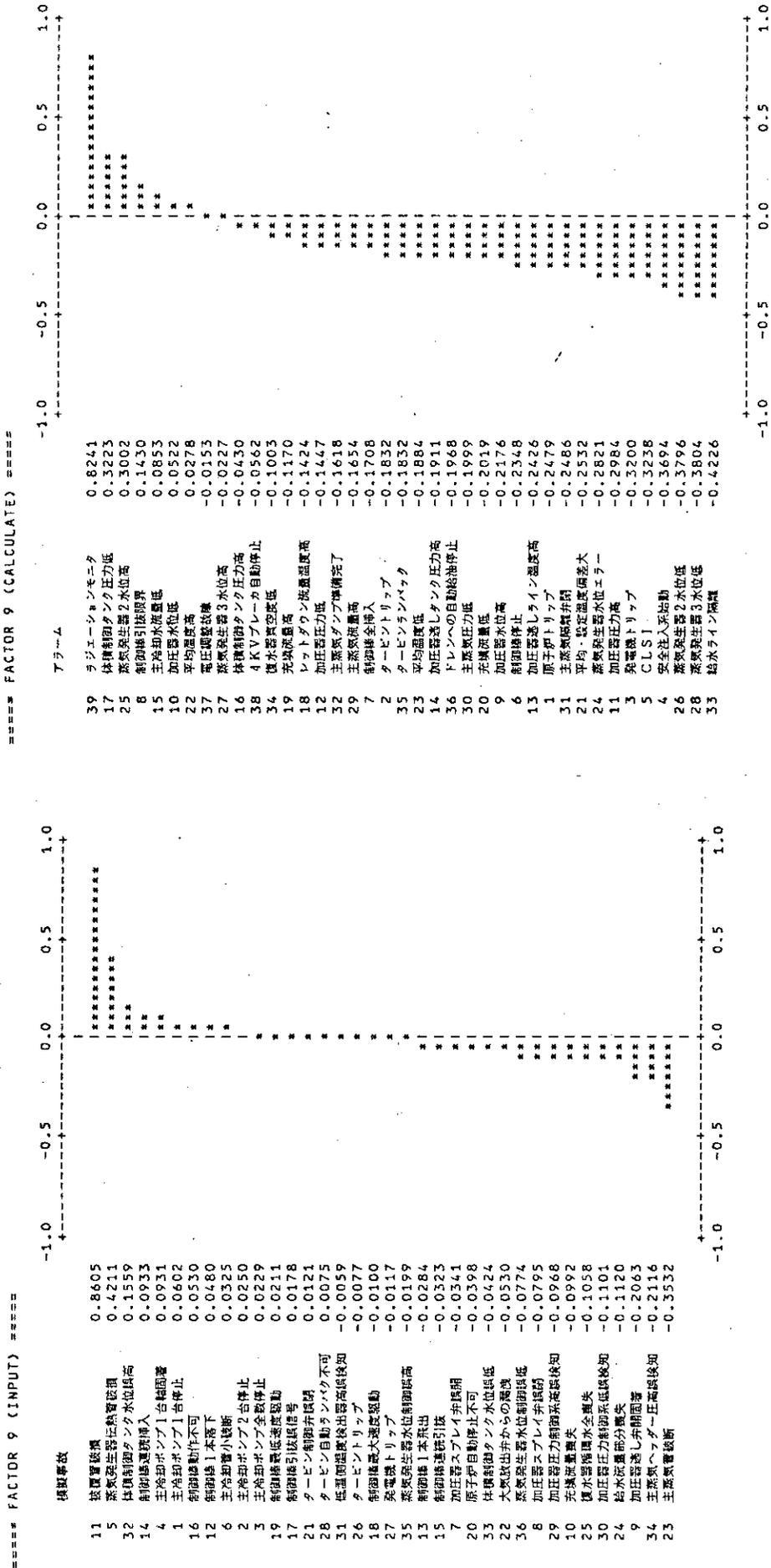


Fig.3.1-(9) Sorted correlation data between 9th accident factor and simulated accidents (left figure), and between 9th accident factor and alarms (right figure).

Table 3.3 Correlaton data between main accident factor and simulated accidents.

FACTOR (INPUT)	FACT- 1	FACT- 2	FACT- 3	FACT- 4	FACT- 5	FACT- 6	FACT- 7	FACT- 8	FACT- 9
模擬事故									
1 主冷却ポンプ1台停止	0.6553	0.0001	0.4701	0.0134	0.1050	0.0922	-0.2135	-0.1646	0.0602
2 主冷却ポンプ2台停止	0.8008	0.0140	0.3187	0.1677	0.1322	0.1341	-0.1984	-0.0693	0.0250
3 主冷却ポンプ全数停止	0.8685	-0.0074	-0.0834	0.1524	0.1014	-0.0876	0.0799	0.0039	0.0229
4 主冷却ポンプ1台軸固着	0.8283	-0.0068	-0.0843	0.1990	0.0712	-0.0614	0.0148	-0.1614	0.0931
5 蒸気発生器伝熱管破損	0.5928	0.3562	0.1757	0.0883	0.1620	0.1305	-0.2472	0.1941	0.4211
6 主冷却管小破断	-0.1346	0.5694	0.5222	0.0949	0.0011	0.1895	-0.0604	0.2815	0.0325
7 加圧器スプレイ弁誤閉	0.9155	-0.0545	-0.1564	-0.0788	0.0388	-0.0795	-0.1278	0.1539	-0.0341
8 加圧器スプレイ弁誤開	-0.0547	-0.0131	0.1349	-0.0799	-0.0471	0.9114	0.0919	-0.0251	-0.0795
9 加圧器逃し弁開固着	0.6128	-0.0143	0.0458	0.2125	0.1335	0.3816	-0.2339	0.0397	-0.2063
10 充満流量喪失	-0.1816	-0.0671	-0.1576	0.0128	-0.0547	-0.1075	0.0110	0.8705	-0.0992
11 被覆管破損	-0.0974	-0.0770	-0.0534	-0.0141	-0.0120	-0.0707	0.0417	-0.0587	0.8605
12 制御棒1本落下	0.4030	0.1147	0.0083	0.3688	0.6544	0.0201	0.0370	0.0382	0.0480
13 制御棒1本飛出	0.7573	-0.0770	0.1741	-0.0395	0.0528	0.2139	-0.3919	-0.0570	-0.0284
14 制御棒連続挿入	-0.0975	0.1293	0.8429	0.1678	0.0389	0.1966	0.0941	0.0624	0.0933
15 制御棒連続引抜	-0.0818	0.9042	-0.1352	-0.1851	-0.0791	-0.0721	-0.1472	-0.0553	-0.0323
16 制御棒動作不可	0.2015	0.2308	0.3344	0.1272	0.0307	0.3710	0.7305	0.0520	0.0530
17 制御棒引抜誤信号	0.9433	0.0463	0.1106	0.0859	0.1168	0.1822	0.1108	0.0011	0.0178
18 制御棒最大速度駆動	0.1470	0.7247	0.0060	0.1041	0.0202	-0.1029	0.6030	-0.0359	-0.0100
19 制御棒最低速度駆動	0.0174	0.7489	0.3603	0.1707	0.0821	0.3605	0.2322	0.0208	0.0211
20 原子炉自動停止不可	0.5551	0.0124	0.0127	0.6220	-0.1179	-0.0575	-0.0597	-0.0927	-0.0398
21 タービン制御弁誤閉	0.3444	0.1233	0.0612	0.8184	0.0634	-0.0202	0.0528	0.0343	0.0121
22 大気放出弁からの漏洩	0.2113	0.0753	0.1657	0.1775	0.7427	-0.0800	0.1521	-0.0702	-0.0530
23 主蒸気管破断	0.4967	-0.2088	0.2353	-0.0175	0.2074	-0.3991	0.0730	0.0886	-0.3532
24 給水流最部分喪失	0.8325	-0.0446	0.2208	0.0218	0.0932	-0.2598	0.1172	-0.1094	-0.1120
25 復水器循環水全喪失	0.6946	-0.0253	0.1191	-0.2477	0.1670	-0.2132	0.3318	-0.1469	-0.1058
26 タービントリップ	0.9640	0.0223	-0.0333	0.1394	0.1414	-0.0684	0.0899	-0.0315	-0.0077
27 発電機トリップ	0.8595	0.0143	-0.0504	0.2081	-0.1029	-0.0771	0.1480	-0.0631	-0.0117
28 タービン自動ランバク不可	0.1706	-0.0576	-0.1315	-0.2580	0.8820	0.0067	-0.1217	-0.0281	0.0075
29 加圧器圧力制御系高誤検知	0.8561	-0.0305	-0.1365	0.1463	0.1289	0.1104	0.1221	-0.0930	-0.0968
30 加圧器圧力制御系低誤検知	0.7136	-0.0213	0.0332	0.1756	0.1435	0.3244	-0.1130	0.4199	-0.1101
31 低側温度検出器高誤検知	0.1013	0.2867	0.3245	0.6192	0.2791	-0.0468	0.4710	-0.0026	-0.0059
32 体積制御タンク水位誤高	-0.1221	0.0033	0.3760	-0.1385	-0.0708	0.4293	0.0486	0.5241	0.1559
33 体積制御タンク水位誤低	-0.0808	0.7728	0.0409	0.3005	0.1132	-0.0804	0.1857	-0.1095	-0.0424
34 主蒸気ヘッダー圧高誤検知	0.0912	-0.0313	0.8119	-0.0312	-0.0241	-0.0730	0.1334	-0.1744	-0.2116
35 蒸気発生器水位制御誤高	0.8481	-0.0131	-0.0909	0.1397	0.1169	-0.0828	0.1114	-0.0755	-0.0199
36 蒸気発生器水位制御誤低	0.8472	-0.0331	-0.0070	0.0488	0.2995	-0.1550	0.1382	-0.0835	-0.0774

Table 3.4 Correlaton data between main accident factor and alarms.

アラーム	FACT-1	FACT-2	FACT-3	FACT-4	FACT-5	FACT-6	FACT-7	FACT-8	FACT-9
1	0.8555	-0.4929	-0.1020	-0.2214	-0.0904	-0.2268	-0.3187	-0.2427	-0.2479
2	0.9023	-0.4611	-0.2545	-0.1834	-0.0509	-0.1973	-0.3356	-0.1871	-0.1832
3	0.8969	-0.5310	-0.2912	-0.0495	-0.1233	-0.2412	-0.2887	-0.2646	-0.3200
4	0.0774	-0.2068	0.0075	-0.0238	0.0479	-0.0616	-0.1578	0.0404	-0.3694
5	0.0289	-0.2043	0.0701	-0.1044	0.0625	-0.3205	0.0068	0.0482	-0.3238
6	0.0013	-0.2296	-0.0963	-0.2100	0.6667	-0.3101	-0.0059	-0.0915	-0.2348
7	0.8670	-0.5019	-0.3442	-0.2167	0.2821	-0.2165	-0.3912	-0.2018	-0.1708
8	-0.4043	0.9139	0.0520	-0.0478	-0.1628	0.0361	0.0609	0.0421	0.1430
9	0.6245	-0.2261	-0.3408	-0.1648	-0.0962	-0.3946	0.4219	-0.2548	-0.2176
10	-0.1520	0.0508	0.6575	-0.1684	-0.2485	0.7480	-0.2344	0.1901	0.0522
11	0.1529	-0.2140	-0.0820	-0.0601	0.0453	-0.1999	0.0365	-0.0379	-0.2984
12	0.0010	-0.0744	-0.0660	-0.1099	-0.0866	0.0231	-0.3623	0.6276	-0.1447
13	0.0923	-0.1827	-0.1626	-0.0090	-0.0632	0.5655	-0.1548	0.0953	-0.2426
14	0.0791	-0.0839	-0.0596	0.0712	0.0043	0.2346	-0.2267	0.0080	-0.1911
15	0.3241	-0.1571	0.0320	0.0222	-0.0481	-0.0481	-0.2281	-0.2197	0.0853
16	-0.2209	0.4033	-0.0630	0.1384	-0.0117	-0.0939	0.0925	-0.1146	-0.0430
17	-0.3350	0.1855	0.4957	-0.1056	-0.1569	0.2748	-0.1676	0.4051	0.3223
18	-0.1018	-0.1470	-0.1916	-0.0274	-0.0945	0.0579	-0.1256	0.7257	-0.1424
19	-0.0140	0.0420	0.1397	-0.0408	-0.0921	0.2663	-0.3973	0.0852	-0.1170
20	-0.1839	0.2521	-0.0160	-0.1774	-0.1181	0.0151	-0.0942	0.7665	-0.2019
21	0.3648	0.1001	0.2739	0.5235	0.0979	-0.2300	0.3332	-0.3525	-0.2532
22	0.1624	-0.1052	-0.1657	0.3190	-0.1711	-0.1133	-0.0945	-0.1851	0.0278
23	-0.0656	-0.1082	0.7080	-0.1324	-0.1121	-0.1420	-0.1589	-0.1006	-0.1884
24	0.8528	-0.5311	-0.1232	-0.0815	0.0052	-0.2867	-0.3318	-0.3068	-0.2821
25	0.2023	-0.0053	0.0662	-0.0259	-0.0215	0.0027	-0.2886	-0.1083	0.3002
26	0.0894	-0.2574	0.3061	-0.3000	-0.0283	-0.4282	0.1587	-0.1985	-0.3796
27	0.1808	-0.0832	-0.1532	0.0156	-0.0088	-0.0956	0.0360	-0.0867	-0.0227
28	0.1670	-0.2793	0.2327	-0.2981	0.0384	-0.4589	0.1710	-0.2247	-0.3804
29	0.8357	-0.4304	-0.3991	0.2999	0.0008	-0.1948	-0.3742	-0.1167	-0.1654
30	-0.0507	-0.2336	0.6081	-0.1825	-0.0974	-0.0769	-0.2260	-0.1541	-0.1999
31	0.1504	-0.2063	-0.0596	-0.0637	0.0385	-0.2985	0.0307	-0.0276	-0.2486
32	0.8716	-0.4537	-0.2951	0.2106	-0.1416	-0.1780	-0.4369	-0.1716	-0.1618
33	-0.0229	-0.2275	0.2825	-0.0880	-0.0316	-0.1038	-0.0994	-0.0664	-0.4226
34	0.1145	-0.0907	-0.0095	-0.2801	0.0306	-0.1883	0.2036	-0.1453	-0.1003
35	0.7742	-0.4895	-0.2953	-0.2245	0.5023	-0.2172	-0.3902	-0.2037	-0.1832
36	0.9215	-0.4640	-0.2820	-0.0573	-0.1147	-0.2231	-0.3671	-0.2206	-0.1968
37	0.1858	-0.0662	-0.1255	0.0678	-0.1819	-0.0915	0.0638	-0.0765	-0.0153
38	-0.0537	-0.1408	-0.2489	-0.0401	-0.1183	-0.1522	-0.0203	0.4803	-0.0562
39	-0.1131	0.0163	-0.0705	-0.0900	-0.0600	-0.0222	-0.1821	0.0446	0.8241

3.2 アラーム項目に対する因子分析

Table 2.5 の模擬事故データ (39行×36列) に対し、アラーム39項目の因子分析を行った。固有値1.0以上の因子が12個抽出された。この累積寄与率は、82.3%である。この因子負荷行列(第9因子まで)をTable 3.5に示す。さらに、この主要12因子の特徴づけを容易にするため、因子軸の回転(バリマックス回転)を行い、Table 3.6の因子負荷行列(第9因子まで示す)を得た。以後の分析には、Table 3.5の回転後の因子負荷行列を用いる。Table 3.5, Table 3.6のA(1)~A(9)は、Table 2.5の行番号(アラーム項目)に対応している。

これらの主要アラーム因子9個それぞれについて、因子負荷量(相関)の高いアラーム項目から順に並べて図示したものがFig. 3.4の左半分の図である。また、主要アラーム因子9個(因子負荷量)と、模擬事故項目36個(0, 1データ)の間の相関をとり、各主要アラーム因子毎に、相関の高い模擬事故項目から順に並べて図示したものがFig. 3.4の右半分の図である。Fig. 3.4は、左半分が主要アラーム因子とアラーム項目の関係、右半分が主要アラーム因子と模擬事故項目の関係を示している。

Fig. 3.4-(1)から(9)に示した主要アラーム因子9個の解釈を以下に行う。第1アラーム因子は、原子炉スクラム時に発生するアラームで第1事故因子と対応している。第2アラーム因子は主蒸気管破断時に発生するアラーム、第3アラーム因子は、加圧器逃し弁開により発生するアラームに関するものと解釈される。第4アラーム因子は、出力が低下傾向にあるとき発生するアラームで第3事故因子に対応している。第5アラーム因子は復水器の異常、第6アラーム因子は充填流量減少、第7アラーム因子は主冷却水漏洩、第8アラーム因子はSG給水制御系の異常、第9アラーム因子は出力上昇に関するアラームと解釈される。

Table 3.7, Table 3.8は、それぞれ主要アラーム因子とアラーム項目の相関係数、主要アラーム因子と模擬事故項目の相関係数を一覧表の形で示したものである。

次にアラーム因子の因子パターンを2次元表示する。Fig. 3.5に第1因子軸と第2因子軸を座標とした因子軸回転前の因子パターンを図示する。Fig. 3.6は、因子軸回転後の因子パターンである。

Table 3.5 Unrotated factor pattern (loading matrix) for alarms.

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6	因子7	因子8	因子9
A(1)	0.917694	-0.112635	0.064305	0.144957	0.042903	-0.143736	0.141010	-0.080487	0.056316
A(2)	0.927338	-0.215491	0.104754	0.032858	0.051607	-0.043667	0.182811	-0.043813	0.023606
A(3)	0.907459	-0.223939	-0.000068	-0.062513	-0.045807	-0.109988	-0.104806	-0.061018	0.089426
A(4)	0.427324	0.680501	0.313127	-0.108189	-0.264276	0.165394	-0.120998	0.207346	0.012388
A(5)	0.381538	0.747746	-0.188409	-0.100246	0.184180	0.309373	-0.070110	0.140665	0.003391
A(6)	0.164500	0.392556	-0.304132	-0.173110	0.008588	0.174144	-0.069666	0.199343	-0.504688
A(7)	0.862488	-0.223268	0.055427	-0.026755	0.017856	-0.023933	0.154896	-0.018052	-0.174158
A(8)	-0.428750	0.025213	0.118634	0.229009	-0.051183	0.340390	0.397228	0.235556	0.354459
A(9)	0.578373	-0.162353	-0.465111	0.178100	-0.107073	0.044522	0.145814	-0.017833	0.165048
A(10)	-0.095783	0.131682	0.601296	0.482472	0.089069	-0.176861	0.011136	-0.319308	-0.017368
A(11)	0.400010	0.494231	-0.133577	-0.190379	0.051243	0.260841	-0.057081	0.134825	-0.022221
A(12)	0.215043	0.397632	0.593511	-0.228284	0.256478	0.051228	0.327932	0.152735	0.134368
A(13)	0.172246	0.081753	0.539733	-0.315351	-0.263960	-0.182500	-0.054890	0.018596	-0.019576
A(14)	0.214093	0.200781	0.624866	-0.050555	-0.552546	-0.078836	-0.098544	0.148348	0.013876
A(15)	0.308201	-0.364781	0.035361	0.335110	0.383943	-0.029009	-0.450119	0.149393	0.054480
A(16)	-0.228296	0.007878	-0.088102	0.003867	-0.154996	0.178183	0.039598	0.257399	0.448304
A(17)	-0.282234	0.128477	0.324525	0.393990	0.285217	0.182853	0.383664	-0.139988	0.016586
A(18)	-0.042639	0.062521	0.319928	-0.550229	0.509385	-0.347397	0.043405	-0.036574	0.219803
A(19)	0.073372	0.172546	-0.620775	0.175957	-0.359088	-0.050682	0.019464	-0.130540	-0.018624
A(20)	0.057472	0.483163	0.177996	-0.472999	0.559155	-0.104902	0.022599	-0.033449	0.112432
A(21)	0.355093	-0.034623	-0.142772	0.319313	-0.179765	0.117310	-0.051504	0.100780	0.476445
A(22)	0.119859	-0.293109	-0.050754	0.083798	0.093464	0.170496	-0.400566	0.407116	0.118005
A(23)	0.172577	0.466417	-0.051212	0.611223	0.258766	-0.092763	-0.171709	-0.206040	0.136204
A(24)	0.890746	-0.148732	0.009933	0.120239	0.007998	-0.100117	0.017258	0.017120	0.001083
A(25)	0.212644	-0.281387	0.190963	0.482339	0.425883	0.239393	0.047880	0.345359	-0.057006
A(26)	0.345316	0.571586	-0.442183	0.223754	-0.008510	-0.377886	0.182540	0.077277	0.116928
A(27)	0.187693	-0.093835	-0.158034	-0.165300	-0.074858	0.414933	0.135665	-0.618248	0.106626
A(28)	0.391835	0.496156	-0.484643	0.177037	-0.042697	-0.359921	0.198131	0.108811	0.007029
A(29)	0.771679	-0.261009	0.143137	-0.170499	-0.054822	0.211427	-0.032950	-0.005073	0.032705
A(30)	0.191913	0.499349	-0.012435	0.493163	0.236759	-0.059647	0.274597	-0.246773	-0.086970
A(31)	0.408383	0.469135	-0.248548	-0.190311	0.078431	0.519638	0.047031	-0.342632	0.078930
A(32)	0.843933	-0.276209	0.184481	-0.017496	0.061747	0.187228	-0.096775	-0.023402	0.054698
A(33)	0.334144	0.750371	0.186158	0.112724	-0.234892	-0.043557	-0.176296	0.105721	0.069285
A(34)	0.129554	0.015816	-0.330912	0.071478	-0.145343	0.523903	0.442595	0.139559	0.065752
A(35)	0.788262	-0.155679	0.043921	-0.018291	0.040947	-0.019340	0.119126	0.054142	-0.367090
A(36)	0.925954	-0.259009	0.090058	0.024849	0.037789	-0.010267	0.087264	0.021472	0.063267
A(37)	0.117416	-0.177211	-0.085624	-0.080748	-0.133938	0.020742	0.022685	-0.120957	0.295165
A(38)	-0.027285	-0.075354	0.068516	-0.398640	0.455066	-0.251825	-0.152479	0.057777	0.205908
A(39)	-0.109213	-0.080232	0.182262	0.163795	0.208050	0.281268	0.527531	0.258598	-0.257883
因子寄与	9.132206	4.545538	3.355199	2.764848	2.243971	1.984648	1.694425	1.499966	1.381960

Table 3.6 Rotated factor pattern (loading matrix) for alarms.

	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6	因子7	因子8	因子9
A (1)	0.921817	-0.001610	0.084129	0.180100	0.208345	0.026130	0.003873	0.032069	-0.040582
A (2)	0.974370	0.013887	0.054989	0.038414	0.091526	0.045318	0.047206	0.040815	-0.066413
A (3)	0.899720	0.015376	0.064061	0.013576	0.092253	0.026853	-0.247472	0.067915	0.128736
A (4)	0.163567	0.574126	0.735978	0.095733	0.087093	0.104721	-0.030382	0.072097	0.065067
A (5)	0.098605	0.859641	0.107376	0.250598	0.160172	0.171883	0.034635	0.155340	0.055298
A (6)	0.016827	0.716954	-0.038753	-0.082485	0.042184	-0.151041	-0.051160	-0.097787	-0.210134
A (7)	0.915113	0.090938	-0.028592	-0.050198	0.036670	-0.037221	0.020244	-0.007129	-0.155099
A (8)	-0.337924	-0.077733	0.043955	-0.054010	-0.067707	-0.076056	0.439906	0.002693	-0.102256
A (9)	0.552107	0.170454	-0.229943	-0.224452	0.283439	-0.109222	-0.176313	0.195726	0.000870
A (10)	-0.045368	-0.356723	0.259893	0.607872	-0.163194	0.085641	0.219027	-0.097273	-0.137120
A (11)	0.218632	0.734110	-0.044095	0.099574	0.035972	0.125499	-0.073301	0.028051	0.006318
A (12)	0.135852	0.195439	0.462030	0.013969	-0.014340	0.610348	0.419814	0.005135	-0.094924
A (13)	0.170831	-0.026011	0.341835	-0.137963	-0.144240	0.288966	-0.189833	-0.150976	-0.042460
A (14)	0.129386	-0.059388	0.918477	-0.117160	-0.038776	-0.025916	-0.076984	-0.055047	0.035397
A (15)	0.396290	-0.177714	-0.134974	0.314857	-0.225458	-0.018919	0.130375	0.170635	0.361718
A (16)	-0.182476	0.035457	-0.022194	-0.104245	-0.048600	-0.034700	-0.118349	-0.044812	-0.070921
A (17)	-0.220917	-0.149543	0.010294	0.346064	-0.092235	0.070481	0.659569	0.050072	-0.104137
A (18)	-0.011321	-0.117827	-0.056118	-0.090586	-0.037368	0.902856	-0.074614	-0.052841	-0.041396
A (19)	0.058516	-0.186612	0.739234	0.159325	-0.137266	-0.067331	0.094894	-0.014304	-0.210354
A (20)	-0.089144	0.345170	-0.025449	0.109594	0.030681	0.828482	0.034655	0.064613	-0.019970
A (21)	0.321626	-0.007232	0.004673	0.200933	0.168429	-0.198200	-0.117060	0.091477	0.264396
A (22)	0.091034	-0.038046	-0.047917	-0.119349	-0.059943	-0.073802	-0.008616	-0.027752	0.893556
A (23)	0.035121	0.142257	0.020412	0.859980	0.181545	-0.032855	0.009313	0.000623	-0.011449
A (24)	0.873136	0.045335	0.071805	0.106275	0.187150	-0.040051	-0.041680	0.011120	0.135682
A (25)	0.316677	-0.094839	-0.120718	0.207824	-0.134177	-0.064815	-0.526010	-0.142035	0.443023
A (26)	0.096910	0.297851	0.031018	0.310490	0.842540	0.019101	-0.077126	0.032399	0.012402
A (27)	0.153244	-0.101943	-0.049107	-0.084467	-0.062305	-0.064590	-0.051343	0.939136	-0.053077
A (28)	0.171181	0.341857	-0.014646	0.219572	0.799836	0.008129	-0.080875	-0.027698	-0.064479
A (29)	0.802094	0.125581	0.088235	-0.143780	-0.182984	0.008129	0.022136	0.097853	0.138453
A (30)	0.027927	0.246849	0.071758	0.798437	0.079543	-0.049724	-0.035903	0.010801	-0.024395
A (31)	0.180684	0.543595	0.041804	0.119188	0.070213	0.076975	-0.011987	0.785353	0.001593
A (32)	0.884897	0.080994	0.064115	0.035622	-0.206833	0.018478	-0.003340	0.065689	0.185103
A (33)	0.037911	0.447791	0.662443	0.333157	0.282933	0.052007	-0.103584	0.043841	0.100768
A (34)	0.089448	-0.211494	-0.045879	-0.173814	0.797795	-0.020986	0.011667	-0.027422	-0.057372
A (35)	0.819745	0.161325	0.029225	-0.068579	0.044331	-0.068186	0.009392	-0.006786	-0.163603
A (36)	0.955860	0.006825	0.056950	0.000411	0.084525	0.031310	0.024473	0.051581	0.134130
A (37)	0.168238	-0.050416	-0.047770	-0.057086	-0.072944	-0.063136	-0.034708	-0.097612	-0.053489
A (38)	0.007831	-0.109953	-0.002727	-0.106817	-0.066776	0.591456	-0.182490	-0.051354	-0.016731
A (39)	-0.025167	0.020253	-0.024704	-0.166143	-0.008706	-0.049676	0.792033	-0.053549	0.032934
因子寄与	8.389842	3.471930	2.929793	2.720007	2.609451	2.511030	2.030666	1.725955	1.539319

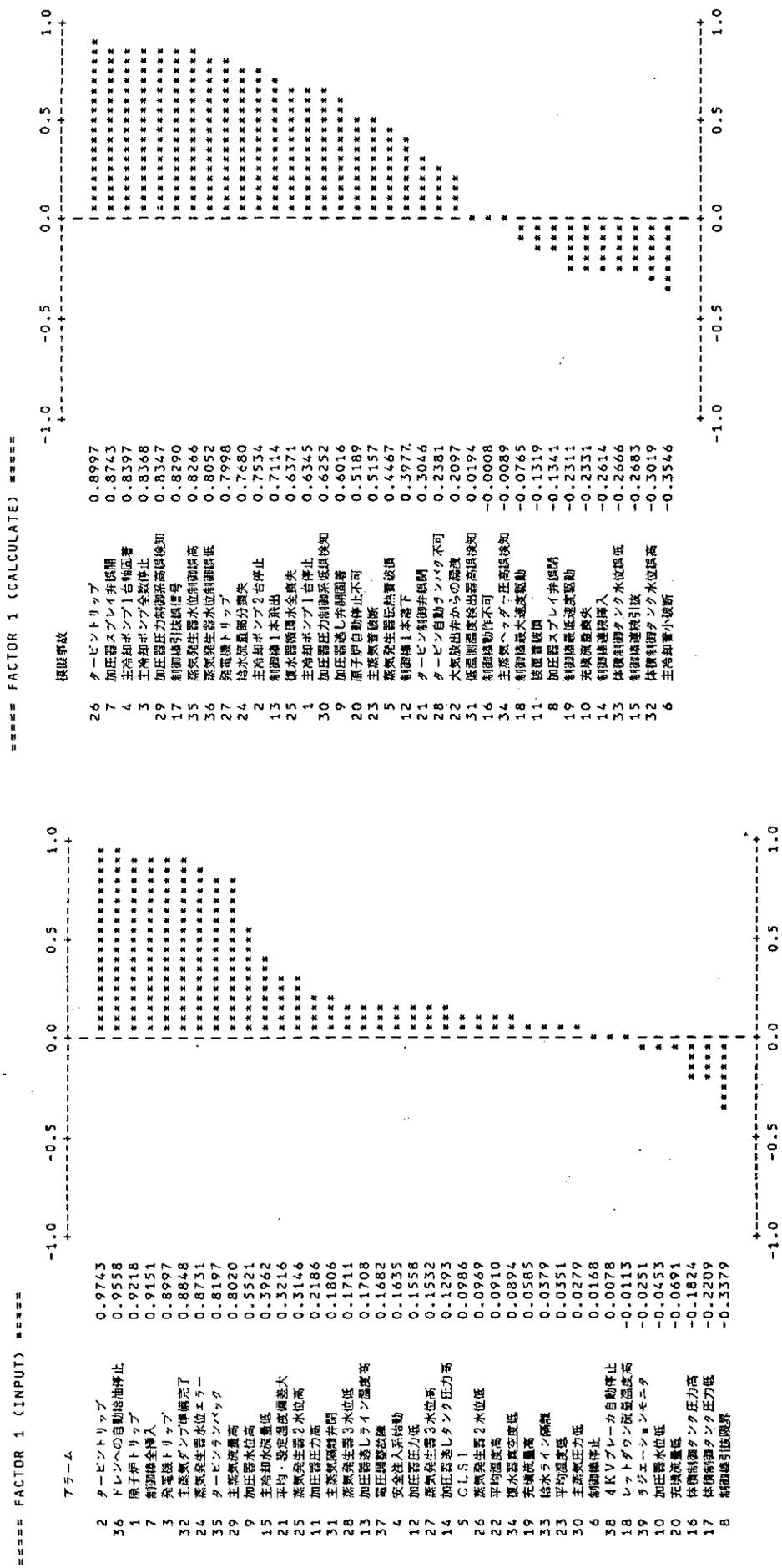


Fig.3.4-(1) Sorted correlation data between 1st alarm factor and alarms (left figure), and between 1st alarm factor and simulated accidents (right figure).

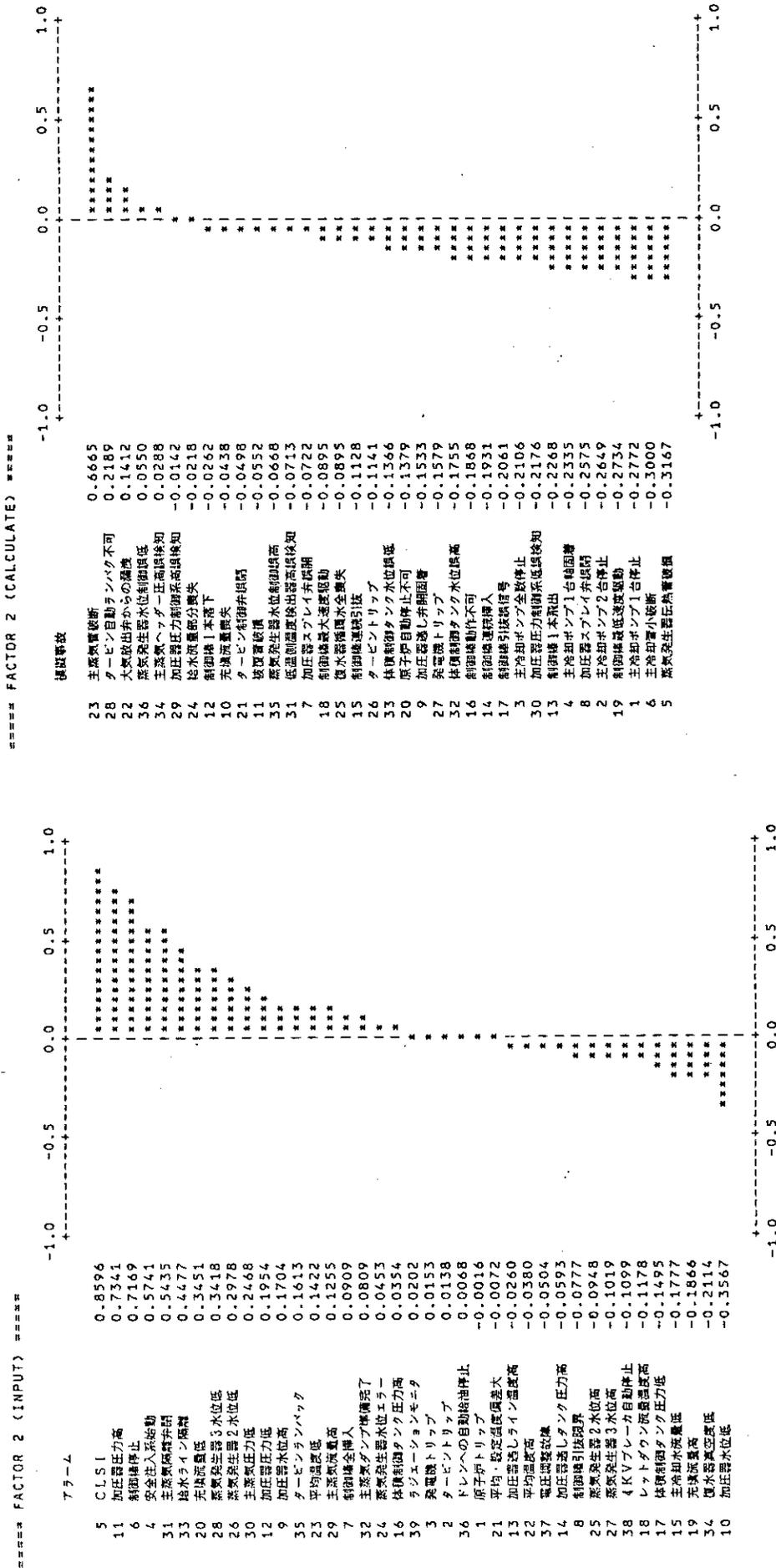


Fig.3.4-(2) Sorted correlation data between 2nd alarm factor and alarms (left figure), and between 2nd alarm factor and simulated accidents (right figure).

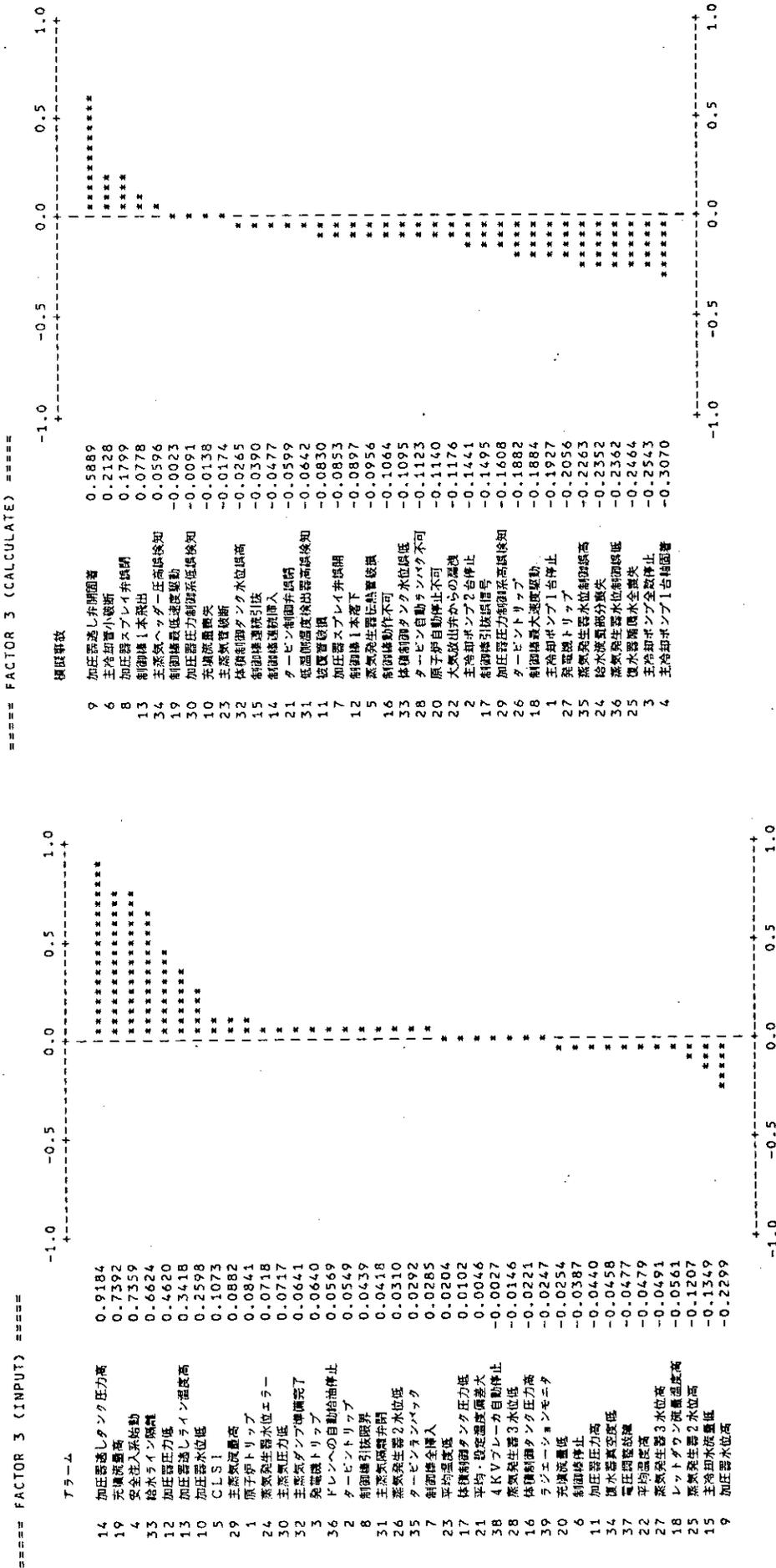


Fig.3.4-(3) Sorted correlation data between 3rd alarm factor and alarms (left figure), and between 3rd alarm factor and simulated accidents (right figure).

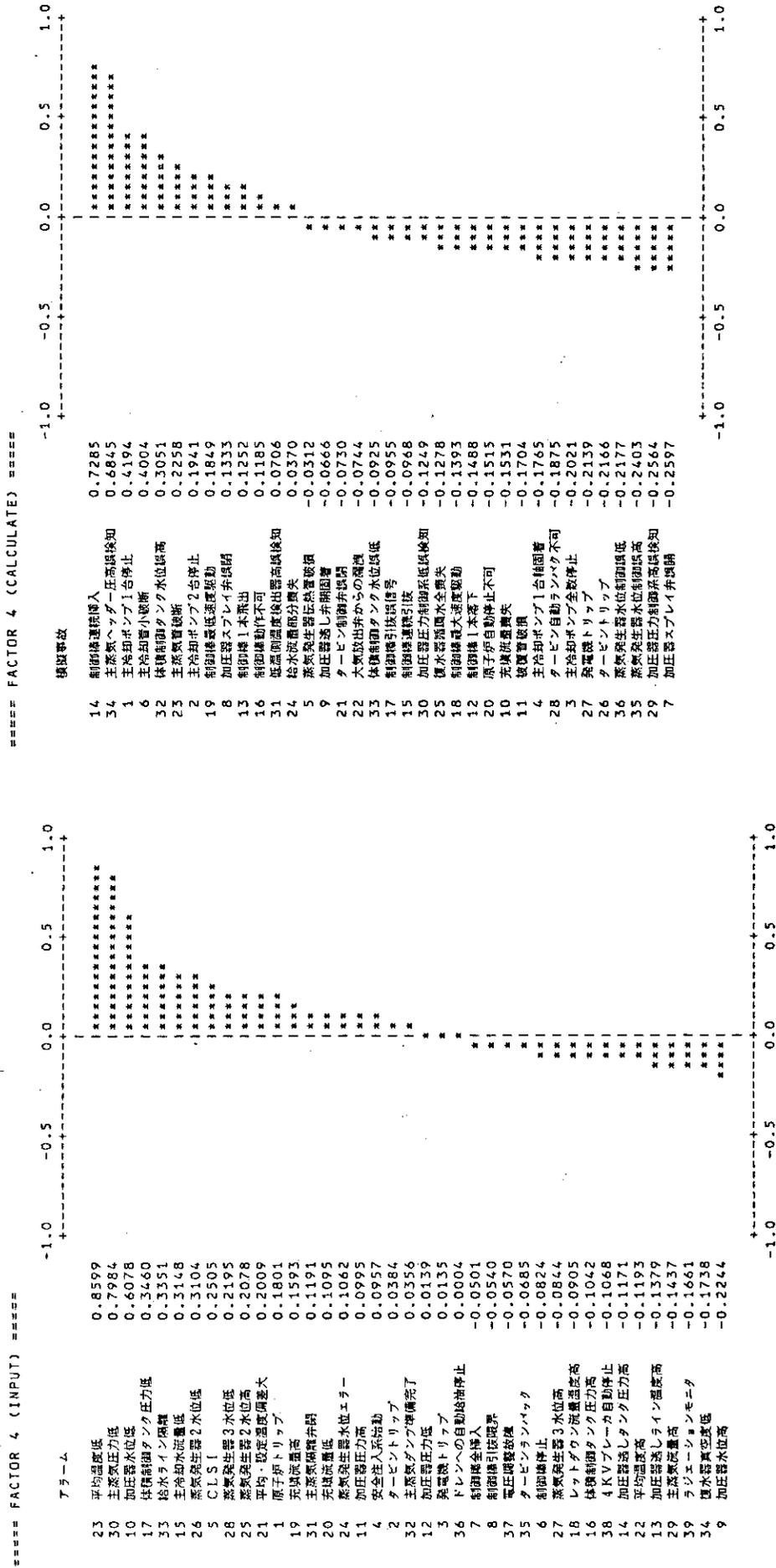


Fig.3.4-(4) Sorted correlation data between 4th alarm factor and alarms (left figure), and between 4th alarm factor and simulated accidents (right figure).

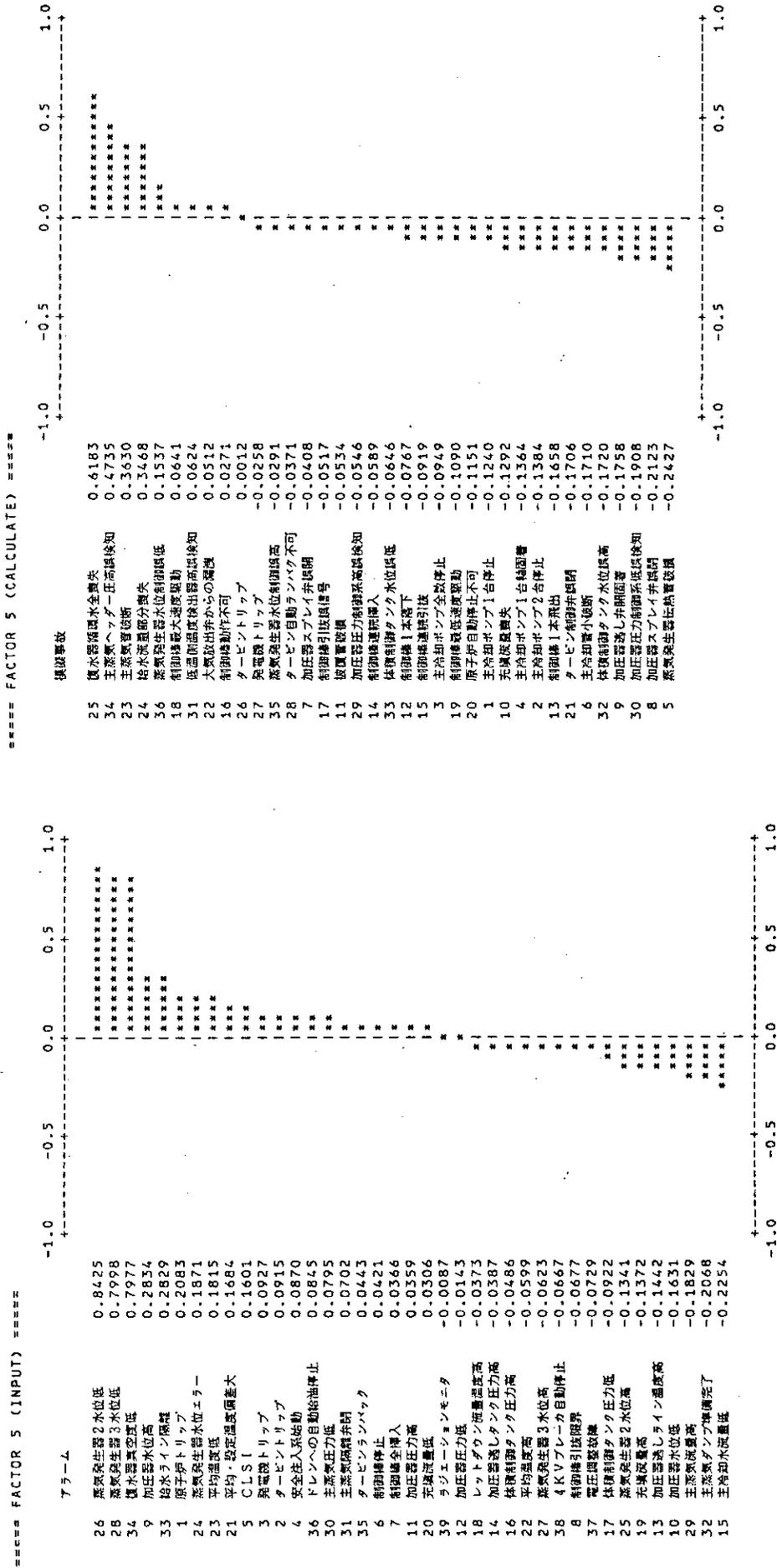


Fig.3.4-(5) Sorted correlation data between 5th alarm factor and alarms (left figure), and between 5th alarm factor and simulated accidents (right figure).

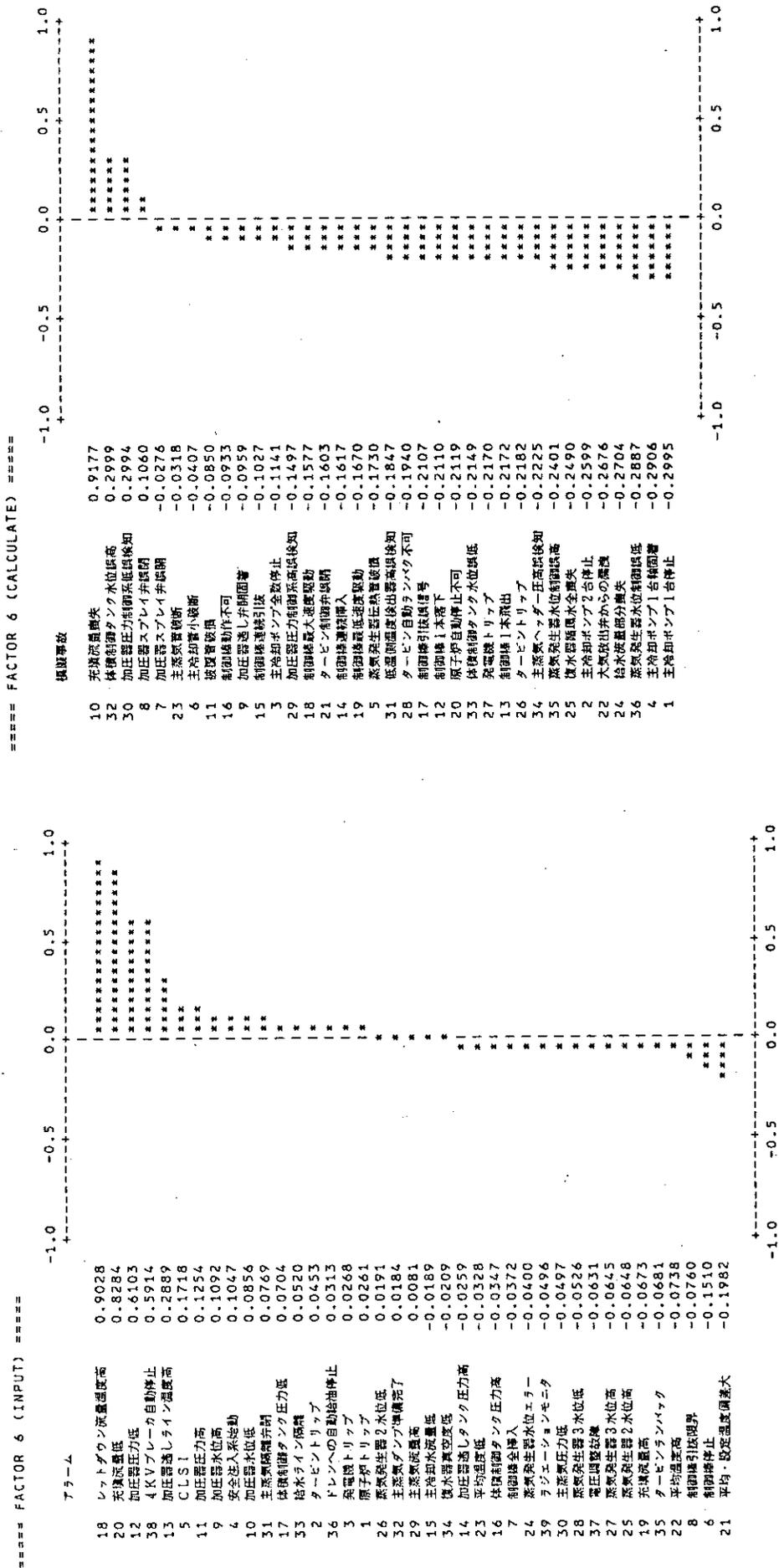


Fig.3.4-(6) Sorted correlation data between 6th alarm factor and alarms (left figure), and between 6th alarm factor and simulated accidents (right figure).

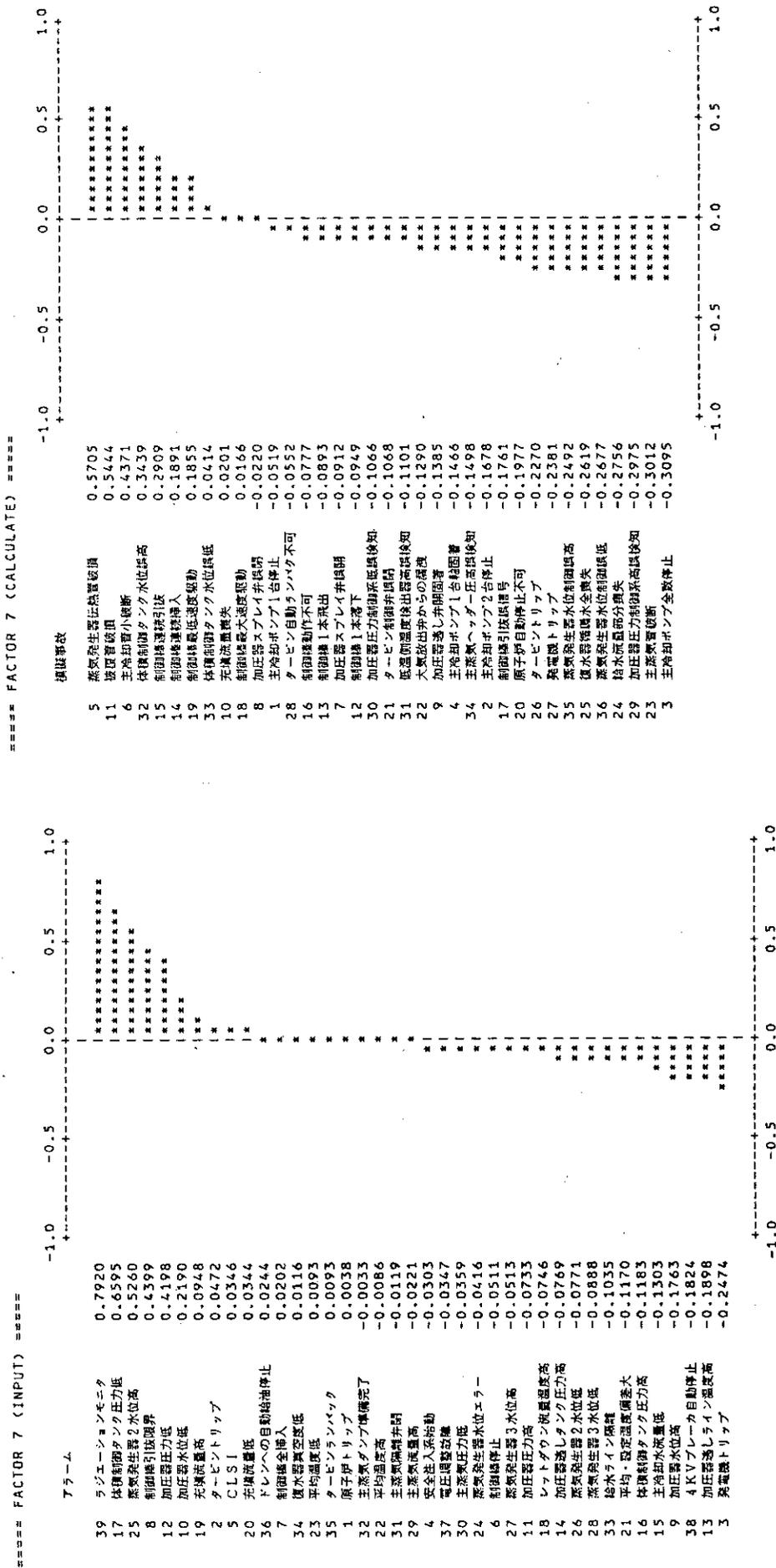


Fig.3.4-(7) Sorted correlation data between 7th alarm factor and alarms (left figure), and between 7th alarm factor and simulated accidents (right figure).

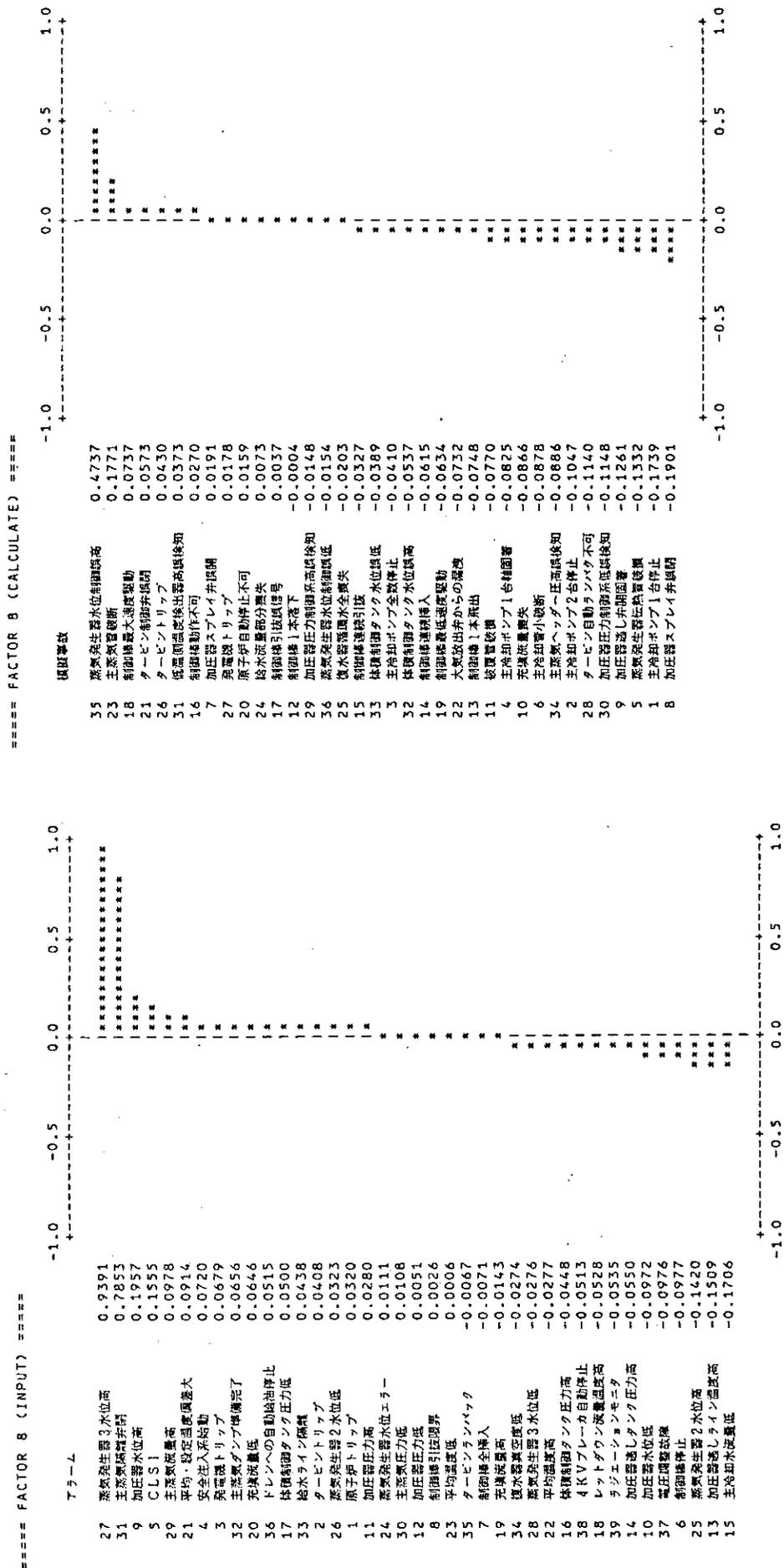


Fig.3.4-(B) Sorted correlation data between 8th alarm factor and alarms (left figure), and between 8th alarm factor and simulated accidents (right figure).

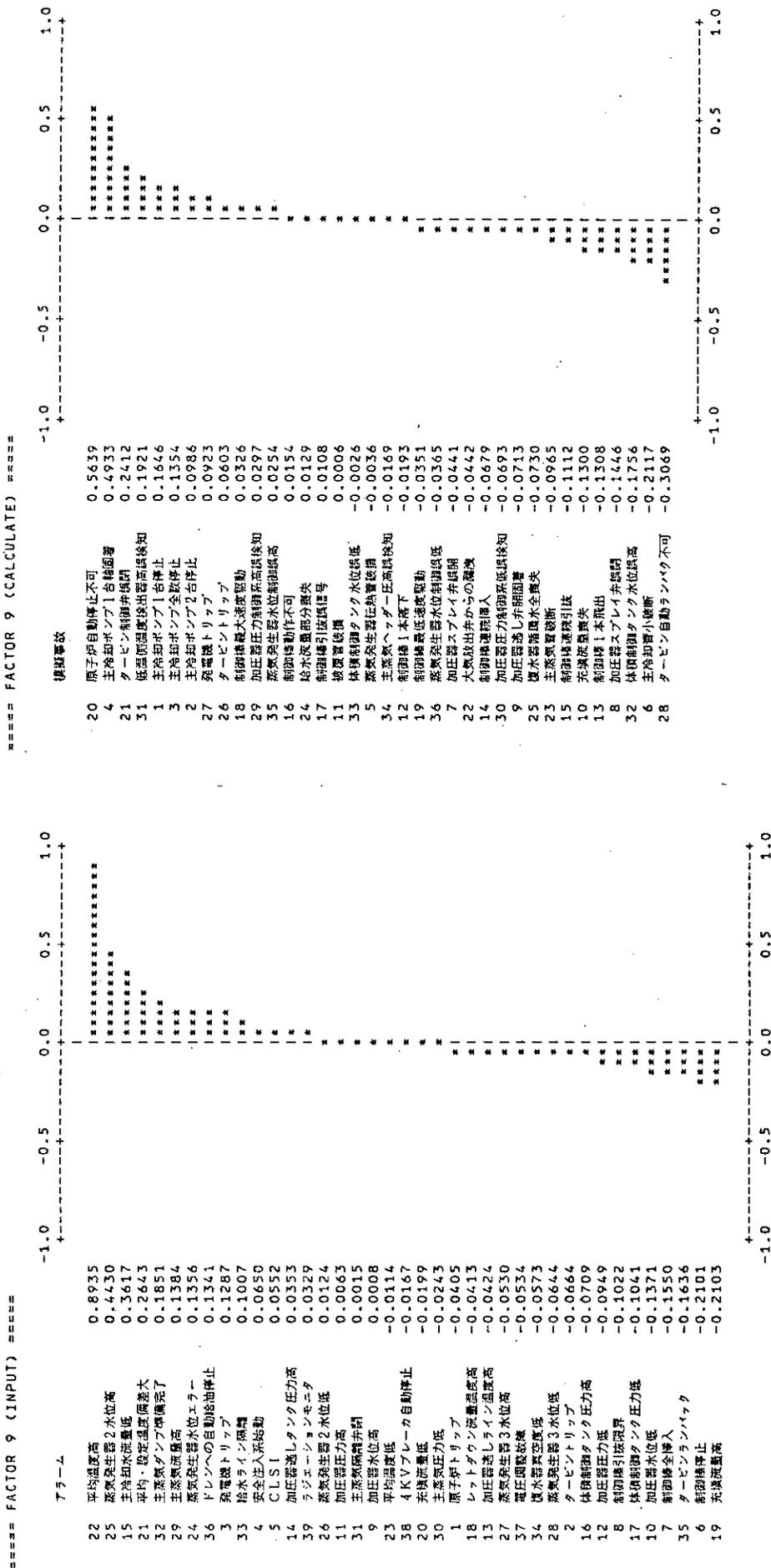


Fig.3.4-(9) Sorted correlation data between 9th alarm factor and alarms (left figure), and between 9th alarm factor and simulated accidents (right figure).

Table 3.7 Correlation data between main alarm factor and alarms.

===== FACTOR (INPUT) =====

アラーム	FACT-1	FACT-2	FACT-3	FACT-4	FACT-5	FACT-6	FACT-7	FACT-8	FACT-9
1 原子炉トリップ	0.9218	-0.0016	0.0841	0.1801	0.2083	0.0261	0.0038	0.0320	-0.0405
2 ターボトリップ	0.9743	0.0138	0.0549	0.0384	0.0915	0.0453	0.0472	0.0408	-0.0664
3 発電機トリップ	0.8997	0.0153	0.0640	0.0135	0.0927	0.0268	-0.2474	0.0679	0.1287
4 安全注入系始動	0.1635	0.5741	0.7359	0.0957	0.0870	0.1047	-0.0303	0.0720	0.0650
5 C L S I	0.0986	0.8596	0.1073	0.2505	0.1601	0.1718	0.0346	0.1555	0.0552
6 制御棒停止	0.0168	0.7169	-0.0387	-0.0824	0.0421	-0.1510	-0.0511	-0.0977	-0.2101
7 制御棒全挿入	0.9151	0.0909	0.0285	-0.0501	0.0366	-0.0372	0.0202	-0.0071	-0.1550
8 制御棒引抜限界	-0.3379	-0.0777	0.0439	-0.0540	-0.0677	-0.0760	0.4399	0.0026	-0.1022
9 加圧器水位高	0.5521	0.1704	-0.2299	-0.2244	0.2834	0.1092	-0.1763	0.1957	0.0008
10 加圧器水位低	-0.0453	-0.3567	0.2598	0.6078	-0.1631	0.0856	0.2190	-0.0972	-0.1371
11 加圧器圧力高	0.2186	0.7341	-0.0440	0.0995	0.0359	0.1254	-0.0733	0.0280	0.0063
12 加圧器圧力低	0.1558	0.1954	0.4620	0.0139	-0.0143	0.6103	0.4198	0.0051	-0.0949
13 加圧器逃しライン温度高	0.1708	-0.0260	0.3418	-0.1379	-0.1442	0.2889	-0.1898	-0.1509	-0.0424
14 加圧器逃しタンク圧力高	0.1293	-0.0593	0.9184	-0.1171	-0.0387	-0.0259	-0.0769	-0.0550	0.0353
15 主冷却水流速低	0.3962	-0.1777	-0.1349	0.3148	-0.2254	-0.0189	-0.1303	-0.1706	0.3617
16 体積制御タンク圧力高	-0.1824	0.0354	-0.0221	-0.1042	-0.0486	-0.0347	-0.1183	-0.0448	-0.0709
17 体積制御タンク圧力低	-0.2209	-0.1495	0.0102	0.3460	-0.0922	0.0704	0.6595	0.0500	-0.1041
18 レットダウン流量温度高	-0.0113	-0.1178	-0.0561	-0.0905	-0.0373	0.9028	-0.0746	-0.0528	-0.0413
19 充填流量高	0.0585	-0.1866	0.7392	0.1593	-0.1372	-0.0673	0.0948	-0.0143	-0.2103
20 充填流量低	-0.0691	0.3451	-0.0254	0.1095	0.0306	0.8284	0.0344	0.0646	-0.0199
21 平均・設定温度偏差大	0.3216	-0.0072	0.0046	0.2009	0.1684	-0.1982	-0.1170	0.0914	0.2643
22 平均温度高	0.0910	-0.0380	-0.0479	-0.1193	-0.0599	-0.0738	-0.0086	-0.0277	0.8935
23 平均温度低	0.0351	0.1422	0.0204	0.8599	0.1815	-0.0328	0.0093	0.0006	-0.0114
24 蒸気発生器水位エラー	0.8731	0.0453	0.0718	0.1062	0.1871	-0.0400	-0.0416	0.0111	0.1356
25 蒸気発生器2水位高	0.3146	-0.0948	-0.1207	0.2078	-0.1341	-0.0648	0.5260	-0.1420	0.4430
26 蒸気発生器2水位低	0.0969	0.2978	0.0310	0.3104	0.8425	0.0191	-0.0771	0.0323	0.0124
27 蒸気発生器3水位高	0.1532	-0.1019	-0.0491	-0.0844	-0.0623	-0.0645	-0.0513	0.9391	-0.0530
28 蒸気発生器3水位低	0.1711	0.3418	-0.0146	0.2195	0.7998	-0.0526	-0.0888	-0.0276	-0.0644
29 主蒸気流量高	0.8020	0.1255	0.0882	-0.1437	-0.1829	0.0081	-0.0221	0.0978	0.1384
30 主蒸気圧力低	0.0279	0.2468	0.0717	0.7984	0.0795	-0.0497	-0.0359	0.1018	-0.0243
31 主蒸気隔離弁閉	0.1806	0.5435	0.0418	0.1191	0.0702	0.0769	-0.0119	0.7853	0.0015
32 主蒸気ダンパ準備完了	0.8848	0.0809	0.0641	0.0356	-0.2068	0.0184	-0.0033	0.0656	0.1851
33 給水ライン隔離	0.0379	0.4477	0.6624	0.3351	0.2829	0.0520	-0.1035	0.0438	0.1007
34 復水器真空度低	0.0894	-0.2114	-0.0458	-0.1738	0.7977	-0.0209	0.0116	-0.0274	-0.0573
35 タービンランバック	0.8197	0.1613	0.0292	-0.0685	0.0443	-0.0681	0.0093	-0.0067	-0.1636
36 ドレンへの自動給油停止	0.9558	0.0068	0.0569	0.0004	0.0845	0.0313	0.0244	0.0515	0.1341
37 電圧調整故障	0.1682	-0.0504	-0.0477	-0.0570	-0.0729	-0.0631	-0.0347	-0.0976	-0.0534
38 4KVブレーカ自動停止	0.0078	-0.1099	-0.0027	-0.1068	-0.0667	0.5914	-0.1824	-0.0513	-0.0167
39 ラジエーションモニタ	-0.0251	0.0202	-0.0247	-0.1661	-0.0087	-0.0496	0.7920	-0.0535	0.0329

Table 3.8 Correlation data between main alarm factor and simulated accidents.

模擬事故	FACT- 1	FACT- 2	FACT- 3	FACT- 4	FACT- 5	FACT- 6	FACT- 7	FACT- 8	FACT- 9
1 主冷却ポンプ1台停止	0.6345	-0.2772	-0.1927	0.4194	-0.1240	-0.2995	-0.0519	-0.1739	0.1646
2 主冷却ポンプ2台停止	0.7534	-0.2649	-0.1441	0.1941	-0.1384	-0.2599	-0.1678	-0.1047	0.0986
3 主冷却ポンプ全数停止	0.8368	-0.2106	-0.2543	-0.2021	-0.0949	-0.1141	-0.3095	-0.0410	0.1354
4 主冷却ポンプ1台軸固着	0.8397	-0.2335	-0.3070	-0.1765	-0.1364	-0.2906	-0.1466	-0.0825	0.4933
5 蒸気発生器伝熱管破損	0.4467	-0.3167	-0.0956	-0.0312	-0.2427	-0.1730	0.5705	-0.1332	-0.0036
6 主冷却管小破断	-0.3546	-0.3000	0.2128	0.4004	-0.1710	-0.0407	0.4371	-0.0878	-0.2117
7 加圧器スプレイ弁誤閉	0.8743	-0.0722	-0.0853	-0.2597	-0.0408	-0.0276	-0.0912	0.0191	-0.0441
8 加圧器スプレイ弁誤開	-0.1341	-0.2575	0.1799	0.1333	-0.2123	0.1060	-0.0220	-0.1901	-0.1446
9 加圧器逃し弁開閉	0.6016	-0.1533	0.5889	-0.0666	-0.1758	-0.0959	-0.1385	-0.1261	-0.0713
10 充填流量喪失	-0.2331	-0.0438	-0.0138	-0.1531	-0.1292	0.9177	0.0201	-0.0866	-0.1300
11 被覆管破損	-0.1319	-0.0552	-0.0830	-0.1704	-0.0534	-0.0850	0.5444	-0.0770	0.0006
12 制御棒1本落下	0.3977	-0.0262	-0.0897	-0.1488	-0.0767	-0.2110	-0.0949	-0.0004	-0.0193
13 制御棒1本飛出	0.7114	-0.2268	0.0778	0.1252	-0.1658	-0.2172	-0.0893	-0.0748	-0.1308
14 制御棒連続挿入	-0.2614	-0.1931	-0.0477	0.7285	-0.0589	-0.1617	0.1891	-0.0615	-0.0679
15 制御棒連続引抜	-0.2683	-0.1128	-0.0390	-0.0968	-0.0919	-0.1027	-0.2909	-0.0327	-0.1112
16 制御棒動作不可	-0.0008	-0.1868	-0.1064	0.1185	0.0271	-0.0933	-0.0777	0.0270	0.0154
17 制御棒引抜誤信号	0.8290	-0.2061	-0.1495	-0.0955	-0.0517	-0.2107	-0.1761	0.0037	0.0108
18 制御棒最大速度駆動	-0.0765	-0.0895	-0.1884	-0.1393	0.0641	-0.1577	0.0166	0.0737	0.0326
19 制御棒最低速度駆動	-0.2311	-0.2734	-0.0023	0.1849	-0.1090	-0.1670	0.1855	-0.0634	-0.0351
20 原子炉自動停止不可	0.5189	-0.1379	-0.1140	-0.1515	-0.1151	-0.2119	-0.1977	0.0159	0.5639
21 タービン制御弁誤閉	0.3046	-0.0498	-0.0599	-0.0730	-0.1706	-0.1603	-0.1068	0.0573	0.2412
22 大気放出弁からの漏洩	0.2097	0.1412	-0.1176	-0.0744	0.0512	-0.2676	-0.1290	-0.0732	-0.0442
23 主蒸気管破断	0.5157	0.6665	-0.0174	0.2258	0.3630	-0.0318	-0.3012	0.1771	-0.0965
24 給水流量部分喪失	0.7680	-0.0218	-0.2352	0.0370	0.3468	-0.2704	-0.2756	0.0073	0.0129
25 復水器循環水全喪失	0.6371	-0.0895	-0.2464	-0.1278	0.6183	-0.2490	-0.2619	-0.0203	-0.0730
26 タービントリップ	0.8997	-0.1141	-0.1882	-0.2166	0.0012	-0.2182	-0.2270	0.0430	0.0603
27 発電機トリップ	0.7998	-0.1579	-0.2056	-0.2139	-0.0258	-0.2170	-0.2381	0.0178	0.0923
28 タービン自動ランバク不可	0.2381	0.2189	-0.1123	-0.1875	-0.0371	-0.1940	-0.0552	-0.1140	-0.3069
29 加圧器圧力制御系高誤検知	0.8347	-0.0142	-0.1608	-0.2564	-0.0546	-0.1497	-0.2975	-0.0148	0.0297
30 加圧器圧力制御系低誤検知	0.6252	-0.2176	-0.0091	-0.1249	0.1908	0.2994	-0.1066	-0.1148	-0.0693
31 低温度検出器高誤検知	0.0194	-0.0713	-0.0642	0.0706	0.0624	-0.1847	-0.1101	0.0373	0.1921
32 体積制御タンク水位誤高	-0.3019	-0.1755	-0.0265	0.3051	-0.1720	0.2999	0.3439	-0.0537	-0.1756
33 体積制御タンク水位誤低	-0.2666	-0.1366	-0.1095	-0.0925	-0.0646	-0.2149	0.0414	-0.0389	-0.0026
34 主蒸気ヘッダー圧高誤検知	-0.0089	0.0288	0.0596	0.6845	0.4735	-0.2225	-0.1498	-0.0886	-0.0169
35 蒸気発生器水位制御誤高	0.8266	-0.0668	-0.2263	-0.2403	-0.0291	-0.2401	-0.2492	0.4737	0.0254
36 蒸気発生器水位制御誤低	0.8052	0.0550	-0.2362	-0.2177	0.1537	-0.2887	-0.2677	-0.0154	-0.0365

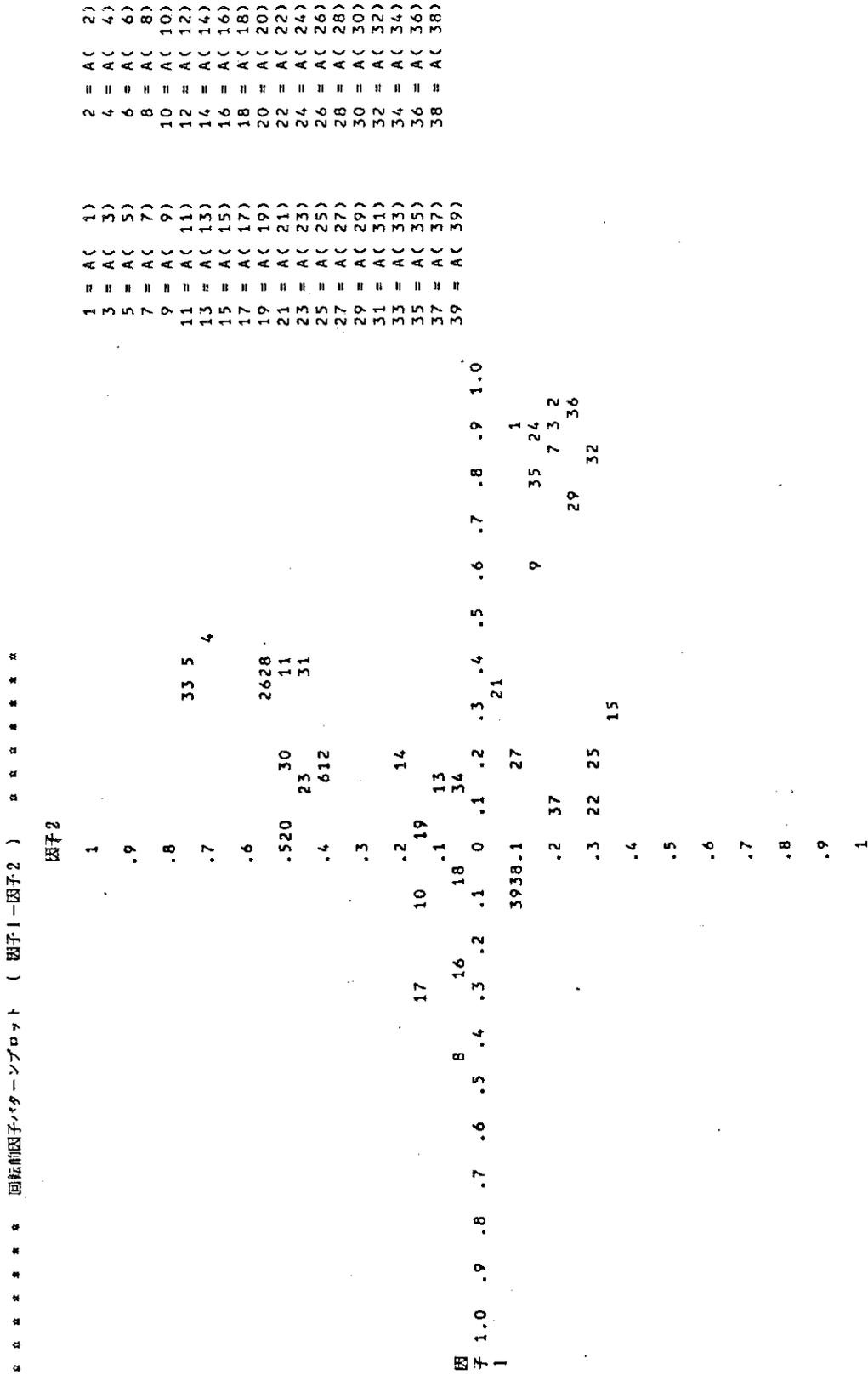


Fig.3.5 Plot of unrotated pattern (factor 1 - factor 2) for alarms.

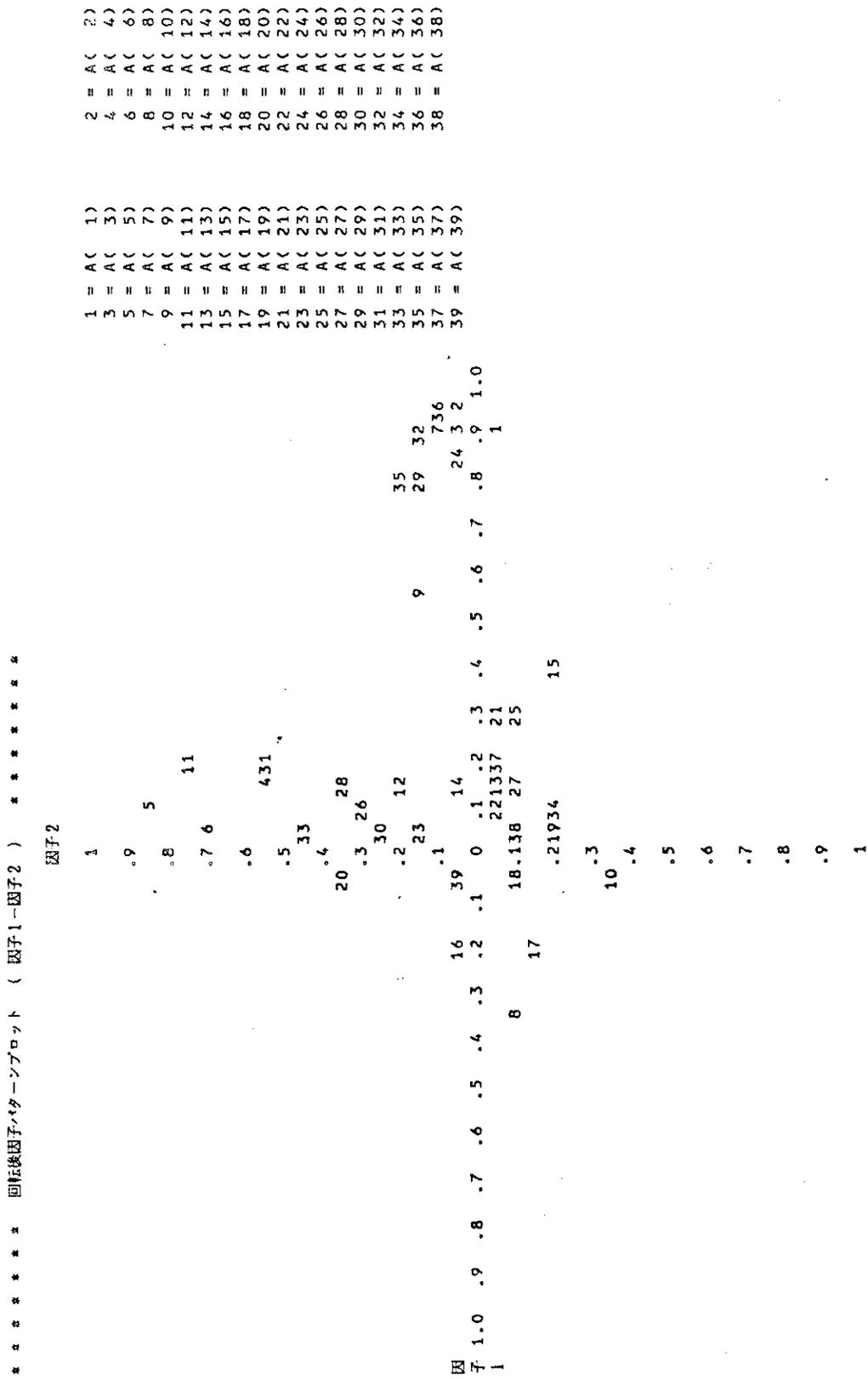


Fig.3.6 Plot of rotated pattern (factor 1 - factor 2) for alarms.

4. 模擬事故データに対するクラスター分析

Table 2.4 の模擬事故データ (36行×39列) に対し、クラスター分析を行い、

- (I) 模擬事故 (行) 項目のクラスタリング、
- (II) アラーム (列) 項目のクラスタリング

を行う。ここで、クラスタリングという用語は、“類別化する” という意味で使用している。

4.1 使用するクラスター分析手法

クラスター分析は、我々が取り扱う対象を適切に分類し、その分類を通して有用な情報を取り出し易くする手法である。一般に、分析対象となるデータは、 m 個の標本に対する n 個の特性値である。このとき、 m 個の標本をクラスタリングする場合と、 n 個の特性項目をクラスタリングする場合がある。本稿では、特性項目のクラスタリングを行う。模擬事故項目のクラスタリングには、アラーム項目を標本とみなした Table 2.4 のデータ (36行×39列) を用い、アラーム項目のクラスタリングには、模擬事故項目を標本とみなした Table 2.5 のデータ (39行×36列) を用いる。

クラスター分析手法には、非常に多くの手法があり、分析の対象、目的に応じて適切な手法が選ばれねばならない。本報告では、特性項目間の相関係数を類似性の尺度としてそのまま用いる手法を使う。相関係数 r を距離 d に、 $d = 1 - r$ として換算し、 d^2 を類似性の尺度として使う手法が一般には使用されているが、これは $d^2 = 1 - 2r + r^2$ となり、相関係数 r との関係が直観的でない。また、0-1型データの場合、一致係数、類似比などの類似性の尺度もあるが、事故解析データは必ずしも0-1型データのみではないので、本報告では使用しなかった。

クラスタリングの算法 (アルゴリズム) としては、はじめ、すべての特性項目がそれぞれ1個のクラスタ (群れ) を構成すると考え、次に一番似た (または似ない) クラスタどうしを順々に結合させていく方法をとる。クラスター分析手法は、“似たものどうしを集める” という手法で、似ていないものを結合させるという概念はない。しかし、本報告では、模擬事故項目、アラーム項目のそれぞれにおいて、他と弁別しやすい項目と弁別しにくい項目を見つけるために、似ていない (相関係数の小さい) ものから結合させるという新しい算法を定義して試用してみた。以下に、本報告で使用した6種類の算法について示す。

[A] 似た (相関係数の一番大きい) ものからクラスタを結合させていく算法

複数の特性項目を含むクラスタ間の相関係数の定義方法は、以下の3つの方法を使用した。

(1) 最近隣法 (nearest neighbor method)

クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の中で一番大きいものとする。

これは、相関係数を距離に換算して行う最近隣法⁽¹⁾ と同じ意味をもつ。

(2) 最遠隣法 (furthest neighbor method)

クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の中で一番小さいものとする。

これも、相関係数を距離に換算して行う最遠隣法¹¹⁾と同じ意味をもつ。

(3) 平均隣法 (average neighbor method)

クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の全算術平均をとったものとする。

この考え方は、文献 12) に示されているが、算法の定義がないので、本稿では平均隣法と名付けて使う。相関係数を距離に換算して行う場合の群平均法¹¹⁾、重心法¹¹⁾とは異なる。

[B] 似ていない (相関係数の一番小さい) ものからクラスタを結合させていく算法

複数の特性項目を含むクラスタ間の相関係数の定義方法は、以下の 3 つの方法を使った。最近離法、最遠離法、平均離法は、それぞれ前述の最近隣法、最遠隣法、平均隣法に対応させて作成した方法である。

(4) 最近離法 (nearest isolator method)

クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の中で一番大きいものとする。

(5) 最遠離法 (furthest isolator method)

クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の中で一番小さいものとする。

(6) 平均離法 (average isolator method)

平均のものが一番離れているクラスタどうしをつなぐ方法である。クラスタ C_i とクラスタ C_j の相関係数は、 C_i に属する項目と C_j に属する項目の相関係数の全算術平均をとったものとする。

4.2 模擬事故項目に対するクラスター分析

Table 2.4 のデータを使用し、模擬事故 36 項目に関してクラスター分析を行った。

Fig. 4.1 に最近隣法、Fig. 4.2 に最遠隣法、Fig. 4.3 に平均隣法によるクラスター分析結果を示す。

Table 4.1 ~ Table 4.3 は、それぞれ Fig. 4.1 ~ Fig. 4.3 のデンドログラム (樹状図) において示された事故項目の順 (左から右) に入力データを並べたものである。この表は、クラスタの意味付けに役立てられる。

Fig. 4.4 ~ Fig. 4.6 には、それぞれ最近離法、最遠離法、平均離法によるクラスター分析結果を示す。

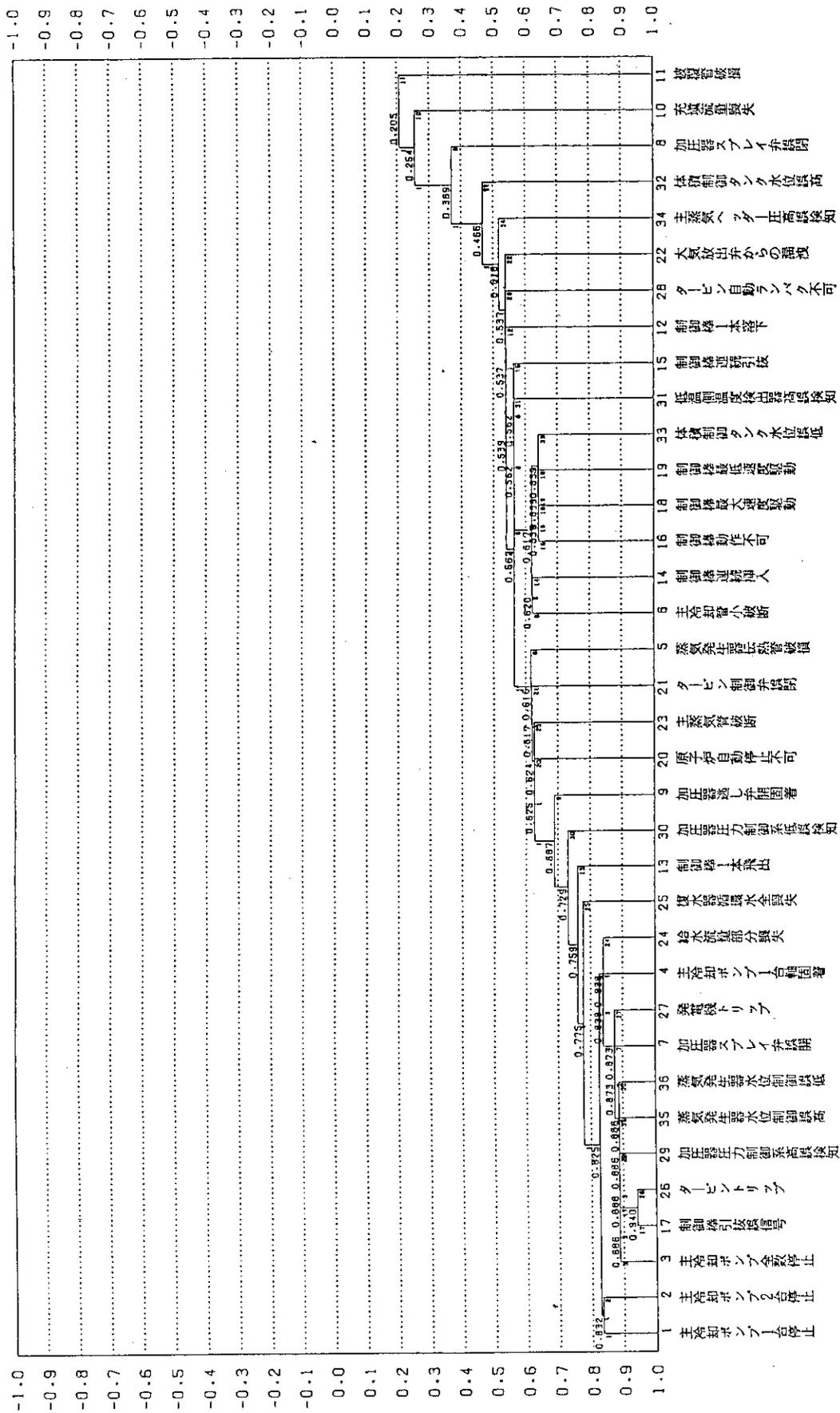


Fig.4.1 Dendrogram for simulated accidents by nearest neighbor method.

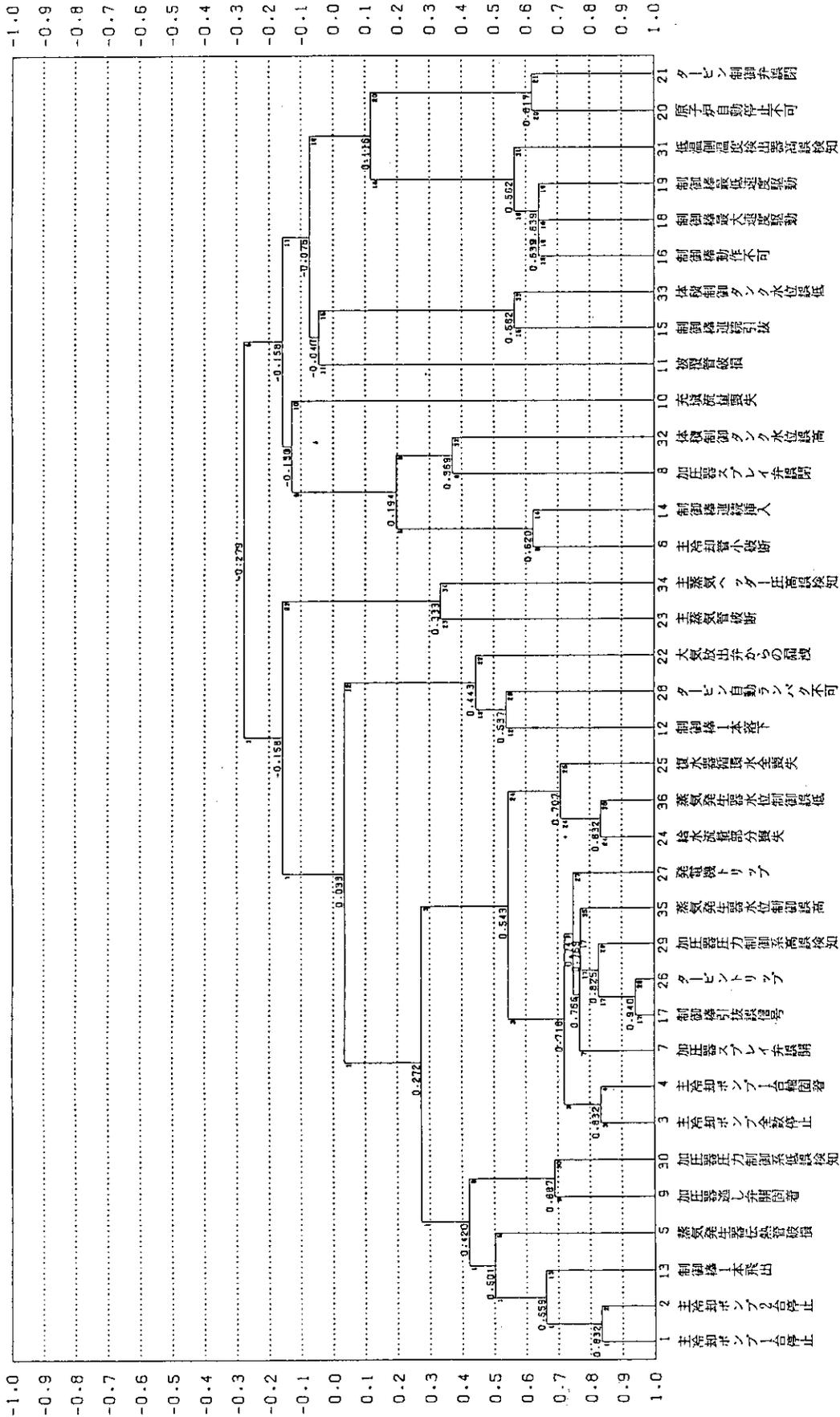


Fig. 4.2 Dendrogram for simulated accidents by furthest neighbor method.

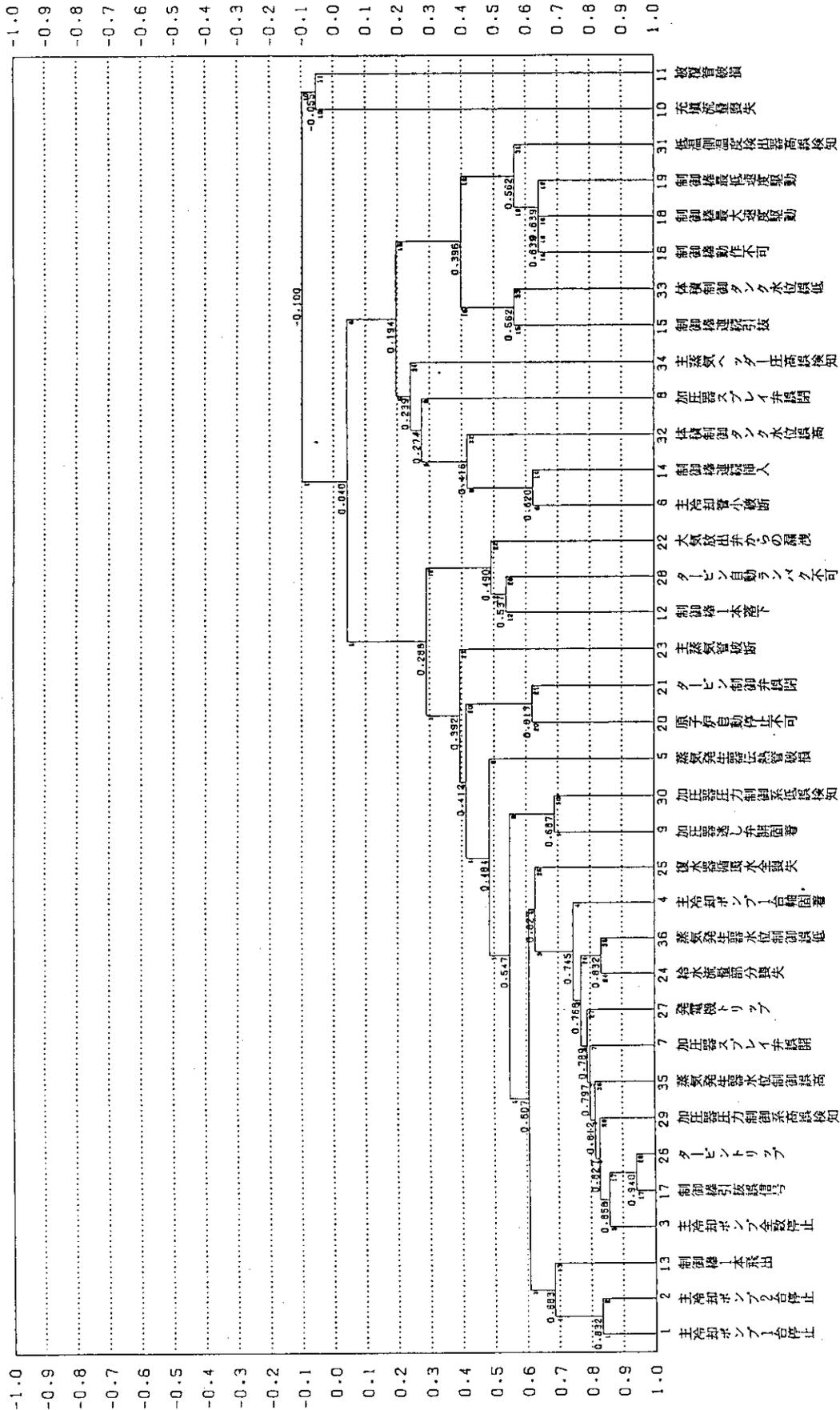


Fig.4.3 Dendrogram for simulated accidents by average neighbor

method.

Table 4.1 Sorted Input data in order of Fig.4.1 (accident, nearest).

==== SORT DATA ====

模擬事故	+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1	主冷却ポンプ1台停止	111000100100001000001011100001010011000
2	主冷却ポンプ2台停止	111000100100001000001011000010010011000
3	主冷却ポンプ全数停止	111000101000001000001001000010010011010
17	制御棒引抜誤信号	111000101100000000001001000010010011000
26	タービントリップ	111000101000000000001001000010010011000
29	加圧器圧力制御系高誤検知	111000101010100000001001000010010011000
35	蒸気発生器水位制御誤高	111000101000000000001001001010110011000
36	蒸気発生器水位制御誤低	111001101000000000001001000110010011000
7	加圧器スプレイ弁誤開	11100010100100000000001000010010011000
27	発電機トリップ	111000101000000000001001000010010001100
4	主冷却ポンプ1台軸固着	111000101000001000001101100010010011000
24	給水流量部分喪失	111000101000000000001011010110010011000
25	復水器循環水全喪失	111000101000000000001001010100000111000
13	制御棒1本飛出	111000100100000000100001000011010011000
30	加圧器圧力制御系低誤検知	111000100101100001011001000010010011000
9	加圧器逃し弁開固着	111100100101110000101001000010011011000
20	原子炉自動停止不可	001000000000000000001101000010010001000
23	主蒸気管破断	111111101011000000011011010111111011000
21	タービン制御弁誤閉	000000000000000000001000000010010000000
5	蒸気発生器伝熱管破損	110000110101000010001001100010010011001
6	主冷却管小破断	00000001010100001010101000000000000000
14	制御棒連続挿入	00000000010000001000101000000100000000
16	制御棒動作不可	00000000110000000000100000000000000000
18	制御棒最大速度駆動	00000001100000000000100000000000000000
19	制御棒最低速度駆動	00000001010000000000100000000000000000
33	体積制御タンク水位誤低	00000001000000010000100000000000000000
31	低温側温度検出器高誤検知	00000000000000000000100000000000000000
15	制御棒連続引抜	00000001000000000000000000000000000000
12	制御棒1本落下	000000100000000000001000000010000010000
28	タービン自動ランバク不可	00000110000000000000000000000000000010000
22	大気放出弁からの漏洩	000001000000000000001001000000000010000
34	主蒸気ヘッダー圧高誤検知	100000000100000000001011010101001000000
32	体積制御タンク水位誤高	00000000010000001001000000000000000000
8	加圧器スプレイ弁誤閉	00000000010010000000000000000000000000
10	充填流量喪失	000000000001000001010000000000000000010
11	被覆管破損	000000000000000000000000000000000000001

Table 4.2 Sorted Input data in order of Fig.4.2 (accident, furthest).

==== SORT DATA ====

模擬事故+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1 主冷却ポンプ1台停止	111000100100001000001011100001010011000
2 主冷却ポンプ2台停止	111000100100001000001011000010010011000
13 制御棒1本飛出	111000100100000000100001000011010011000
5 蒸気発生器伝熱管破損	110000110101000010001001100010010011001
9 加圧器逃し弁開固着	111100100101110000101001000010011011000
30 加圧器圧力制御系低誤検知	111000100101100001011001000010010011000
3 主冷却ポンプ全数停止	111000101000001000001001000010010011010
4 主冷却ポンプ1台軸固着	111000101000001000001101100010010011000
7 加圧器スプレイ弁誤閉	1110001010010000000000001000010010011000
17 制御棒引抜誤信号	111000101100000000001001000010010011000
26 タービントリップ	111000101000000000001001000010010011000
29 加圧器圧力制御系高誤検知	111000101010100000001001000010010011000
35 蒸気発生器水位制御誤高	111000101000000000001001001010110011000
27 発電機トリップ	111000101000000000001001000010010001100
24 給水流量部分喪失	111000101000000000001011010110010011000
36 蒸気発生器水位制御誤低	111001101000000000001001000110010011000
25 復水器循環水全喪失	111000101000000000001001010100000111000
12 制御棒1本落下	000000100000000000001000000010000010000
28 タービン自動ランバク不可	00000110000000000000000000000000000010000
22 大気放出弁からの漏洩	000001000000000000001001000000000010000
23 主蒸気管破断	111111101011000000011011010111111011000
34 主蒸気ヘッダー圧高誤検知	100000000100000000001011010101001000000
6 主冷却管小破断	000000010101000010101010000000000000000
14 制御棒連続挿入	000000000100000010001010000001000000000
8 加圧器スプレイ弁誤閉	000000000100100000000000000000000000000
32 体積制御タンク水位誤高	000000000100000010010000000000000000000
10 充填流量喪失	000000000001000001010000000000000000010
11 被覆管破損	0000000000000000000000000000000000000001
15 制御棒連続引抜	000000010000000000000000000000000000000
33 体積制御タンク水位誤低	000000010000000100001000000000000000000
16 制御棒動作不可	000000001100000000001000000000000000000
18 制御棒最大速度駆動	000000011000000000001000000000000000000
19 制御棒最低速度駆動	000000010100000000001000000000000000000
31 低温側温度検出器高誤検知	000000000000000000001000000000000000000
20 原子炉自動停止不可	001000000000000000001101000010010001000
21 タービン制御弁誤閉	000000000000000000001000000010010000000

Table 4.3 Sorted Input data in order of Fig.4.3 (accident, average).

===== SORT DATA =====

模擬事故	+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1	主冷却ポンプ1台停止	111000100100001000001011100001010011000
2	主冷却ポンプ2台停止	111000100100001000001011000010010011000
13	制御棒1本飛出	111000100100000000100001000011010011000
3	主冷却ポンプ全数停止	111000101000001000001001000010010011010
17	制御棒引抜誤信号	111000101100000000001001000010010011000
26	タービントリップ	111000101000000000001001000010010011000
29	加圧器圧力制御系高誤検知	111000101010100000001001000010010011000
35	蒸気発生器水位制御誤高	111000101000000000001001001010110011000
7	加圧器スプレイ弁誤閉	11100010100100000000001000010010011000
27	発電機トリップ	111000101000000000001001000010010001100
24	給水流量部分喪失	111000101000000000001011010110010011000
36	蒸気発生器水位制御誤低	111001101000000000001001000110010011000
4	主冷却ポンプ1台軸固着	111000101000001000001101100010010011000
25	復水器循環水全喪失	111000101000000000001001010100000111000
9	加圧器逃し弁開固着	111100100101110000101001000010011011000
30	加圧器圧力制御系低誤検知	111000100101100001011001000010010011000
5	蒸気発生器伝熱管破損	110000110101000010001001100010010011001
20	原子炉自動停止不可	001000000000000000001101000010010001000
21	タービン制御弁誤閉	000000000000000000001000000010010000000
23	主蒸気管破断	111111101011000000011011010111111011000
12	制御棒1本落下	000000100000000000001000000010000010000
28	タービン自動ランバク不可	00000110000000000000000000000000000000
22	大気放出弁からの漏洩	00000100000000000000100100000000000000
6	主冷却管小破断	00000001010100001010101000000000000000
14	制御棒連続挿入	000000000100000010001010000001000000000
32	体積制御タンク水位誤高	00000000010000001001000000000000000000
8	加圧器スプレイ弁誤閉	00000000010010000000000000000000000000
34	主蒸気ヘッダー圧高誤検知	100000000100000000001011010101001000000
15	制御棒連続引抜	00000001000000000000000000000000000000
33	体積制御タンク水位誤低	00000001000000010000100000000000000000
16	制御棒動作不可	00000000110000000000100000000000000000
18	制御棒最大速度駆動	00000001100000000000100000000000000000
19	制御棒最低速度駆動	00000001010000000000100000000000000000
31	低温側温度検出器高誤検知	00000000000000000000100000000000000000
10	充填流量喪失	00000000000100000101000000000000000010
11	被覆管破損	00000000000000000000000000000000000001

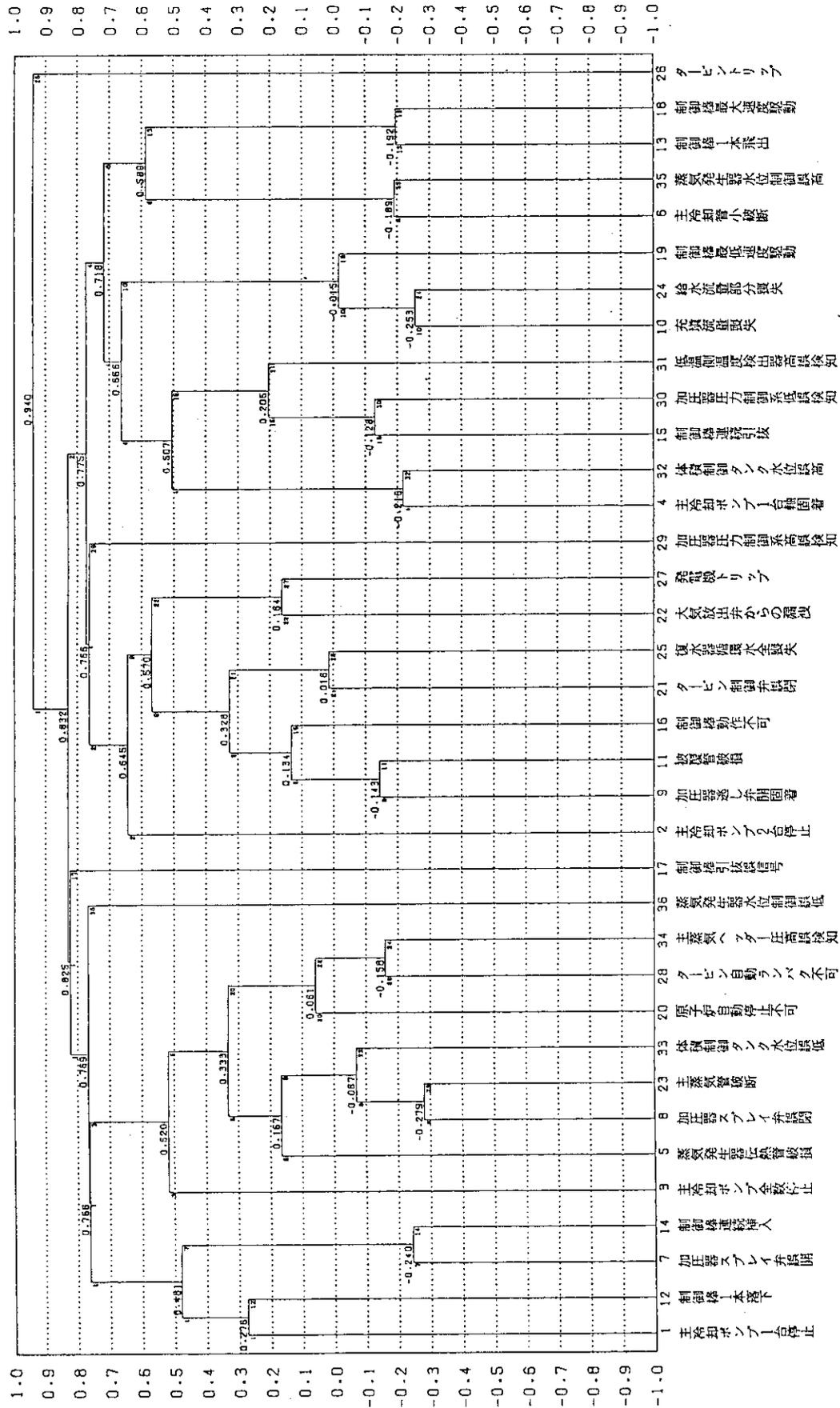


Fig.4.4 Dendrogram for simulated accidents by nearest isolator method.

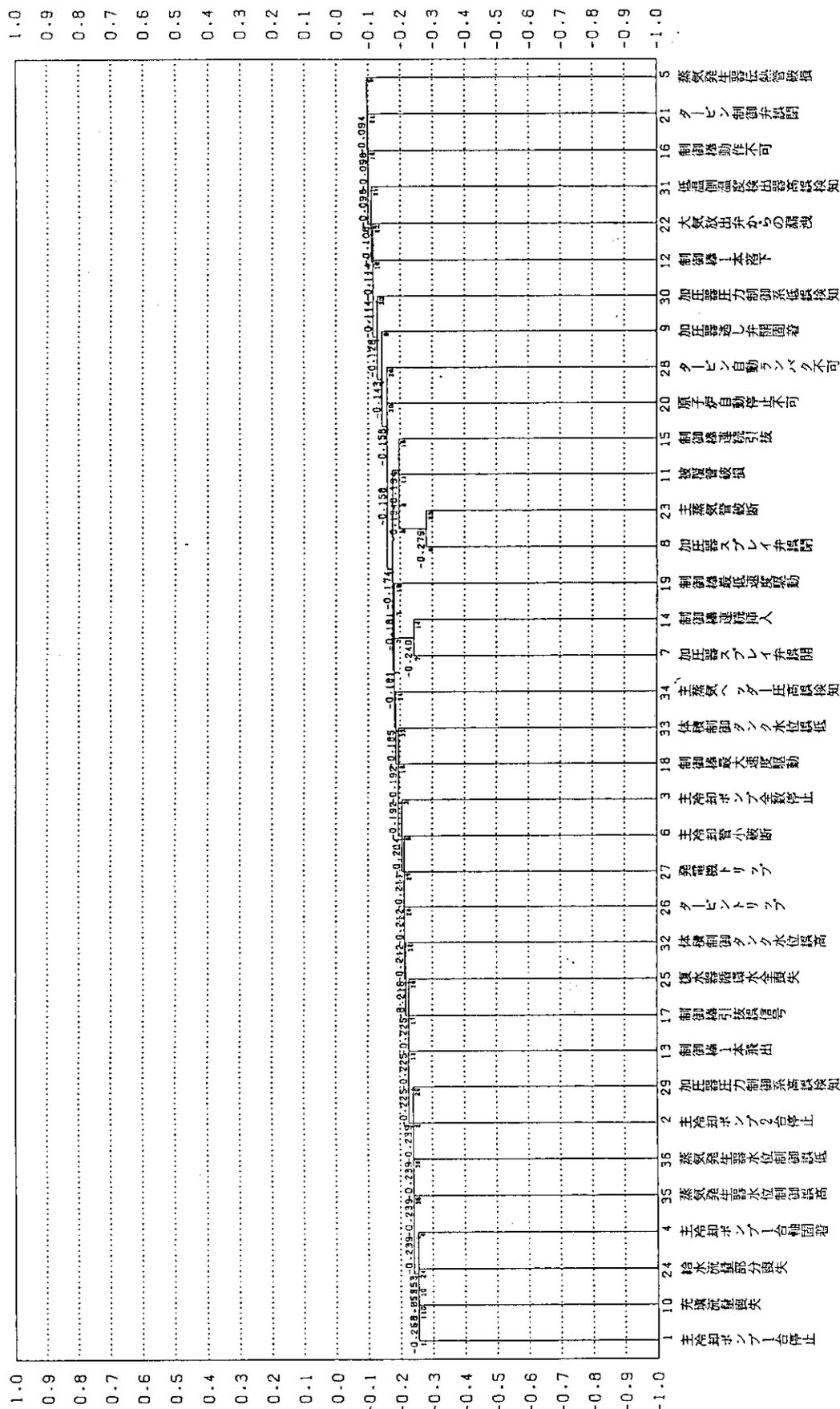


Fig.4.5 Dendrogram for simulated accidents by furthest isolator

method.

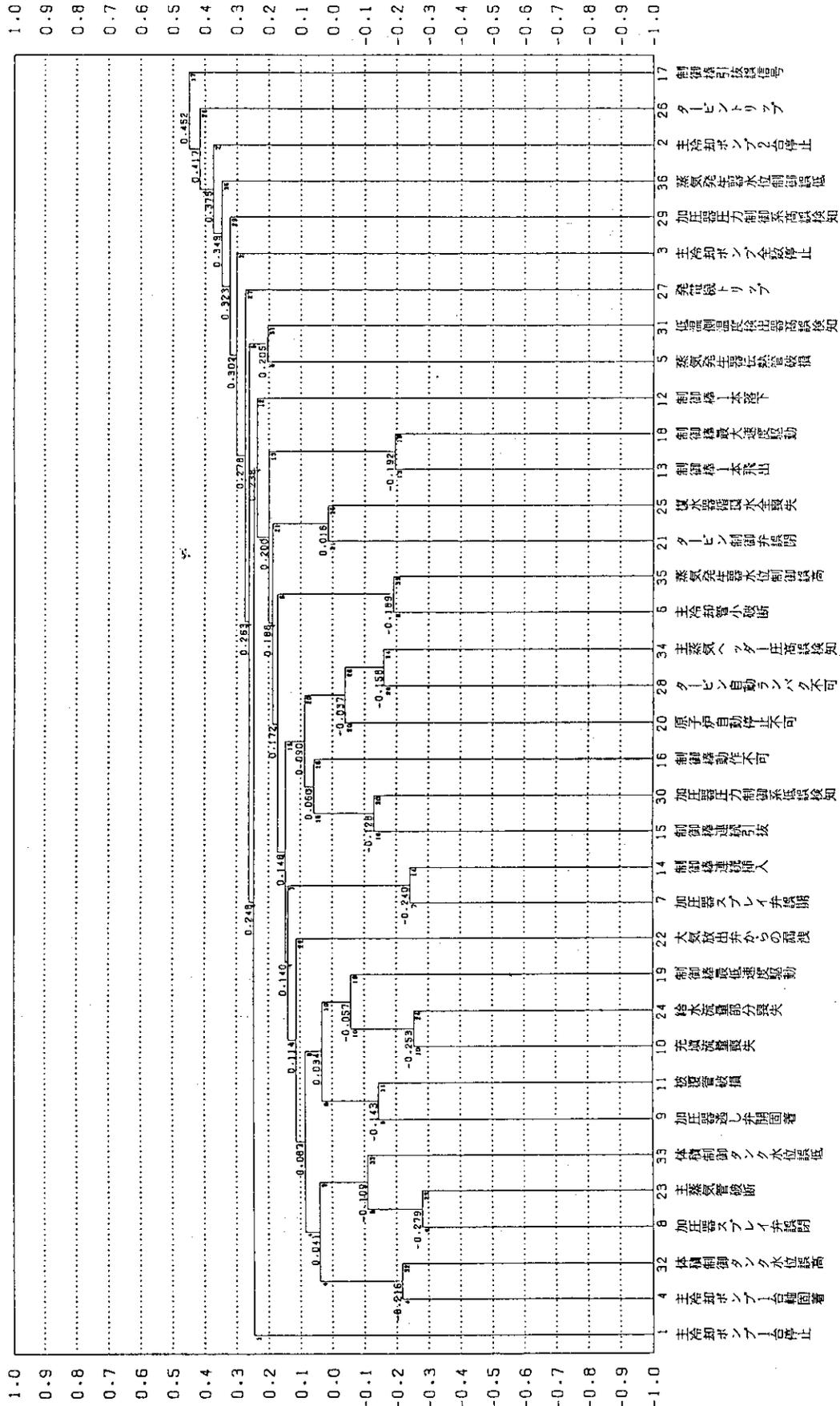


Fig.4.6 Dendrogram for simulated accidents by average isolator

method.

4.3 アラーム項目に対するクラスター分析

Table 2.5 のデータを使用し、アラーム39項目に関してクラスター分析を行った。

Fig. 4.7 に最近隣法, Fig. 4.8 に最遠隣法, Fig. 4.9 に平均隣法によるクラスター分析結果を示す。

Table 4.4 ~ Table 4.6 は, それぞれ Fig. 4.7 ~ Fig. 4.9 のデンドログラム (樹状図) において示されたアラーム項目の順 (左から右) に入力データを並べたものである。この表は, クラスターの意味づけに役立てられる。

Fig. 4.10 ~ Fig. 4.12 には, それぞれ最近離法, 最遠離法, 平均離法によるクラスター分析結果を示す。

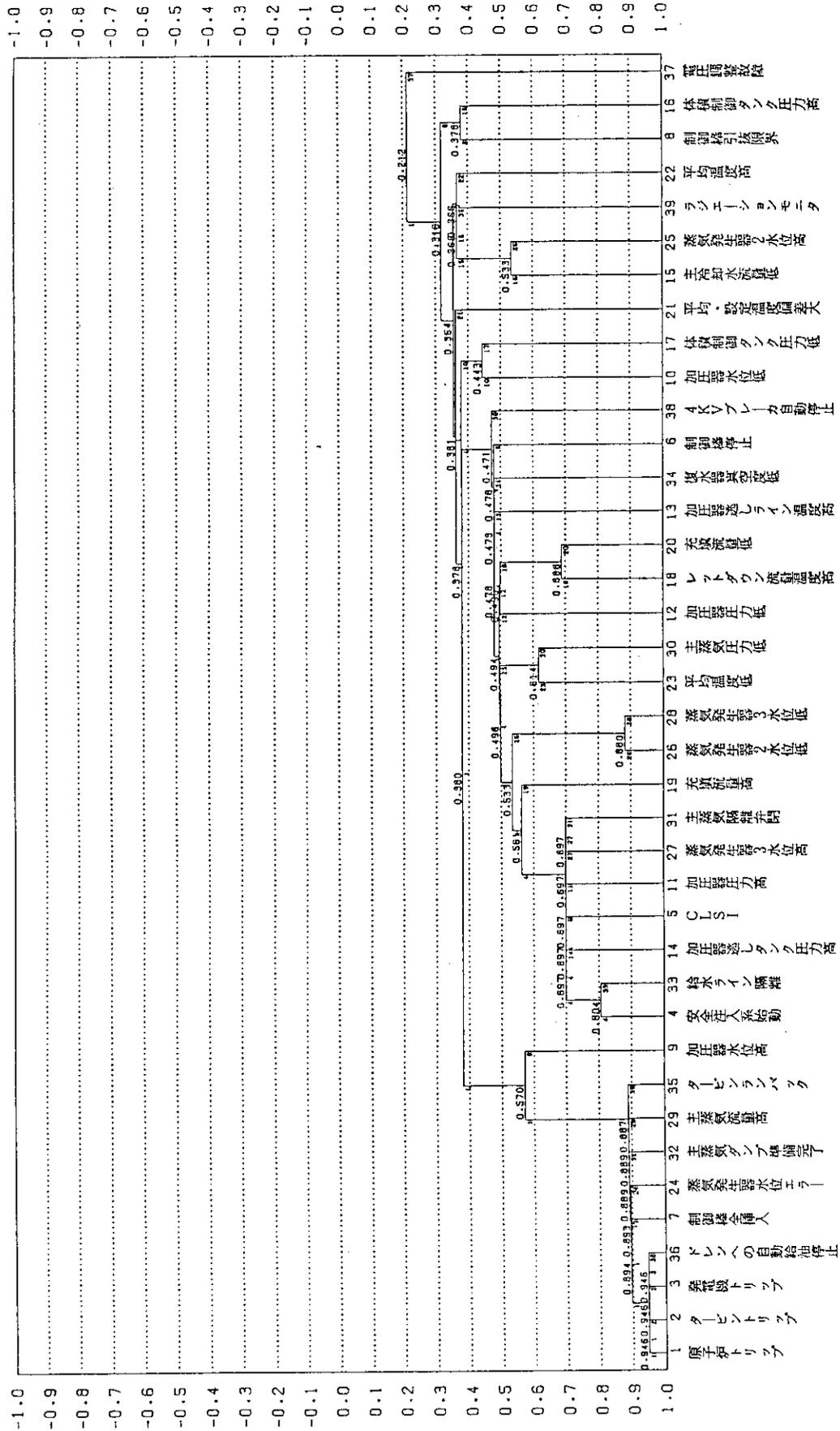


Fig.4.7 Dendrogram for alarms by nearest neighbor method.

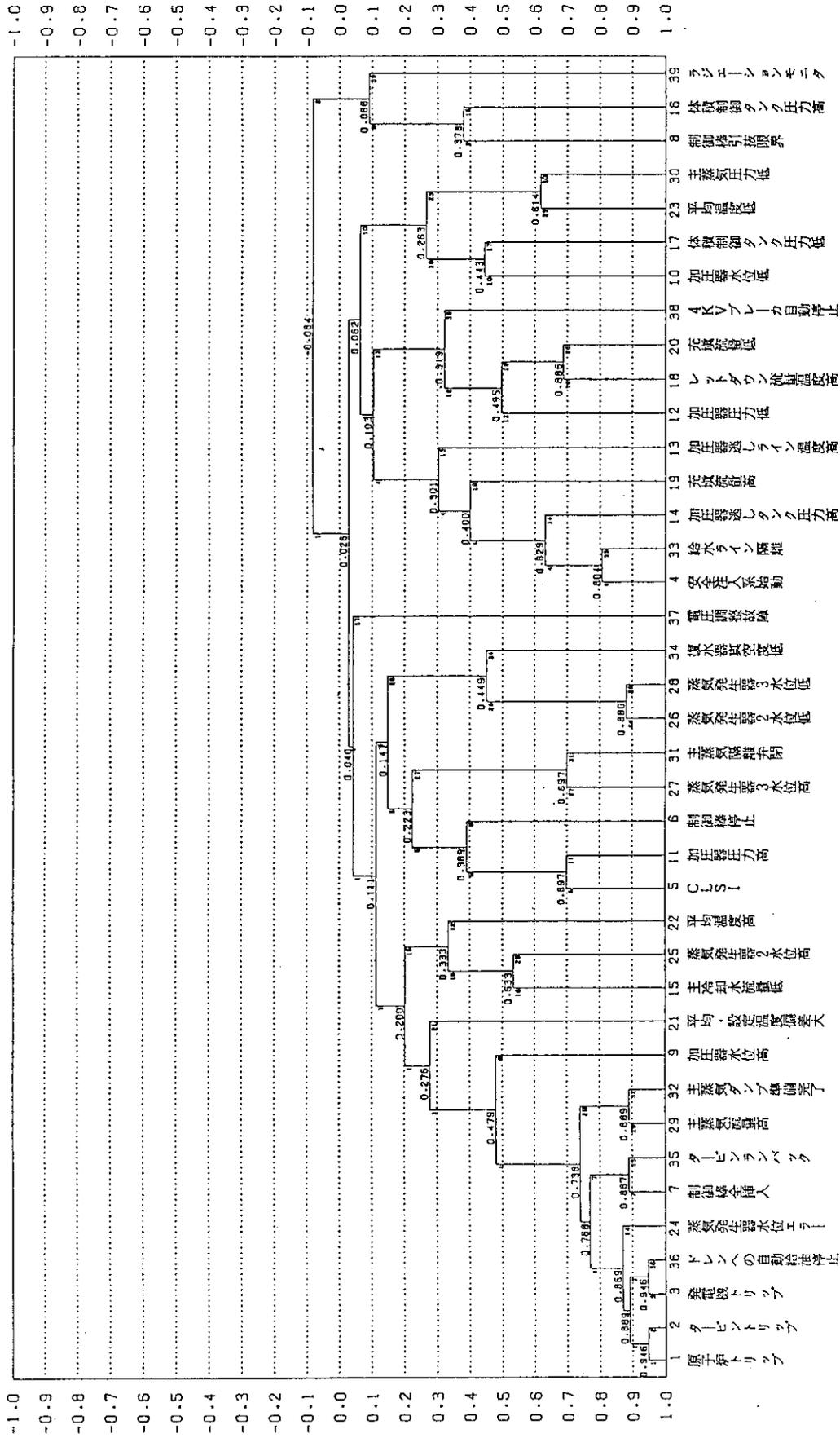


Fig.4.9 Dendrogram for alarms by average neighbor method.

Table 4.4 Sorted input data in order of Fig.4.7 (alarm, nearest).

==== SORT DATA ====

アラーム+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*	
1	原子炉トリップ	111110101000100010000011111011000111
2	タービントリップ	111110101000100010000011111011000011
3	発電機トリップ	111100101000100010010011111011000011
36	ドレンへの自動給油停止	111110101000100010010011111011000011
7	制御棒全挿入	111110101001100010000011111111000011
24	蒸気発生器水位エラー	111110101000100010010111111011000111
32	主蒸気ダンプ準備完了	111110101000100010011011011011000011
29	主蒸気流量高	011110101001100010011011011011000011
35	タービンランバック	111110101001100010000111110111000011
9	加圧器水位高	001100100000000111000011111010000011
4	安全注入系始動	000000001000000000000010000000000000
33	給水ライン隔離	000000001000000000000010000000000100
14	加圧器逃しタンク圧力高	000000001000000000000000000000000000
5	CLSI	00000000000000000000000010000000000000
11	加圧器圧力高	00000000000000000000000010000010000000
27	蒸気発生器3水位高	0000000000000000000000000000000000010
31	主蒸気隔離弁閉	00000000000000000000000010000000000010
19	充填流量高	000001001000100000000000000000000000
26	蒸気発生器2水位低	00000000000000000000000011100000000100
28	蒸気発生器3水位低	00000000000000000000000011100000000101
23	平均温度低	110001000000010000000011000000000100
30	主蒸気圧力低	100000000000110000000010000000000100
12	加圧器圧力低	000011101100000000000010000001000000
18	レットダウン流量温度高	00000000010000000000000000000001000000
20	充填流量低	000000000100000000000010000001010000
13	加圧器逃しライン温度高	0000000110000000000000000000011000000
34	復水器真空度低	000000000000000000000000100000000000
6	制御棒停止	00000000000000000000000110000100000001
38	4KVブレーカ自動停止	001000000100000000000000000000000000
10	加圧器水位低	110011011000110110100000000001010100
17	体積制御タンク圧力低	0000110000000100000000000000000010000
21	平均・設定温度偏差大	111111001001010111111111111011101111
15	主冷却水流量低	111100000000000000000000000000000000
25	蒸気発生器2水位高	100110000000000000000000000000000000
39	ラジエーションモニタ	000010000010000000000000000000000000
22	平均温度高	000100000000000000000100000000000000
8	制御棒引抜限界	000011000000001001100000000000001000
16	体積制御タンク圧力高	000000000000000000000000000000000100
37	電圧調整故障	00000000000000000000000000000100000000

Table 4.5 Sorted input data in order of Fig.4.8 (alarm, furthest).

==== SORT DATA ====

アラーム	+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1	原子炉トリップ	111110101000100010000011111011000111
2	タービントリップ	111110101000100010000011111011000011
3	発電機トリップ	111100101000100010010011111011000011
36	ドレンへの自動給油停止	111110101000100010010011111011000011
24	蒸気発生器水位エラー	111110101000100010010111111011000111
7	制御棒全挿入	111110101001100010000011111111000011
35	タービンランバック	111110101001100010000111110111000011
29	主蒸気流量高	011110101001100010011011011011000011
32	主蒸気ダンプ準備完了	111110101000100010011011011011000011
9	加圧器水位高	001100100000000111000011111010000011
21	平均・設定温度偏差大	111111001001010111111111111011101111
27	蒸気発生器3水位高	00000000000000000000000000000000010
31	主蒸気隔離弁閉	0000000000000000000000001000000000010
15	主冷却水流量低	11110000000000000000000000000000000
25	蒸気発生器2水位高	10011000000000000000000000000000000
22	平均温度高	00010000000000000000100000000000000
4	安全注入系始動	00000000100000000000000100000000000
33	給水ライン隔離	000000001000000000000001000000000100
5	CLSI	00000000000000000000000100000000000
11	加圧器圧力高	000000000000000000000001000001000000
6	制御棒停止	0000000000000000000000011000010000001
26	蒸気発生器2水位低	0000000000000000000000011100000000100
28	蒸気発生器3水位低	0000000000000000000000011100000000101
34	復水器真空度低	00000000000000000000000010000000000
12	加圧器圧力低	000011101100000000000001000000100000
18	レットダウン流量温度高	00000000010000000000000000000000100000
20	充填流量低	000000000100000000000001000000101000
38	4KVブレーカ自動停止	00100000010000000000000000000000000
13	加圧器逃しライン温度高	00000001100000000000000000000001100000
14	加圧器逃しタンク圧力高	00000000100000000000000000000000000
19	充填流量高	00000100100010000000000000000000000
8	制御棒引抜限界	000011000000001001100000000000001000
16	体積制御タンク圧力高	0000000000000000000000000000000001000
37	電圧調整故障	0000000000000000000000000000100000000
39	ラジエーションモニタ	00001000001000000000000000000000000
10	加圧器水位低	110011011000110110100000000001010100
17	体積制御タンク圧力低	000011000000010000000000000000001000
23	平均温度低	1100010000000100000000011000000000100
30	主蒸気圧力低	100000000000110000000010000000000100

.....+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*

Table 4.6 Sorted input data in order of Fig.4.9 (alarm, average).

==== SORT DATA ====

アラーム+.....*.....+.....*.....+.....*.....+.....*
1 原子炉トリップ	111110101000100010000011111011000111
2 タービントリップ	11111010100010001000001111101100011
3 発電機トリップ	11110010100010001001001111101100011
36 ドレンへの自動給油停止	11111010100010001001001111101100011
24 蒸気発生器水位エラー	11111010100010001001011111101100011
7 制御棒全挿入	11111010100110001000001111111100011
35 タービンランバック	11111010100110001000011111011100011
29 主蒸気流量高	01111010100110001001101101101100011
32 主蒸気ダンプ準備完了	11111010100010001001101101101100011
9 加圧器水位高	00110010000000011100001111101000011
21 平均・設定温度偏差大	111111001001010101111111111101110111
15 主冷却水流量低	1111000000000000000000000000000000
25 蒸気発生器2水位高	1001100000000000000000000000000000
22 平均温度高	0001000000000000000010000000000000
5 C L S I	0000000000000000000000001000000000
11 加圧器圧力高	0000000000000000000000001000001000
6 制御棒停止	0000000000000000000000011000010000
27 蒸気発生器3水位高	0000000000000000000000000000000010
31 主蒸気隔離弁閉	0000000000000000000000010000000000
26 蒸気発生器2水位低	0000000000000000000000011100000000
28 蒸気発生器3水位低	0000000000000000000000011100000000
34 復水器真空度低	0000000000000000000000001000000000
37 電圧調整故障	0000000000000000000000000100000000
4 安全注入系始動	0000000100000000000001000000000000
33 給水ライン隔離	00000001000000000000010000000000100
14 加圧器逃しタンク圧力高	0000000100000000000000000000000000
19 充填流量高	0000100100010000000000000000000000
13 加圧器逃しライン温度高	0000001100000000000000000011000000
12 加圧器圧力低	0000111011000000000001000000100000
18 レットダウン流量温度高	0000000010000000000000000010000000
20 充填流量低	0000000010000000000010000001010000
38 4KVブレーカ自動停止	0010000010000000000000000000000000
10 加圧器水位低	11001101100011011010000000001010100
17 体積制御タンク圧力低	0000110000001000000000000000001000
23 平均温度低	11000100000010000000011000000000100
30 主蒸気圧力低	10000000000110000000010000000000100
8 制御棒引抜限界	0000110000000100110000000000001000
16 体積制御タンク圧力高	000000000000000000000000000000001000
39 ラジエーションモニタ	0000100000100000000000000000000000

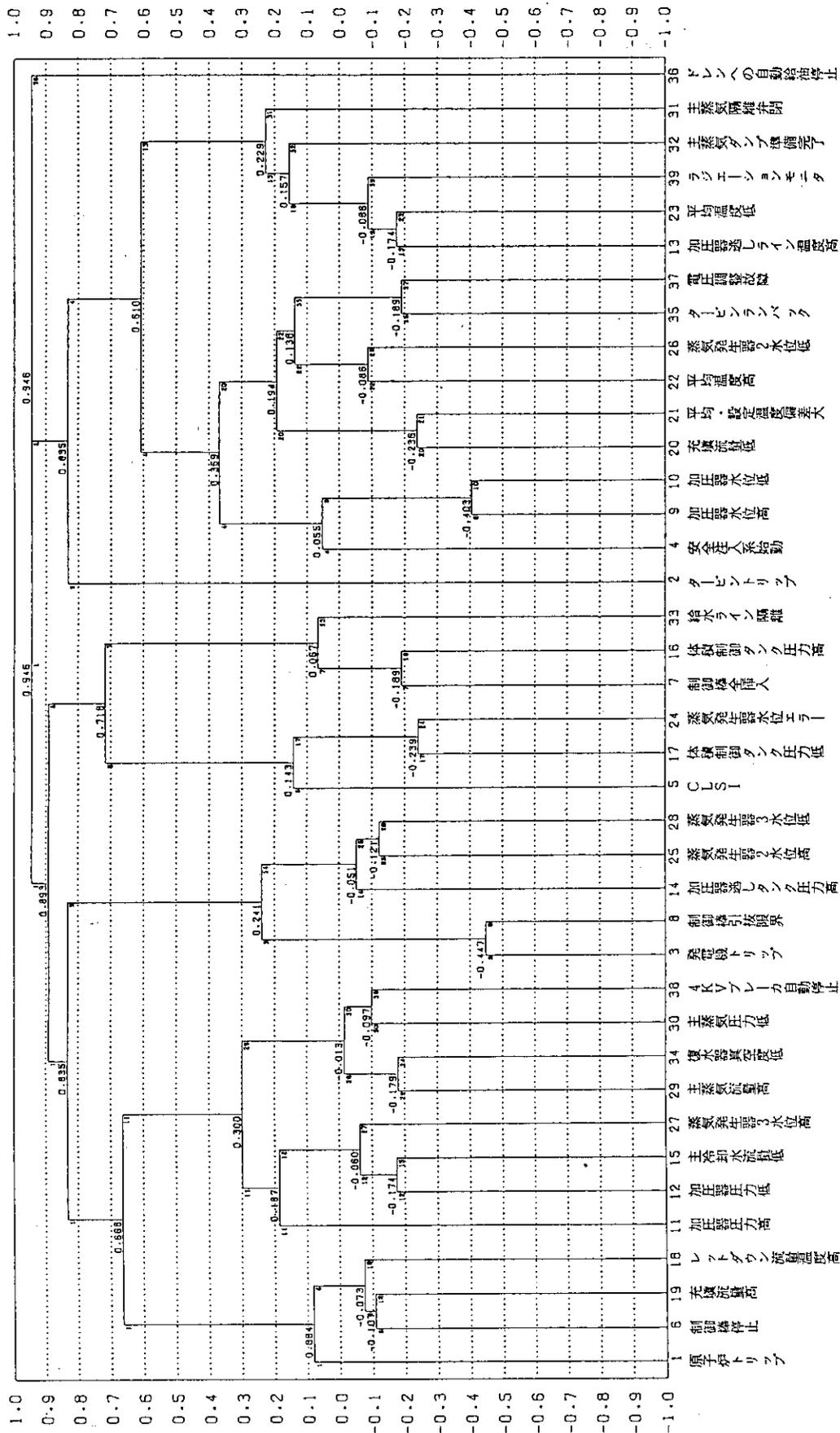


Fig.4.10 Dendrogram for alarms by nearest isolator method.

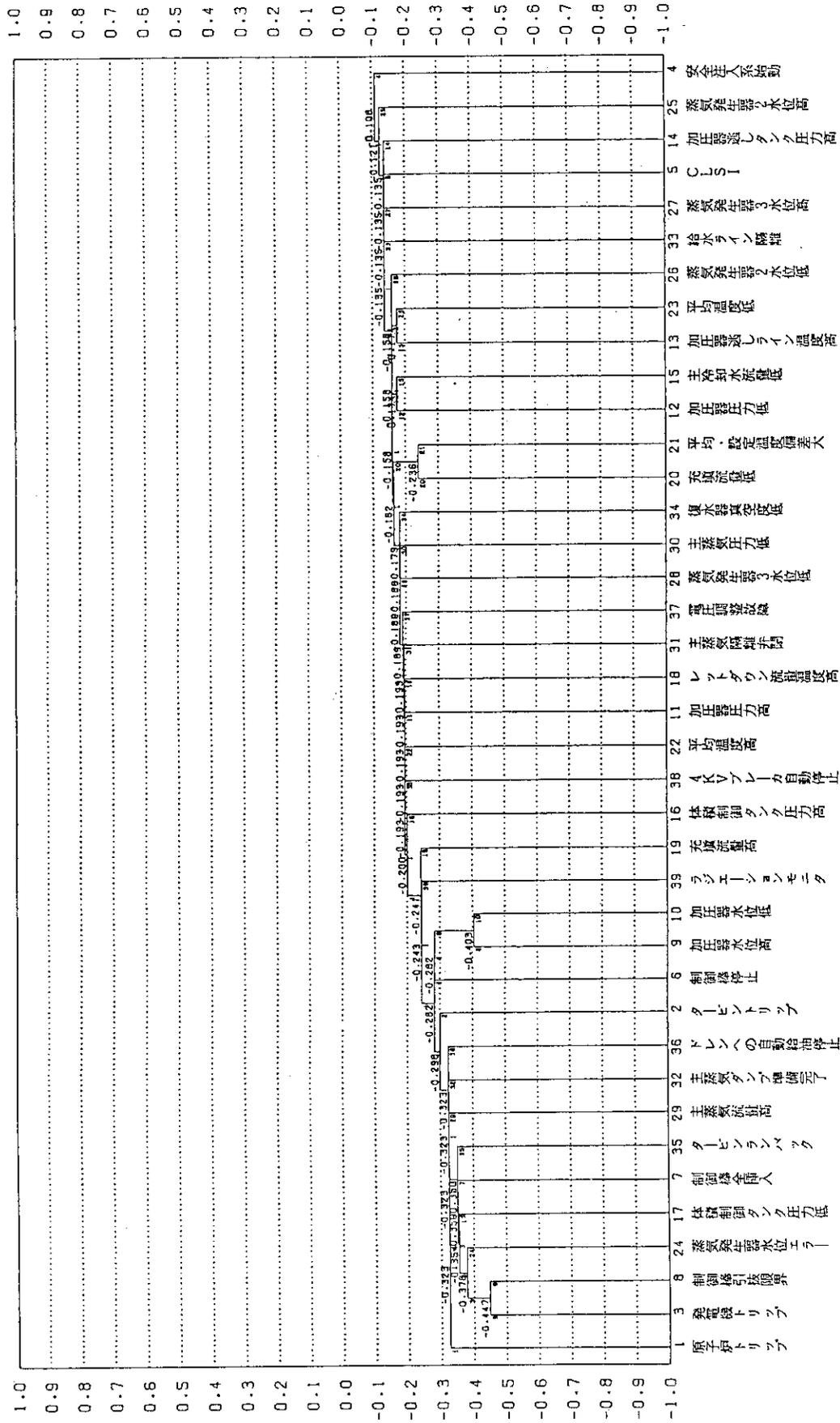


Fig.4.11 Dendrogram for alarms by furthest isolator method.

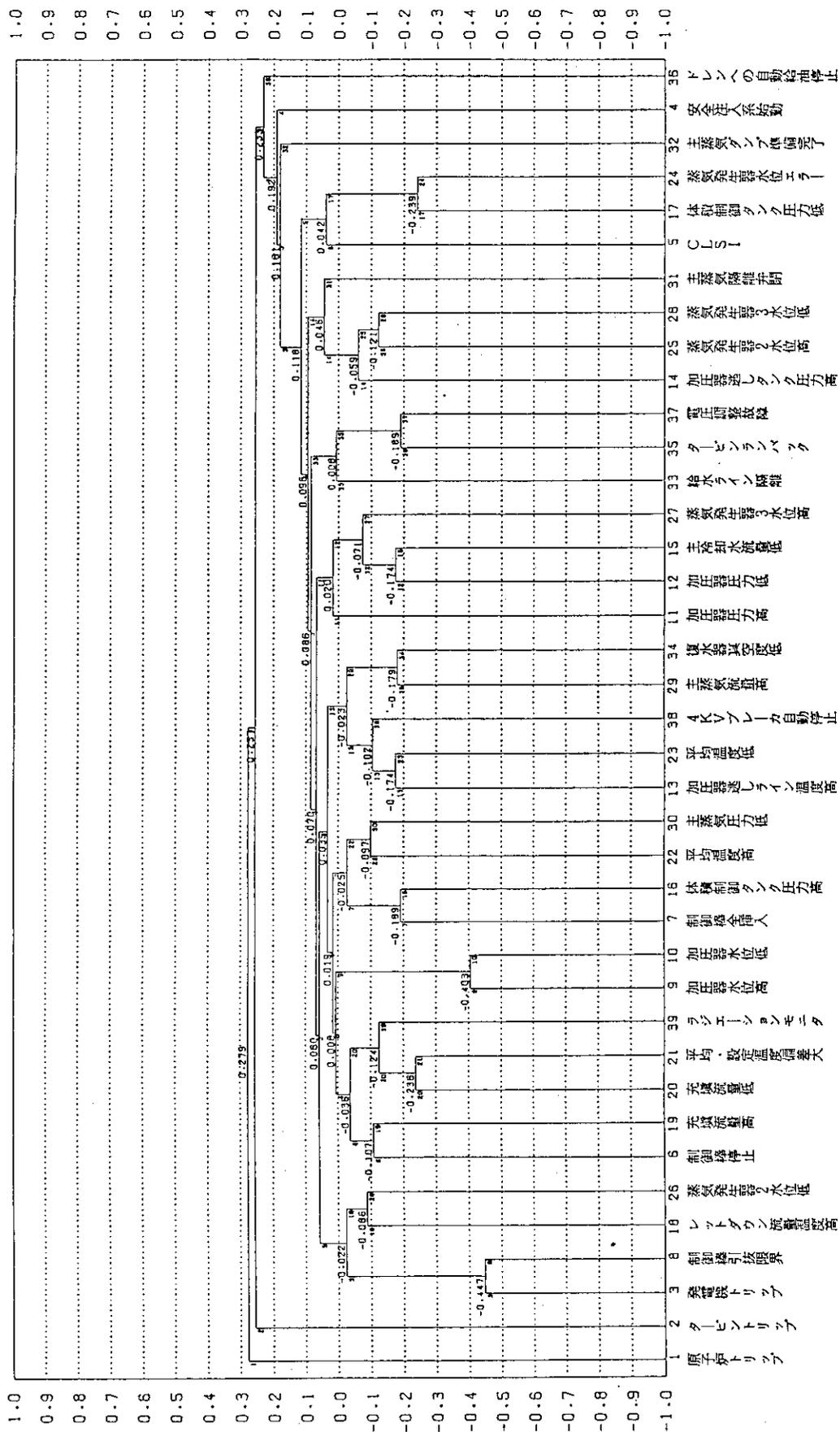


Fig.4.12 Dendrogram for alarms by average isolator method.

5. 知識ベース作成時における多変量解析結果の利用方法

5.1 知識工学と多変量解析

知識工学は、人間が考えるように計算機にも考えてもらいたいという発想から、計算機に知識を取り込み、人間の知的活動を支援するシステムをつくり出すための技術を提供する工学である。具体的には、教科書にも載っているような事実に関する知識 (facts) と専門家が長年にわたる学習と研究・経験を通して獲得した発見的知識 (heuristic knowledge : expertise) とを用い、専門分野向き (specific domain-oriented) のエキスパート・システム (expert system) によって高度な問題の解決 (problem solving) に対して高い水準の性能を示すプログラムを開発する計算機応用の工学、技術である。このエキスパート・システムは、知識ベースと推論機構から成る⁶⁾ (Fig. 5.1)。

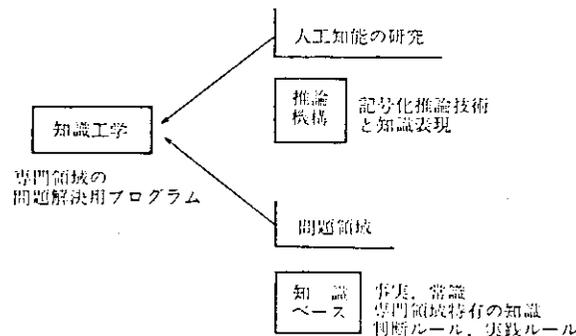


Fig.5.1 Concept of an expert system⁶⁾.

歴史的には、知識工学は、医療診断分野で生まれ、発展してきた。医師が診断する過程はひとつの典型的な「推論」であり、その過程を解析することは推論のメカニズムの研究としても興味あるものであるし、また医学教育や医師を支援する機械をつくるという意味からも興味ある分野であった。当初は、推論の過程を統計的なモデルで置き換える研究が盛んになり、Bayes の定理や多変量解析によってある程度の成果が収められた。しかし、統計的モデルで扱っているのは「データが整備された典型的な例」のみであり、実際の場の医学診断とはかなり違ったものであるという認識が次第に強くなってきた。すなわち、統計的手法の限界が感じられ、医師の「頭」の中で実際に起こっている過程をよく調べてみる必要があるとなった。こうした流れの中で、Shortliffe, E. H. らによって敗血症および髄膜炎の診断と病原菌同定、治療法に関するコンサルテーション・システム¹³⁾が作成され、EXPERT²⁾、MECS-AI¹⁴⁾のように知識ベースの部分の独立させた汎用の推論機構の作成へと発展している。原研の IERIAS³⁾は、原子炉事故診断システムの推論機構である。

知識工学と多変量解析の関係は、推論の演繹 (deduction) と帰納 (induction) の関係にあたる。

演繹的推論は、

仮定 1 : If x is A then y is B.

仮定 2 : x is A.

結論 : y is B.

のような 3 段論法（前向き推論）と、結論が仮説として先に与えられ、仮定 1 : If x is A then y is B という規則から仮定 2 : x is A を証明する逆向き推論がある。

帰納は、実験計画法、多変量解析などの統計的手法を援用して因果関係を発見する論理である。

専門家は、過去の知識から演繹的推論を、自分の研究、経験から帰納を無意識に行い、知識として獲得し、それらを診断に利用していると考えられる。

このため、統計的手法の帰納と専門家による推論の差の大きな点は、

- ① 統計的手法の帰納は、与えられたデータのみが利用可能な情報であるのに対し、専門家の推論は、過去に得た知識、さまざまなデータを利用可能な情報としていることである。

また、

- ② 統計的手法による帰納は、
- (1) 統計的手法によって分析できるように整理されたデータしか使えない、
 - (2) 使用したデータが、一般的なものでなく、偏ったものであるときはよい結果が得られない、
 - (3) 使用するデータは、ひとつひとつが同じ重みを持ち、重要なデータと重要でないデータが同列に扱われるために、重要なデータが多く的重要でないデータに隠される（例えば、「被害の大きい事故」数例と「被害のほとんどない事故」数百例を同じデータとして扱った場合、人間はまず、「被害の大きい事故」かどうかをチェックするのに対し、統計的手法では事故例の多い「被害のほとんどない事故」の方からチェックするようになる）

などの弱点がある。

しかし、知識工学においては、計算機の発達につれて次々によりよい推論機構が作られている反面、知識ベースはいまだに試行錯誤の域を出ていない。MYCIN¹³⁾において情報の確からしさを表わす確信度（certainty factor, 以後 CF と略す）が導入され、知識表現は一挙に実用性を帯びた。しかし、逆に理論的裏付けをもたない単なる経験的重みとしての CF の設定方法は、特に専門家の頭を悩ましていた。こうした試行錯誤段階にある知識ベース作成においては、統計的手法の適用可能なデータが存在する場合、あるいは作成できる場合は、積極的に統計的手法によってデータ分析を行い、統計的手法による分析結果と専門家の知識、診断過程を比較していくことが大切であると考えられる。統計的分析結果をたたき台として、専門家の知識、診断過程を知識ベースに反映させていけば、知識ベース作成の合理化（時間短縮、定量的評価）が図れると考える。

5.2 因子分析結果と知識ベース

知識ベース作成には、診断ルールと診断手順の作成が必要である。これらに対して、因子分析結果は以下の点で利用可能と考える。

- ① 主因子情報を診断手順、質問内容に利用する。

これは、固有値の大きい主因子の順に質問していく方法である。本報告では、Fig. 3.1 を使い、

第1事故因子, すなわち原子炉スクラムを伴う事故かどうかを最初にチェックする。このとき, Fig. 3.1-(1)の右半分の第1事故因子に相関の高いアラーム群が発生したかどうかを質問に使う。これらのアラーム群が発生した場合は, 第1事故因子に相関の高い事故と診断し, それらの事故の中でさらにどの事故かの判別を行っていく。前述のアラーム群が発生しなかった場合は, 第2事故因子に関する事故かどうかをチェックする。以下, 第n事故因子までチェックしていく。つまり, これらの主要事故因子を第1レベルの Taxonomy (事故分類) として使用し, その診断に主要事故因子と相関の高いアラーム群を質問項目として用いていく考えである。

こうした診断手順は, 問答形式による診断システムで特に利用可能である。診断システムへの入力が一括して行われる原子炉事故診断システムにおいても, 適用ルールの階層化, 質問内容 (ルールの条件部) の設定等に有効利用できる。

② 主因子情報を作成しておくべきルールの検出に利用する。

既存知識においては, 大きく異った事象と考えられているものが, 観測データでは, 非常に近い振舞いをすることがある。このようなときに, 観測データのみを使う診断システムでは間違いが生じやすい。

しかし, 因子分析結果においては, それらの事象は同じ主因子に相関の高い事象としてまとめられていることが多い。このことを利用して, 診断において間違いやすいものをあらかじめ見つけておき, 診断ルール作成に反映させることができる。これは, 同じ主因子に対して相関の高い事象の中に, 既存知識において異質な事象が混在する場合, それらの事象を明確に判別する診断ルールを必ず作成しておくことを意味する。

上記のことは, 相関係数の高いものを個別にチェックしていても可能である。しかし, 事象が多くなると個別にチェックするのは大変である。また, 相関係数の高いものはほとんどが既存知識においても類似の事象である。この点, 因子分析では, 類似の事象は同じ主因子に相関の高いものとして集められているので, その中で大きく異なる事象を見つけ出すだけでよい。この作業には, Fig. 3.1の左半分の図が有用である。

③ 証拠の独立性に主因子情報を利用する。

原研で開発している原子炉事故診断システムは, MYCIN¹³⁾流の確信度計算方式を採用している。MYCINでは, 仮説Aに関して, 独立な証拠XとYが得られたとき, 証拠Xによる仮説Aの確信度 $CF[A, X]$ と証拠Yによる仮説Aの確信度 $CF[A, Y]$ の結合関数は以下に示される。

$$CF[A, (X, Y)] = \begin{cases} 1 & \text{if } CF[A, X]=1 \text{ or } CF[A, Y]=1 \\ CF[A, X]+CF[A, Y]-CF[A, X]CF[A, Y] & \\ & \text{if } CF[A, X]>0 \text{ and } CF[A, Y]>0 \\ CF[A, X]+CF[A, Y] & \\ & \text{if } CF[A, X]CF[A, Y]\leq 0, \\ & CF[A, X]\neq \pm 1 \text{ and } CF[A, Y]\neq \pm 1 \\ CF[A, X]+CF[A, Y]+CF[A, X]CF[A, Y] & \\ & \text{if } CF[A, X]<0 \text{ and } CF[A, Y]<0 \\ -1 & \text{if } CF[A, X]=-1 \text{ or } CF[A, Y]=-1 \end{cases} \quad (5.1)$$

これは, 証拠Xから仮説Aを導くルールと証拠Yから仮説Aを導くルールが独立でないならば,

MYCIN流の確信度計算方式は成立しないことを意味する。

しかし、統計的手法を用いずに、専門家が独立なルール群を作成することは至難のわざである。独立であると考えた証拠が意外に相関の高いものであることも多い。

この点、因子分析で得られる各主因子は互いに無相関であることが保証されている。このため、各主因子に相関の高い項目 (Fig. 3.1の右半分の図の項目) を質問に用いれば、近似的に証拠の独立性が保証できる。

④ 主因子と模擬事故項目、主因子とアラーム項目のそれぞれの相関係数を確信度情報として利用する。

例えば、Fig. 3.1-(1)を利用して、

No.36 : ドレンへの自動給油停止アラーム (0.9215)

No.2 : タービントリップ・アラーム (0.9023)

No.3 : 発電機トリップ・アラーム (0.8969)

がすべて発生した場合、確信度 CF は、

$$CF = 1.0 - (1.0 - 0.9215)(1.0 - 0.9023)(1.0 - 0.8969) = 0.9992$$

で第1事故因子系の事故 (原子炉スクラムを伴う事故) と診断する。そして、これらのアラームが発生した場合、原子炉スクラムを伴う事故の内容として、Fig. 3.1-(1)の左半分の図の相関係数を表示する。この場合、最初の確信度計算方式は、MYCINの確信度計算方式 (結合関数)と同じである。

2つのアラーム (例えば、No.36とNo.2) が発生し、1つのアラーム (No.3) が発生しなかった場合は、確信度 CF は、

$$CF = \{ 1.0 - (1.0 - 0.9215)(1.0 - 0.9023) \} - 0.8969 = 0.0954$$

で第1事故因子系の事故と診断する。この場合も MYCINの確信度計算方式と同じである。以下、1つのアラームが発生した場合、すべてのアラームが発生しなかった場合も同様に MYCINの確信度計算方式と同じように CF を計算する。

5.3 クラスタ分析結果と知識ベース

ここでは、クラスタ分析による模擬事故分類と専門家によって作成された知識ベースにおける事故分類を対比させる。クラスタ分析結果は、アラーム情報から平均隣法によって模擬事故を分類した Fig. 4.3を用いる。専門家によって作成された知識ベースの事故分類は、Fig. 5.2に示す。

Fig. 5.2は、原子炉事故を大、中、小分類の3階層に分けている。大分類は、原子炉の系統的分類である。1次冷却系、加圧器系、制御棒駆動系、化学体積制御系、主蒸気系、タービン発電機系、復水器系、蒸気発生器給水系の8つに分類されている。各名称につづく英字名は略称、数値は事故仮説における事故発生確率である。1次冷却系の故障は原子炉事故中0.18の割合、主冷却ポンプの故障は1次冷却系の故障中0.60の割合、…となっている。

原子炉事故 (NRA)

1次冷却系の故障 (FPCS) 0.18

主冷却ポンプの故障 (FPCSPM) 0.60

主冷却ポンプ1台停止 (RCSPL1) 0.30

主冷却ポンプ2台停止 (RCSPL2) 0.20

主冷却ポンプ全数停止 (RCSPLA) 0.20

主冷却ポンプ1台軸固着 (RCSPSL) 0.20

主冷却ループからの漏洩 (FPCS LP) 0.30

蒸気発生器伝熱管破損 (RCSUTR) 0.25

主冷却管小破断 (RCSLSL) 0.30

加圧器逃し弁開固着 (PRFVSO) 0.30

加圧器系の故障 (FPRZ) 0.12

加圧器圧力制御系の故障 (FPRPRC) 0.50

加圧器スプレイ弁誤開 (PSPVO1) 0.20

加圧器スプレイ弁誤閉 (PSPVCS) 0.20

加圧器圧力制御系高誤検知 (CPRPFH) 0.25

加圧器圧力制御系低誤検知 (CPRPFL) 0.25

加圧器ヒータの故障 (FPRHTR) 0.30

加圧器予備ヒータ誤入 (PHTBFN) 0.30

加圧器定常ヒータ誤切 (PHTPFF) 0.30

制御棒駆動系の故障 (FCRD) 0.15

制御棒制御系の故障 (FCRD CS) 0.45

制御棒連続挿入 (CRDUCI) 0.20

制御棒連続引抜 (CRDUCW) 0.20

制御棒動作不可 (CRDMDF) 0.20

原子炉自動停止不可 (CRDRTF) 0.20

低温側温度検出器高誤検知 (CLATEH) 0.20

制御棒駆動機構の故障 (FCRDDM) 0.30

制御棒1本落下 (CRDDR1) 0.15

制御棒1本飛出 (CRDEJ1) 0.15

制御棒引抜誤信号 (CRDWDF) 0.20

制御棒最大速度駆動 (CRDMAS) 0.20

制御棒最低速度駆動 (CRDMIS) 0.20

Fig.5.2 Classification of reactor accidents in the knowledge base made by an expert.

化学体積制御系の故障 (FCVCS) 0.09

- 体積制御タンク水位制御系故障 (FCVCLC) 0.40
 - 体積制御タンク水位誤高 (CVTLFH) 0.50
 - 体積制御タンク水位誤低 (CVTLFL) 0.50
- 充填系の故障 (FCVCCG) 0.40
 - 充填流量喪失 (CHAGFL) 0.30

主蒸気系の故障 (FSTM) 0.12

- 主蒸気圧力制御系の故障 (FSTMPC) 0.40
 - 主蒸気ヘッダー圧高誤検知 (CSHPFH) 0.30
 - 主蒸気ヘッダー圧低誤検知 (CSHPFL) 0.30
 - 自動圧力制御不可 (CEHCAL) 0.30
- 主蒸気管からの漏洩 (FSTMLL) 0.50
 - 大気放出弁からの漏洩 (SDVLA) 0.10
 - 主蒸気管破断 (SGSLL) 0.10

タービン発電機系の故障 (FTRG) 0.08

- タービン制御系の故障 (FTURCS) 0.60
 - タービン制御弁誤開 (TGVFO1) 0.30
 - タービン制御弁誤閉 (TGVFC1) 0.30
 - タービン自動ランバック不可 (TURRBF) 0.20
 - タービントリップ (TURTRP) 0.20
- 発電機系の故障 (FGENES) 0.20
 - 発電機トリップ (GENTRP) 0.20

復水器系の故障 (FCOND) 0.09

- 復水器循環水系の故障 (FCOND CW) 0.50
 - 復水器循環水部分喪失 (CCWPL) 0.50
 - 復水器循環水全喪失 (CCWTL) 0.40

蒸気発生器給水系の故障 (FSGFW) 0.12

- 蒸気発生器水位制御系の故障 (FSGLCN) 0.50
 - 蒸気発生器水位制御誤高 (CSGLFH) 0.40
 - 蒸気発生器水位制御誤低 (CSGLFL) 0.40
- 蒸気発生器給水管の故障 (FSGFWL) 0.40
 - 給水流量部分喪失 (FWFPL) 0.40
 - 給水流量全喪失 (FWFTL) 0.20
 - 高圧給水加熱器ポンプ停止 (HPHDPL) 0.20

Fig. 5.2 (cont.)

制御棒駆動系の事故群を例にとって比較する。専門家の知識ベースでは1つの大分類に集められているのに対し、クラスター分析結果 (Fig. 5.2では12~20, 31の模擬事故が制御棒駆動系の事故である) では全体に分散している。これは、制御棒駆動系の模擬事故に対するアラームの発生パターンは必ずしも同じでなく、他系統の模擬事故のアラーム発生パターンに近いものも多いことを意味している。クラスター分析結果は、模擬事故をアラーム全体の発生パターンによって分類、表示している点において有用である。専門家の知識ベースにおける事故分類がクラスター分析の結果とかなり異っていることは、専門家の診断ルールにおいては、アラーム全体を対象とせず、制御棒駆動系の事故の場合、制御棒に関するアラームのみを使用していることが考えられる。実際、制御棒駆動系の故障 (FCRD) を診断するルールは、下記の5つである。

F (SPRFXH, T) → H (FCRD, 0.30)

F (ACRDWIL, #, T) → H (FCRD, 0.30)

F (ATEAVRF, #, T) → H (FCRD, 0.05)

F (ACRDSTOP, #, T) → H (FCRD, 0.25)

F (ACRDBTM, #, T) → H (FCRD, 0.05)

原子炉事故診断システムにおいては、アラーム、ポンプのON・OFF、バルブの開閉、計器類の数値データなどの情報から、まず事故がどの系統のものかを同定する。そして、確信度が0.1以上になった系統については、各系統の中分類、小分類のどの事故かを同定していく。上記FHルールで先頭名がAのものがアラーム情報である。ひとつのアラームで確信度0.1以上を与えるものは、ACPWIL (制御棒引抜限界) とACRDSTOP (制御棒停止) アラームである。専門家の知識ベースでは、特定のアラームのみを着目していることがわかる。

しかし、模擬事故に対するアラーム発生データ (Table 2.5)を見ると、制御棒引抜限界 (No.8) と制御棒停止 (No.6) のアラームが発生したのは、模擬事故5, 6, 15, 18, 19, 22, 23, 28, 33, 36で、制御棒駆動系の模擬事故12~20, 31とかなり異っている。これは、制御棒駆動系以外の模擬事故でも制御棒引抜限界や制御棒停止のアラームが発生し、制御棒駆動系の模擬事故でもこれらのアラームのいずれも発生しないものが存在したことを示す。一般に、専門家の知識、経験に頼ると、作り忘れる診断ルールが生じやすく、すべての事故に対してうまく推論できる診断ルール (全体) を作成するにはかなりの試行錯誤が必要となる。こうした面に統計的手法の利用価値は存在すると考える。

似ていないものからクラスタをつなぐ、最近離法、最遠離法、平均離法という本報告で試みたクラスター分析手法からは、有用な情報は得られなかった。

6. お わ り に

PWR プラントシミュレータの事故解析データのうち、模擬事故時のアラーム発生データに対して、因子分析、クラスター分析を行った。また、これらの結果を診断システムの知識ベース作成に利用する方法について検討した。

本報告は、知識ベース作成時における収集データの分析法、結果の利用法を提案したもので、本報告の内容がそのまま原子炉事故診断システムに利用できるものではない。原研で作成している原子炉事故診断システムの知識ベースは、Table 2.1, Fig. 2.1 に示した時系列の事故解析データをもとに、さらに専門家の知識、経験の上に作成されたもので本報告で使用した模擬事故時のアラーム発生データに比べて非常に多くのデータが参考にされている。しかし、試行錯誤的に作成されているので、定量的裏付けがないことや診断ルールが完備していない部分も残っている。実用的な知識ベースを作成するためには、知識ベース作成方法の研究も不可欠である。

今後の課題としては、(i) 時系列の事故解析データに対する多変量解析、(ii) 商用炉の事故データの収集、分析、(iii) 多変量解析結果と診断ルール、確信度計算方法との関係についてのさらに詳しい分析などが残されている。

謝 辞

本研究の実行に際し、計算センター室長代理の浅井清氏には仕事の環境設定に終始助力頂いた。また、計算センターの石黒美佐子氏には本報告書の検討頂いた。ここに、深甚なる謝意を表す。

なお、本報告で使用したクラスター分析プログラムや各種出力図の作成は、計算センターの業務委託においてなされたことを付記する。

6. お わ り に

PWR プラントシミュレータの事故解析データのうち、模擬事故時のアラーム発生データに対して、因子分析、クラスター分析を行った。また、これらの結果を診断システムの知識ベース作成に利用する方法について検討した。

本報告は、知識ベース作成時における収集データの分析法、結果の利用法を提案したもので、本報告の内容がそのまま原子炉事故診断システムに利用できるものではない。原研で作成している原子炉事故診断システムの知識ベースは、Table 2.1, Fig. 2.1 に示した時系列の事故解析データをもとに、さらに専門家の知識、経験の上に作成されたもので本報告で使用した模擬事故時のアラーム発生データに比べて非常に多くのデータが参考にされている。しかし、試行錯誤的に作成されているので、定量的裏付けがないことや診断ルールが完備していない部分も残っている。実用的な知識ベースを作成するためには、知識ベース作成方法の研究も不可欠である。

今後の課題としては、(i) 時系列の事故解析データに対する多変量解析、(ii) 商用炉の事故データの収集、分析、(iii) 多変量解析結果と診断ルール、確信度計算方法との関係についてのさらに詳しい分析などが残されている。

謝 辞

本研究の実行に際し、計算センター室長代理の浅井清氏には仕事の環境設定に終始助力頂いた。また、計算センターの石黒美佐子氏には本報告書の検討頂いた。ここに、深甚なる謝意を表す。

なお、本報告で使用したクラスター分析プログラムや各種出力図の作成は、計算センターの業務委託においてなされたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 原子力安全性研究の現状 (昭和59年), 日本原子力研究所 (1984).
- 2) Weiss, S. M and Kulikowski, C. A. : "EXPERT:A System for Development Consultation Models," CBM-TR-97 (1979).
- 3) 横林正雄ほか: 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, JAERI-M 84-205 (1984.1.1).
- 4) 村上喜光ほか: 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), 日本原子力研究所, JAERI-M 83-048 (1983.3).
- 5) 内藤 彰ほか: 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), 日本原子力研究所, JAERI-M 83-081 (1983.6).
- 6) 田中幸吉編: 知識工学, 朝倉書店 (1984.1).
- 7) 奥野忠一ほか: 多変量解析法, 日科技連 (1973.8).
- 8) 鬼沢武久ほか: 歯科診断におけるあいまい推論の利用, 計測自動制御論文誌, Vol. 18, No. 7, pp. 46 - pp. 52 (1982.7).
- 9) FACOM OS M/F4 ANALYST解説 (統計データ処理パッケージ), 富士通マニュアル 70AR-0800-1, 富士通 (1981.1.1).
- 10) FACOM OS M/F4 ANALYST/ANALYZE コマンド説明書 (統計データ処理パッケージ/統計解析サブシステム), 富士通マニュアル 70AR-0823-1, 富士通 (1982.1).
- 11) FACOM OS M CLUSTER 解説書, 富士通マニュアル 70AR-0770-1, 富士通 (1977.2).
- 12) 森島啓子: 生物学におけるクラスター分析の話題, 数理科学, 1979年4月号.
- 13) Shortliffe : Computer Based Medical Consultations : MYCIN, American Elsevier , New York (1976).
- 14) 小山照夫, 開原成允: 時間経過の概念を含む汎用医療コンサルテーションシステム, 情報処理論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 414 - pp. 420 (1982, July).

付録 模擬事故データの相関行列

本報告で用いた Table 2.4の模擬事故データの相関行列を示す。Fig. A. 1が模擬事故39項目の相関行列，Fig. A. 2がアラーム36項目の相関行列である。3章の因子分析，4章のクラスター分析は，これらの相関行列をもとに分析されている。

***** 相関行列 *****

	A(1)	A(2)	A(3)	A(4)	A(5)	A(6)	A(7)	A(8)	A(9)
A(1)	1.000000								
A(2)	0.831522	1.000000							
A(3)	0.604743	0.769231	1.000000						
A(4)	0.665714	0.718132	0.831522	1.000000					
A(5)	0.507093	0.559017	0.447214	0.507093	1.000000				
A(6)	0.067857	0.094491	-0.188982	-0.210714	0.316933	1.000000			
A(7)	0.481224	0.644658	0.765532	0.718791	0.558581	-0.144672	1.000000		
A(8)	0.068351	0.082199	-0.164399	-0.173984	0.055141	0.194178	-0.145724	1.000000	
A(9)	0.420120	0.585018	0.475327	0.420120	0.474201	0.127833	0.598115	0.264485	1.000000
A(10)	-0.252982	-0.239046	-0.059761	-0.252982	-0.093541	0.062116	-0.024079	-0.078598	-0.126735
A(11)	-0.121395	-0.114708	-0.114708	-0.121395	0.205196	-0.075872	-0.101678	-0.037716	-0.142601
A(12)	0.275570	0.478091	0.478091	0.451754	0.427618	0.062116	0.351547	-0.078598	0.384577
A(13)	0.659244	0.707107	0.589256	0.543431	0.500694	-0.022272	0.693260	0.096873	0.646360
A(14)	0.352566	0.216930	-0.108465	-0.127088	0.169775	0.620064	-0.240360	0.258558	-0.027761
A(15)	-0.121395	-0.114708	-0.114708	-0.121395	0.205196	0.364844	-0.101678	-0.037716	-0.142601
A(16)	0.185164	0.204124	0.204124	0.185164	0.167360	0.366470	0.032898	0.269136	0.134343
A(17)	0.659244	0.824958	0.824958	0.775058	0.614887	-0.022272	0.816717	0.096873	0.646360
A(18)	-0.015430	-0.000000	0.204124	0.185164	0.167360	0.366470	0.032898	-0.067116	-0.059708
A(19)	0.185164	0.204124	-0.000000	-0.015430	0.365148	0.617213	-0.180937	0.369136	0.134343
A(20)	0.344429	0.519701	0.519701	0.625000	0.316933	-0.044643	0.449244	-0.078598	0.397318
A(21)	0.185164	0.408248	0.408248	0.385758	0.365148	0.115727	0.246732	-0.067116	0.328395
A(22)	0.275570	0.298807	0.298807	0.275570	0.253898	0.062116	0.163734	-0.078598	0.214139
A(23)	0.298144	0.368605	0.368605	0.298144	0.123634	-0.153251	0.522773	-0.278752	0.312679
A(24)	0.554286	0.718132	0.718132	0.665714	0.397222	-0.071429	0.718791	-0.173984	0.420120
A(25)	0.427618	0.471404	0.589256	0.543431	0.272307	-0.167038	0.569803	-0.154974	0.310253
A(26)	0.400008	0.765532	0.866405	0.837574	0.558581	-0.144672	0.873377	-0.145724	0.598115
A(27)	0.481224	0.644658	0.765532	0.718791	0.441459	-0.144672	0.746753	-0.145724	0.483206
A(28)	0.185164	0.204124	0.204124	0.185164	0.167360	-0.135015	0.246732	-0.067116	0.134343
A(29)	0.491354	0.653846	0.769231	0.718132	0.447214	-0.188982	0.765532	0.082199	0.585018
A(30)	0.507093	0.670820	0.559017	0.507093	0.566667	0.042258	0.675703	0.294086	0.686773
A(31)	0.216777	0.229416	0.229416	0.216777	0.205196	0.364844	-0.101678	-0.037716	0.184542
A(32)	-0.015430	-0.000000	-0.204124	-0.216025	0.167360	0.366470	-0.180937	0.269136	-0.059708
A(33)	-0.015430	-0.000000	-0.000000	-0.015430	0.167360	0.366470	-0.180937	-0.067116	-0.059708
A(34)	0.351324	0.558199	-0.000000	-0.029277	0.067357	0.219577	-0.072822	0.148571	0.132170
A(35)	0.491354	0.653846	0.769231	0.718132	0.447214	-0.188982	0.765532	-0.164399	0.475327
A(36)	0.491354	0.653846	0.769231	0.718132	0.447214	-0.188982	0.765532	-0.164399	0.475327

	A(10)	A(11)	A(12)	A(13)	A(14)	A(15)	A(16)	A(17)	A(18)
A(10)	1.000000								
A(11)	-0.054841	1.000000							
A(12)	-0.114286	-0.054841	1.000000						
A(13)	-0.225374	-0.108148	0.323976	1.000000					
A(14)	-0.129441	-0.062209	0.123159	0.076696	1.000000				
A(15)	-0.054841	-0.026316	-0.054841	-0.108148	-0.062209	1.000000			
A(16)	-0.097590	-0.046829	0.219577	0.016038	0.464948	-0.046829	1.000000		
A(17)	-0.225374	-0.108148	0.507093	0.759259	0.076696	-0.108148	0.433013	1.000000	
A(18)	-0.097590	-0.046829	0.219577	-0.192450	0.177123	0.561951	0.638889	0.224525	1.000000
A(19)	-0.097590	-0.046829	0.219577	0.016038	0.464948	0.561951	0.638889	0.224525	0.638889
A(20)	-0.158114	-0.075872	0.282346	0.412028	0.020498	-0.075872	0.115727	0.556794	0.115727
A(21)	-0.097590	-0.046829	0.536745	0.224525	0.177123	-0.046829	0.277778	0.433013	0.277778
A(22)	-0.114286	-0.054841	0.442857	0.140859	0.123159	-0.054841	0.219577	0.323976	0.219577
A(23)	-0.061679	-0.194497	0.281963	0.330148	0.007996	-0.194497	0.045145	0.443093	0.045145
A(24)	-0.225374	-0.121395	0.451754	0.343431	0.032797	-0.121395	0.185164	0.173984	0.185164
A(25)	-0.225374	-0.108148	0.323976	0.398148	-0.089479	-0.108148	0.224525	0.638889	0.224525
A(26)	-0.211891	-0.101678	0.539360	0.493260	-0.049923	-0.101678	0.246732	0.901175	0.246732
A(27)	-0.211891	-0.101678	0.351547	0.569803	-0.049923	-0.101678	0.246732	0.816717	0.246732
A(28)	-0.097590	-0.046829	0.536745	0.224525	-0.110702	-0.046829	-0.083333	0.224525	-0.083333
A(29)	-0.239046	-0.114708	0.478091	0.589256	-0.108465	-0.114708	0.204124	0.824958	0.204124
A(30)	0.253898	-0.128247	0.427618	0.614887	0.012127	-0.128247	0.167360	0.729081	-0.030429
A(31)	-0.054841	-0.026316	0.479857	-0.108148	0.423022	-0.026316	0.561951	0.243332	0.561951
A(32)	0.219577	-0.046829	-0.097590	0.016038	0.464948	-0.046829	0.277778	0.016038	-0.083333
A(33)	-0.097590	-0.046829	0.219577	-0.192450	0.177123	0.561951	0.277778	0.016038	0.638889
A(34)	-0.185164	-0.088852	0.015430	0.162288	0.518104	-0.088852	0.298660	0.162288	0.070273
A(35)	-0.239046	-0.114708	0.478091	0.589256	-0.108465	-0.114708	0.204124	0.824958	0.204124
A(36)	-0.239046	-0.114708	0.478091	0.589256	-0.108465	-0.114708	0.204124	0.824958	0.204124

	A(19)	A(20)	A(21)	A(22)	A(23)	A(24)	A(25)	A(26)	A(27)
A(19)	1.000000								
A(20)	0.115727	1.000000							
A(21)	0.277778	0.617213	1.000000						
A(22)	0.219577	0.282346	0.219577	1.000000					
A(23)	-0.150482	0.294258	0.240772	0.281963	1.000000				
A(24)	-0.015430	0.485714	0.385758	0.275570	0.624152	1.000000			
A(25)	0.016038	0.267261	0.016038	0.323976	0.463093	0.837574	1.000000		
A(26)	0.032898	0.597723	0.460566	0.351547	0.522773	0.718791	0.569803	1.000000	
A(27)	0.032898	0.597723	0.460566	0.163734	0.406931	0.185164	0.224525	0.246732	1.000000
A(28)	-0.083333	-0.135015	-0.083333	0.536745	0.240772	0.718132	0.589256	0.886405	0.765532
A(29)	0.000000	0.519701	0.408248	0.298807	0.479186	0.507093	0.386501	0.675703	0.558581
A(30)	0.167360	0.454270	0.365148	0.253898	0.337932	0.507093	0.243332	0.258816	0.258816
A(31)	0.561951	0.364844	0.561951	0.479857	0.135302	0.216777	-0.192450	-0.180937	-0.180937
A(32)	0.277778	-0.135015	-0.083333	-0.097590	-0.150482	-0.216025	-0.015430	0.016038	0.032898
A(33)	0.638889	0.115727	0.277778	0.219577	-0.150482	-0.015430	0.016038	0.062116	0.062116
A(34)	0.298660	0.060994	0.070273	0.216025	0.333107	0.351324	0.294147	0.886405	0.765532
A(35)	-0.000000	0.519701	0.408248	0.298807	0.479186	0.718132	0.589256	0.886405	0.765532
A(36)	-0.000000	0.519701	0.408248	0.478091	0.589768	0.831522	0.707107	0.886405	0.765532

	A(28)	A(29)	A(30)	A(31)	A(32)	A(33)	A(34)	A(35)	A(36)
A(28)	1.000000								
A(29)	0.204124	1.000000							
A(30)	0.167360	0.670820	1.000000						
A(31)	-0.046829	0.229416	0.205196	1.000000					
A(32)	-0.083333	-0.204124	0.167360	-0.046829	1.000000				
A(33)	-0.083333	-0.000000	-0.030429	0.561951	-0.083333	1.000000			
A(34)	-0.158114	-0.000000	0.067357	0.296174	0.070273	0.070273	1.000000		
A(35)	0.204124	0.769231	0.559017	0.229416	-0.204124	0.000000	-0.000000	1.000000	
A(36)	0.408248	0.769231	0.559017	0.229416	-0.204124	-0.000000	0.129099	0.769231	1.000000

Fig.A.1 Correlation matrix of simulated accidents.

	A(1)	A(2)	A(3)	A(4)	A(5)	A(6)	A(7)	A(8)	A(9)
A(1)	1.000000								
A(2)	0.945905	1.000000							
A(3)	0.834622	0.888889	1.000000						
A(4)	0.229416	0.242536	0.242536	1.000000					
A(5)	0.159887	0.169031	0.169031	0.696932	1.000000				
A(6)	-0.019672	0.000000	0.000000	0.300122	0.478091	1.000000			
A(7)	0.833602	0.894427	0.782624	0.216930	0.151186	0.138330	1.000000		
A(8)	-0.323487	-0.298142	-0.447214	-0.108465	-0.075593	-0.158114	-0.330000	1.000000	
A(9)	0.526298	0.569803	0.569803	0.055279	0.211891	0.080582	0.484165	-0.203859	1.000000
A(10)	0.069750	-0.000000	-0.113961	0.055279	-0.134840	-0.282038	-0.089188	0.101929	-0.402597
A(11)	0.229416	0.242536	0.242536	0.470588	0.696932	0.300122	0.216930	-0.108465	0.304034
A(12)	0.183547	0.210559	0.070186	0.493657	0.344046	0.049629	0.156941	0.156941	-0.103980
A(13)	0.157378	0.176777	0.176777	0.300122	-0.059761	-0.125000	0.138330	-0.158114	-0.100728
A(14)	0.159887	0.169031	0.169031	0.696932	-0.028571	-0.059761	0.151186	-0.075593	-0.134840
A(15)	0.334428	0.353553	0.353553	-0.085749	-0.059761	-0.125000	0.316228	-0.158114	0.080582
A(16)	-0.178897	-0.169031	-0.169031	-0.040996	-0.028571	-0.059761	-0.188982	0.377964	-0.134840
A(17)	-0.196722	-0.176777	-0.176777	-0.059761	-0.059761	-0.125000	-0.217407	-0.316228	-0.282038
A(18)	-0.013495	0.000000	0.000000	-0.058824	-0.040996	-0.085749	-0.027116	-0.108465	-0.193476
A(19)	0.083883	0.100504	0.100504	0.365636	-0.050965	-0.106600	0.067420	0.134840	-0.240523
A(20)	-0.019672	0.000000	0.000000	0.300122	0.478091	0.156250	-0.039528	-0.158114	-0.100728
A(21)	0.297416	0.267261	0.267261	0.129641	0.090351	0.194225	0.194225	0.059761	0.289344
A(22)	-0.013495	-0.000000	0.242536	-0.058824	-0.040996	-0.085749	-0.027116	-0.108465	0.055279
A(23)	0.183547	0.070186	0.070186	0.187249	0.344046	0.049629	0.015694	-0.031388	-0.103980
A(24)	0.893487	0.845154	0.845154	0.204980	0.142857	0.119523	0.718132	-0.377964	-0.443046
A(25)	0.285201	0.301511	0.100504	-0.073127	-0.050965	-0.106600	0.289680	0.134840	-0.034360
A(26)	0.334428	0.176777	0.176777	0.300122	-0.078091	0.156250	0.138330	-0.158114	0.261892
A(27)	0.159887	0.169031	0.169031	-0.040996	-0.028571	-0.059761	0.151186	-0.075593	-0.11891
A(28)	0.379885	0.240966	0.240966	0.253252	0.420883	0.369175	0.197566	-0.179605	0.338681
A(29)	0.665635	0.723339	0.723339	0.229416	0.159887	-0.019672	0.721625	-0.323487	0.412161
A(30)	0.218992	0.080322	0.080322	0.253252	0.420883	0.113592	0.035921	-0.035921	-0.155610
A(31)	0.229416	0.242536	0.242536	0.470588	0.696932	0.300122	0.216930	-0.108465	0.304034
A(32)	0.777090	0.834622	0.834622	0.229416	0.159887	-0.019672	0.721625	-0.323487	0.412161
A(33)	0.285201	0.100504	0.100504	0.800400	0.560612	0.213201	0.067420	-0.134840	-0.034360
A(34)	0.159887	0.169031	0.169031	-0.040996	-0.028571	-0.059761	0.151186	-0.075593	-0.11891
A(35)	0.721625	0.782624	0.670820	0.216930	0.151186	0.316228	0.887300	-0.350000	0.369494
A(36)	0.888545	0.945905	0.945905	0.229416	0.159887	-0.019672	0.833602	-0.323487	0.526298
A(37)	0.159887	0.169031	0.169031	-0.040996	-0.028571	-0.059761	0.151186	-0.075593	-0.11891
A(38)	-0.013495	-0.000000	-0.000000	-0.058824	-0.040996	-0.085749	-0.027116	-0.108465	0.055279
A(39)	-0.013495	-0.000000	-0.242536	-0.058824	-0.040996	-0.085749	-0.027116	0.216930	-0.193476
	A(10)	A(11)	A(12)	A(13)	A(14)				
A(10)	1.000000								
A(11)	-0.193476	1.000000							
A(12)	0.183965	0.187249	1.000000						
A(13)	0.261892	0.300122	0.272960	1.000000					
A(14)	0.211891	-0.040996	0.344046	0.478091	1.000000				
A(15)	0.080582	-0.085749	-0.173702	-0.125000	-0.059761	1.000000			
A(16)	-0.134840	-0.040996	-0.083045	-0.059761	-0.028571	-0.059761	1.000000		
A(17)	-0.443203	-0.085749	0.272960	-0.125000	-0.059761	-0.125000	-0.059761	1.000000	
A(18)	0.055279	-0.058824	0.493657	0.300122	-0.040996	-0.085749	-0.040996	-0.085749	1.000000
A(19)	0.377964	-0.073127	0.359753	0.213201	0.560612	-0.106600	-0.050965	0.213201	-0.073127
A(20)	0.080582	0.300122	0.496292	0.156250	-0.059761	-0.125000	-0.050965	-0.050965	0.156250
A(21)	0.015229	0.129641	-0.075032	-0.023623	0.090351	0.188982	0.090351	-0.023623	-0.162051
A(22)	-0.193476	-0.058824	-0.119159	-0.085749	-0.040996	-0.040996	0.300122	-0.040996	-0.058824
A(23)	0.327937	0.187249	0.113500	-0.175023	-0.083045	0.272960	-0.083045	0.272960	-0.119159
A(24)	-0.019672	0.204980	0.130500	-0.119523	0.142857	0.298807	-0.200000	-0.239046	-0.040996
A(25)	-0.171802	-0.073127	0.105810	-0.106600	-0.050965	0.533002	-0.050965	0.213201	-0.073127
A(26)	-0.100728	0.300122	0.049629	-0.125000	-0.059761	-0.125000	-0.059761	-0.125000	-0.085749
A(27)	-0.134840	-0.040996	-0.083045	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.040996
A(28)	-0.155610	0.253252	0.005637	-0.141990	-0.067884	-0.141990	-0.067884	-0.141990	-0.097405
A(29)	-0.158523	0.229416	0.183547	0.157378	0.159887	0.157378	-0.178697	-0.196722	-0.013495
A(30)	-0.338681	0.253252	0.005637	-0.141990	-0.067884	0.113592	-0.067884	0.113592	-0.097405
A(31)	-0.193476	0.470588	0.187249	-0.085749	-0.040996	-0.085749	-0.040996	-0.085749	-0.058824
A(32)	-0.044387	0.229416	0.183547	0.157378	0.159887	0.334428	-0.178697	-0.196722	-0.013495
A(33)	0.171802	0.365636	0.359753	0.213201	0.560612	-0.106600	-0.050965	-0.106600	-0.073127
A(34)	-0.134840	-0.040996	-0.083045	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.040996
A(35)	-0.089188	0.216930	0.156941	0.138330	0.151186	0.316228	-0.188982	-0.217407	-0.027116
A(36)	-0.044387	0.229416	0.183547	0.157378	0.159887	0.334428	-0.178697	-0.196722	-0.013495
A(37)	-0.134840	-0.040996	-0.083045	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.028571	-0.059761	-0.040996
A(38)	-0.193476	-0.058824	0.187249	-0.085749	-0.040996	0.300122	-0.040996	-0.085749	0.470588
A(39)	0.055279	-0.058824	0.187249	-0.085749	-0.040996	-0.085749	-0.040996	0.300122	-0.058824
	A(19)	A(20)	A(21)	A(22)	A(23)	A(24)	A(25)	A(26)	A(27)
A(19)	1.000000								
A(20)	-0.106600	1.000000							
A(21)	-0.080582	-0.236228	1.000000						
A(22)	-0.073127	-0.085749	0.129641	1.000000					
A(23)	0.105810	0.049629	0.262813	-0.119159	1.000000				
A(24)	0.050965	-0.059761	0.361403	0.204980	0.130500	1.000000			
A(25)	-0.090909	-0.106600	0.161165	0.365636	0.106600	0.254824	1.000000		
A(26)	-0.106600	0.156250	0.188982	-0.085749	0.496292	0.298807	-0.106600	1.000000	
A(27)	-0.050965	-0.059761	0.090351	-0.040996	-0.083045	-0.142857	-0.050965	-0.059761	1.000000
A(28)	-0.121090	0.113592	0.214669	-0.097405	0.411537	0.339422	-0.121090	0.880341	-0.067884
A(29)	0.083883	-0.019672	0.297416	-0.097632	-0.097632	0.667764	0.083883	-0.019672	0.159887
A(30)	0.169526	0.113592	0.021467	-0.097405	0.614487	0.176499	0.169526	0.369175	-0.067884
A(31)	-0.073127	0.300122	0.129641	-0.058824	0.187249	0.204980	-0.073127	0.300122	0.696932
A(32)	0.083883	-0.019672	0.297416	-0.097632	0.042958	0.780626	0.285201	-0.019672	0.159887
A(33)	0.272727	0.213201	0.161165	-0.073127	0.359753	0.254824	-0.090909	-0.050965	-0.050965
A(34)	-0.050965	-0.059761	0.090351	-0.040996	-0.083045	0.142857	-0.050965	0.478091	-0.028571
A(35)	0.067420	-0.039528	0.194225	-0.027116	0.015694	0.718132	-0.269680	0.138330	0.151186
A(36)	0.083883	-0.019672	0.297416	-0.097632	0.042958	0.893487	0.285201	0.157378	0.159887
A(37)	-0.050965	-0.059761	0.090351	-0.040996	-0.083045	0.142857	-0.050965	-0.059761	-0.028571
A(38)	-0.073127	0.300122	-0.162051	-0.058824	-0.119159	-0.040996	-0.073127	-0.085749	-0.040996
A(39)	-0.073127	-0.085749	-0.162051	-0.058824	-0.119159	-0.040996	0.365636	-0.085749	-0.040996
	A(28)	A(29)							
A(28)	1.000000								
A(29)	0.058100	1.000000							
A(30)	0.303226	-0.102792	1.000000						
A(31)	0.253252	0.229416	0.253252	1.000000					
A(32)	0.058100	0.888545	0.058100	0.229416	1.000000				
A(33)	0.440141	0.083883	0.440141	0.365636	0.083883	1.000000			
A(34)	0.420883	-0.178697	-0.047884	-0.040996	-0.178697	-0.050965	1.000000		
A(35)	0.197566	0.609649	0.039521	0.216930	0.609649	0.067420	0.151186	1.000000	
A(36)	0.218992	0.777090	0.058100	0.229416	0.888545	0.083883	0.159887	0.721625	1.000000
A(37)	-0.067884	0.159887	-0.067884	-0.040996	0.159887	-0.050965	-0.028571	-0.188982	0.159887
A(38)	-0.097405	-0.013495	-0.097405	-0.058824	-0.013495	-0.073127	-0.040996	-0.027116	-0.013495
A(39)	-0.097405								