

JAERI-Research
2000-020



JP0050381



TITAN：
要素モンテカルロシミュレーション
事故発生頻度解析プログラム

2000年4月

野村 靖・玉置等史・金井 茂*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

T I T A N :

要素モンテカルロシミュレーション事故発生頻度解析プログラム

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部

野村 靖・玉置 等史⁺・金井 茂*

(2000年3月3日受理)

再処理施設のような複雑な機器構成からなるプラントシステムで、機器故障が発生してから事故に至るまで比較的時間余裕のあるような状況では、その間の適切な運転員の対応等によって事故発生を回避することができる。このような状況の複雑な時間的要素を含む解析モデルに対して、柔軟に対応して事故発生頻度を求めることのできる要素モンテカルロ法シミュレーション解析プログラムTITANを開発した。

始めに、要素モンテカルロ法シミュレーションにより事故発生頻度を求めるための基本的方法を示し、次に、事故シーケンスのひな型モデルに対する解析を通して、解析精度、解の収束状況、並列化による計算時間の短縮などTITANコードの基本的な解析性能を確認する。実規模のプラントへの適用性を調べるために、ドイツの再処理プラントモデルの時間余裕のあるレッドオイル爆発事故を対象として、TITANコードにより比較的精度よく事故発生頻度が求められることを示す。さらに、機器故障率等の不確実さ解析に対するTITANコードの有効性を確認し、最後に要素モンテカルロ法コードの特徴を充分に發揮させるための新たな入力方式を提案する。

本報告は、上に述べたような要素モンテカルロ法コードTITANの計算方法、解析性能、実用性、新提案について記すほか、付録には、従来の解析的な方法で時間余裕のある事故発生頻度を求めようとすると多大な時間及び労力を要するのに対して、要素モンテカルロ法では比較的簡単に精度よくこれが可能となることを示し、また、コードの取り扱いマニュアル及びプログラム説明について記し、コード利用の便に供する。

T I T A N :

A Computer Program for Accident Occurrence Frequency Analyses
by Component Monte Carlo Simulation

Yasushi NOMURA, Hitoshi TAMAKI⁺ and Shigeru KANAI*

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 3, 2000)

In a plant system consisting of complex equipments and components for a reprocessing facility, there might be grace time between an initiating event and a resultant serious accident, allowing operating personnel to take remedial actions, thus, terminating the ongoing accident sequence. A component Monte Carlo simulation computer program TITAN has been developed to analyze such a complex reliability model including the grace time without any difficulty to obtain an accident occurrence frequency.

Firstly, basic methods for the component Monte Carlo simulation is introduced to obtain an accident occurrence frequency, and then, the basic performance such as precision, convergence, and parallelization of calculation, is shown through calculation of a prototype accident sequence model. As an example to illustrate applicability to a real scale plant model, a red oil explosion in a German reprocessing plant model is simulated to show that TITAN can give an accident occurrence frequency with relatively good accuracy. Moreover, results of uncertainty analyses by TITAN are rendered to show another performance, and a proposal is made for introducing of a new input-data format to adapt the component Monte Carlo simulation.

The present paper describes the calculational method, performance, applicability to a real scale, and new proposal for the TITAN code. In the Appendixes, a conventional analytical method is shown to avoid complex and laborious calculation to obtain a strict solution of accident occurrence frequency, compared with Monte Carlo method. The user's manual and the list/structure of program are also contained in the Appendixes to facilitate TITAN computer program usage.

Keywords : Accident Occurrence Frequency, Reprocessing Facility, Monte Carlo Method, Grace Time, Computer Code Simulation, Red Oil Explosion

⁺ Department of Safety Research Technical Support

* Fuji Research Institute Corporation

目 次

1. 緒言	1
2. シミュレーションによる基本的方法	4
2.1 機器故障発生のシミュレーション	4
2.2 機器故障修復のシミュレーション	5
2.3 多くの機器から構成されるプラントシステム運転のシミュレーション	6
3. ひな型モデルによる基本的解析機能の確認	16
3.1 事故シーケンスひな形モデルの設定	16
3.2 解析結果と考察	16
4. 機器故障率等の不確実さ解析	25
4.1 不確実さ解析の方法	25
4.2 解析結果と考察	27
5. 複雑なプラントシステムへの適用	37
5.1 シミュレーションのための基本的アルゴリズムの構築	37
5.2 サンプル問題の記述	39
5.3 サンプル問題の解析と結果の考察	40
6. カットセットに依らない入力形式（事象グループ法）	58
6.1 新たな入力形式の提案	58
7. 結論と今後の課題	64
謝辞	65
参考文献	66
付録A 猶予時間のあるシステムの解析的手法による厳密な取り扱い	67
付録B TITANの取り扱いマニュアル	79
付録C プログラム説明書	94

Contents

1.	Introduction	1
2.	Basic Methods of Simulation	4
	2.1 Simulation of Component Failure Occurrence	4
	2.2 Simulation of Component Failure Recovery.....	5
	2.3 Simulation of Component for Plant System Consisting of Various Components	6
3.	Demonstration of Basic Calculation Performance by Applying for Simplified Model	16
	3.1 Set-up of Simplified Model for Accident Sequence.....	16
	3.2 Demonstration Results and Discussions.....	16
4.	Uncertainty Analysis of Component Failure Rates	25
	4.1 Methodology for Uncertainty Analysis	25
	4.2 Analysis Results and Discussions	27
5.	Application for Complex Plant System	37
	5.1 Construction of Basic Algorithm for Simulation	37
	5.2 Set-up of Sample Problem	39
	5.3 Simulation Results and Discussions	40
6.	Input Format without Cut-set Construction (Event Grouping Method)	58
	6.1 Proposition for a New Input Format	58
7.	Concluding Remarks with Deployment Hereafter.....	64
	Acknowledgement	65
	References	66
	Appendix A, Rigorous Treatment by Analytical Method for Plant System	
	Having Grace Time	67
	Appendix B, Operation Manual of TITAN	79
	Appendix C, Description of Program Structure.....	94

List of Figures

- Fig.2.1 Basic flowchart for Component Monte Carlo simulation to obtain system accident mode failure frequency.
- Fig.2.2 Schematic flow of component Monte Carlo simulation.
- Fig.2.3 Histogram of normalized system failure frequency by 10 year interval for a two component system.
- Fig.3.1 Fault tree expression for prototype model of red oil explosion accident sequence.
- Fig.3.2 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with GP=0, MTTR=const.
- Fig.3.3 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with GP=0, MTTR=exponential.
- Fig.3.4 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with GP=10h, MTTR=const.
- Fig.3.5 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with GP=10h, MTTR=exponential.
- Fig.4.1 Component Monte Carlo simulation scheme for reliability data uncertainty analysis.
- Fig.4.2 Distribution of accident occurrence frequency for one component model with grace time 0 and error factor 3.0 assigned.
- Fig.4.3 Distribution of accident occurrence frequency for two components model with grace time 0 and error factor 3.0s assigned.
- Fig.4.4 Distribution of accident occurrence frequency for prototype model with grace time 0 and error factor 2.0s assigned.
- Fig.4.5 Distribution of accident occurrence frequency for prototype model with grace time 10 h and error factor 2.0s assigned.
- Fig.5.1 Final plutonium purification process model of typical reprocessing plant for sample problem.
- Fig.5.2 Fault tree of system anomaly for red oil explosion in PP4AF evaporator.
- Fig.5.3 Fault tree for plutonium purification/oxidation cycle failures resulting in solvent carried by plutonium aqueous stream.
- Fig.5.4 Fault tree for TBP not detected in POBKPA analysis tank.
- Fig.5.5 Fault tree for POBKA/B collection tanks emptied beyond normal.
- Fig.5.6 Fault tree for hot water supply higher than 150 degree centigrade to PP4AF evaporator.
- Fig.5.7 Fault tree for continued operation of PP4AF plutonium evaporator with hot water supply system failed.
- Fig.5.8 Fault tree for failures associated with heat exchangers and steam supply system not isolated.
- Fig.5.9 Diagram of sequential event developed into top event; Explosion.
- Fig.6.1 The HAZOP process flow diagram.

List of Tables

- Table 3.1 List of reliability data for basic events of the simplified model.
- Table 3.2 Calculated results by Monte Carlo method for grace period (GP) of 0 h with histories varied.
- Table 3.3 Calculated results by Monte Carlo method for grace period (GP) of 10 h with histories varied.
- Table 3.4 Calculated results by deterministic and Monte Carlo methods with grace period (GP) varied
- Table 3.5 Effect of parallelization of random sampling with number of PE (Processor Element) varied
for GP = 10 h and 10000 histories.
- Table 4.1 Reliability data for components used for uncertainty analyses.
- Table 4.2 Simulated results for the sequence of one basic event (Type 1).
- Table 4.3 Simulated results for the sequence of two basic events.
- Table 4.4 Simulated results for the sequence of three basic events.
- Table 4.5 Comparison of results of uncertainty analyses by the MC method with those
by the deterministic method.
- Table 5.1 Reliability data for basic events.
- Table 5.2 Write down of minimal cut-sets.
- Table 5.3 Calculated results for mean frequency of accident occurrence (MFAO) with grace time = 0.
- Table 5.4 Once through calculated results of MFAO, MTAO, SD and ratios of SD/MTAO.
- Table 5.5 Calculated results for MFAO (Mean Frequency of Accident Occurrence)
with grace time varied.
- Table 5.6 Reliability data of basic events in Cut-set No.6 for parameter change survey calculation.
- Table 5.7 Combination of parameter change for calculation cases with B042 (1) (type 3).
- Table 5.8 Combination of parameter change for calculation cases with B042 (2) (type 1)
- Table 5.9 Calculated results of parameter change survey for calculation cases with B042 (1) (type 3).
- Table 5.10 Calculated results of parameter change survey for calculation cases with B042 (2) (type 1).

1. 緒 言

技術的システムから構成されるいかななる施設においても、装置あるいは系統の故障が発生する一定の確率が存在し、これらの故障が同時に発生した場合にはシステム全体の運転停止、あるいは火災、爆発などの事故発生に至ることも考えられる。原子炉を含む核燃料サイクル施設では、放射性物質を内蔵し、万一の事故の場合にはこれの放出も考えられることから、システムの信頼性設計が特に重要となる。従って、施設運転の信頼性改善、あるいは安全性向上のためには、適切な方法によって事故の発生確率を評価し、この値を低減するために寄与するシステム要素を合理的に設計管理する必要がある。

通常原子炉の P S A では、炉心損傷事故の発生頻度を求めるには、先ず、安全系統などサブシステムの故障発生の論理関係を表すフォールトツリー (F T と略記) を構築し、これから頂上事象発生にいたる機器故障の最短の繋がり、すなわちミニマルカットセット (M C S と略記) を定量化してサブシステムの故障確率を求める。次に、起因事象毎に後備系や安全設備等の作動の成功と失敗を組み合わせたイベントツリー (E T と略記) を解析することにより、炉心損傷事故の発生頻度が求められる。故障機器の復旧やアクシデントマネジメントのうち、成功確率が事故シーケンスによって異なる猶予時間に依存する運転操作を F T と E T の組み合わせで扱うのは通常困難であり、このことは、F T の定量化に用いられている M C S 法では、炉心損傷頻度を各 M C S に対応する機器故障確率の積の総和とする段階で、機器故障率を互いに独立と仮定して計算を進めるようなアルゴリズムを用いているからである。この場合でも、まったく扱えないのではなくて、事故条件を故障機器の組み合わせから判断して、失敗確率に帰るような F T を組めば可能であるが、それは煩雑過ぎて実用上は不適であろう。一方、信頼性パラメータそのものをランダムサンプリングするモンテカルロ (M C と略記) 法は、時間依存の回復操作を比較的容易に、かつ自然な形で扱うことができるという点で有利と考えられる。

再処理施設では、核分裂性物質及び放射性の核分裂生成物が施設内部に希薄、かつ広範囲に分布して存在し、気体・固体・液体などの物理的性状や化学的性質も処理工程ごとに多種多様である。従って、安全を確保するための多重防護設計や運転制御方式は、炉施設のように一ヵ所に集中しているのではなく、独立した制御系がいくつもの工程にわたり作動し、それぞれに安全防護設計が施されている。また、

運転操作には溶液の移送や試薬の供給など人手によるバッチ操作や、現場でのバルブ操作の占める割合が多く、定常運転中でも何らかの運転員による現場操作が必要とされることが多い。事故の種類も、火災、爆発、臨界、漏洩、冷却能喪失と云うように多種多様であり、これの引き金となる機器故障及び引き続く他の機器故障あるいはヒューマンエラーの生起の事故発生に至る一連のつながり（事故シーケンスと呼ぶこととする）も多岐にわたり複雑である。また各工程に内在する崩壊熱等のエネルギーは比較的小さく、冷却能喪失などの異常状態が生じたとしても、溶液の加熱・沸騰などの重大な事故に至るまでに比較的長い時間的余裕があり、その間の故障状態の回復により正常運転に復帰できることも多い。このような複雑かつ多岐多様にわたる機器構成の再処理施設プラントシステムに対して、しかも機器故障から事故発生まで時間的余裕の有る状況では、MC法を適用するのが有利であろう。

事故発生頻度の予測のためにMC法を適用する試みは古くからあった。1970年代のVesely論文⁽¹⁾の序言にも述べられているように、個々の機器・装置へのMC法の適用では、どのように複雑なシステム構成であっても故障・修復の確率的挙動を詳細にわたってシミュレートすることができるが、当時は計算に莫大な時間を要することから実用的でなく、以降、解析的な手法であるFT手法に置き換えられてきた。その後FT手法では、方程式の数が膨大になる恐れのあるマルコフ過程等の取り扱いに対して、計算機容量が少なくて済むという利点を生かしてMC法を適用する試みが2、3報告されている^{(2) (3)}。ただし、これらのMC法では計算時間を短縮するため、システムの構成要素である機器・装置の故障・修復の挙動を全て同一のタイプとして画一的に取り扱い、システム状態そのものをパラメータとして遷移後のシステム状態をランダムサンプリングするなど、個々の機器・装置の違いや特徴を考慮したシミュレーションを行うわけではない。ここで、システムの状態遷移をランダムサンプリングするMC法と区別して、初期に提案されたような個々の機器要素を対象に、要素の持つ物理的パラメータや要素の状態変化までをランダムサンプリングするMC法を要素MC法と呼ぶこととしよう。近年のめざましい電子計算機の発展により、一昔前までは殆ど不可能と考えられた計算や解析も可能となってきた。一例を挙げるならば、幾何形状を正確に記述しつつ核データを精度よく取り扱える連続エネルギーMC法による臨界／遮蔽数値実験手法の開発があり、これは高速・高精度の並列計算機を用いて中性子や光子の物理体系の中での振る舞いを精度よくシミュレートしようとするものである。本報では、初期には電子計算機性

能の未発達のため実用が困難であった要素MC法の概念を、近年の電子計算機の高性能化を念頭に置いて発展させ、事故に至るまでに時間的余裕（猶予時間と定義する）がありシステムの回復が期待される場合や、多様な機器構成を有するシステムへの適用を目的として実用化を試みた。

本報の構成は、この要素MC法の概念に基づく事故シーケンス解析プログラムTITAN(Time Tracked Accident Sequence Analyzer)の開発を行ったので、その基本的方法について第2章で述べ、解析的方法による定式化と簡単な例題に対する解析結果との比較により要素MC法解析結果の妥当性の検証を行う。次に第3章で、再処理施設で考えられる事故シーケンスのひな型モデルについてTITANコードで解析し、その基本的解析機能の確認のために解析結果の統計的変動や計算機使用時間を調べ、さらに計算プログラムの並列化による計算の高速化を試みた結果について述べる。第4章では、故障率等の機器信頼性データの不確実さによる事故発生頻度解析結果に及ぼす影響について、解析的方法による不確実さ解析結果と要素MC法によるそれを比較して、違いの原因等を考察する。さらに第5章では、実際の再処理施設で遭遇するような複雑なプラントシステムへ適用する際の実用的なアルゴリズムを提案し、ドイツの再処理施設モデルのプルトニウム蒸発缶におけるレッドオイル爆発の事故シーケンスの例を取り上げて解析し、このアルゴリズムによる要素MC法シミュレーション結果の妥当性を示す。さらに第6章では、複雑なプラントシステムを要素MC法で解析する場合の簡明化のためのひとつの入力オプションとして事象グループ入力方式を提案する。最後の第7章では本報のまとめとして結論と今後の展望について述べる。付録Aでは、参考のため、時間的余裕のある系について、古典的なマルコフ過程の取り扱いによる厳密な解析的手法による解析結果と、要素MC法シミュレーション結果を比較し、前者すなわち厳密な解析的手法では煩雑な前処理手続きを行い、複雑な多数の連立方程式を解かなければならないのに対して、後者すなわち要素MC法では比較的容易にプラントシステムの事故発生頻度が求められることを示す。また、付録Bでは、本報第5章で提案した事象グループ入力方式により、再処理施設のプルトニウム精製サイクル臨界事故のモデルについてTITANで解析し、本方式が実用的に用いられることを示す。最後の付録Cは、TITANコードの使用マニュアルである。

2. シミュレーションによる基本的方法

機器・装置の故障の発生・回復の挙動に関するモンテカルロシミュレーションによる基本的取り扱い、多数の機器・装置からなる実際のシステムをシミュレーションする方法を提案し、簡単な例題を基に解析的方法による結果と比較しながら新たな提案された方法の妥当性を検証する。

2.1 機器故障発生のシミュレーション

機器・装置の故障挙動は、基本的に故障発生までの平均的な時間により表される。これを平均故障間隔(MTTF)といつて、機器・装置の故障観測データから以下のようにして求められる。一般にはMTTFの逆数をとり、その装置に固有な、単位時間当たり発生する平均故障回数(確率)となる故障率定数 λ を定めて、故障挙動を記述することとなる。

$$(MTTF)_i = \frac{\sum_j T_{ij}}{N_i} \quad (2.1)$$

$$\lambda_i = (MTTF)_i^{-1}$$

ここで、 T_{ij} : あるタイプ*i*に属する個々の装置*j*

の故障発生までの観測時間

N_i : あるタイプ*i*に属する全装置の故障回数

一般には、初期及び寿命末期の故障は除外することとして、(2.1)式で求められる λ は、定常運転中では一定と仮定することができる。このとき、運転開始時刻0から*t*までに故障を起こさない確率を $q(0, t)$ とすれば、時刻*t*と時刻*t+dt*の間で初めて故障する確率は、 $\lambda q(0, t) dt$ であり、これが $q(0, t)$ の減少分に等しい。すなわち次式が成立する。

$$dq(0, t) = -\lambda q(0, t) dt \quad (2.2)$$

微分方程式(2)を初期条件 $q(0, 0)=1$ のもとに解けば、

$$q(0, t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.3)$$

が得られる。従って、時刻0から*t*まで故障しないで時刻*t+dt*の間で初めて故障が発生する確率密度関数 $R(0, t)$ 、及び時刻0から*t*までの故障発生累積確率 $P(0, t)$ は、次式のようになる。

$$R(0, t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.4)$$

$$P(0, t) = \int_0^t R(0, u) du = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.5)$$

但し、ここで運転開始時刻を0に設定したが、これを任意の時刻 τ としても上式の右辺の表式は変わらない。すなわち、 $R(\tau, \tau+t) = R(0, t)$ 、 $P(\tau, \tau+t) = P(0, t)$ が成立する。

以上は、一つの機器について故障率 λ が一定であれば、故障発生の時間に対する確率分布が指数関数型となることを示した。この事実は後節において、多くの機器から構成されるシステムにおける事故発生に対しても、同様なことがいえることの論拠を与える。

要素MC法では、[0, 1]区間の一様乱数 N_R を個々の機器・装置に対する故障発生累積確率分布の(5)式に当てはめ（ランダムサンプリングという）、次式に示すように機器 i に対する故障発生時間 T^{f_i} を求める。

$$N_R = P(0, T^{f_i}) = 1 - \exp(-\lambda_i T^{f_i}) \quad (2.6)$$

$$T^{f_i} = (\log_e(1-N_R)) / (-\lambda_i)$$

乱数は、合同乗算法で作成する。すなわち j 番目の乱数 x_j は次式により求める。

$$X_j = \text{mod}(2k, \xi X_{j-1})$$

ここでは、 $k=31$ 、 $\xi=5^{11}$ とおいて計算を進めた。この場合、乱数の初期値 $X_0=1$ とすると乱数のサイクルは 2^{29} ($=5.37 \times 10^8$) となる。

本報の要素MC法では、従来のシステム状態を一括して取り扱うMC法と異なり、個々の機器・装置に対して時間軸に沿って故障の有無をランダムサンプリングするため、 λ_i の経時変化や、以前のシステム状態による λ_i の変化を考慮するなどの計算プログラム上の工夫により詳細な取り扱いが可能となる。

2.2 機器故障修復のシミュレーション

機器が故障してそれが発見されてから、直ちに修理のための作業が開始され、ある時間の経過後に修復がなると仮定する。前節に述べた機器・装置の故障過程と同様に、ここでも修復過程の挙動を表すために、平均修復時間(MTTR)及び修復率 μ が用いられる。

$$(MTTR)_i = \frac{\sum_j T_{ij}'}{N_i}, \quad (2.7)$$

$$\mu_i' = (MTTR)_i^{-1}$$

ここで、 T_{ij}' ：タイプ*i*に属する個々の装置*j*の
故障してから修復完了までの観測時間
 N_i' ：タイプ*i*に属する全装置の修復回数

経験的な近似の範囲では、(7)式で求められる修復率 μ は時間に依存せずに一定と仮定することができる。そこで前節で述べたのと同様に時刻0に修復を開始して時刻 t' に初めて修復が完了する確率密度関数 $S(0, t')$ 及び修復の累積確率 $V(t')$ は次式に示すような指数関数で表される。

$$S(0, t') = \mu \exp(-\mu t') \quad (2.8)$$

$$V(0, t') = \int_0^{t'} S(0, u') du' = 1 - \exp(-\mu t') \quad (2.9)$$

但し、修復開始時刻を一般に τ と設定しても、上式の右辺の表式に変化ないことは前と同様である。

要素MC法によるシミュレーションのためには、前節と同様に[0, 1]区間の一様乱数 N_R を(9)式の修復完了累積確率分布に当てはめ、機器*i*に対する修復完了時間 T'^i を求める。

$$N_R = V(0, T'^i) = 1 - \exp(-\mu_i' T'^i) \quad (2.10)$$

$$T'^i = (\log_e(1-N_R)) / (-\mu_i')$$

2.3 多くの機器から構成されるプラントシステム運転のシミュレーション

一般にプラントシステムを構成する機器は多種多様であり、これらの機器・装置は、その故障発生・回復に関わる挙動の違いにより、基本的に以下に述べる3個のタイプに分類できる。このように故障発生及び回復の挙動の違いを機器ごとに区別して取り扱い、それら機器の組み合わせから成るシステムの異常や事故の発生挙動をシミュレーションする。ここでは、始めに機器タイプ1、機器タイプ2、機器タイプ3の定式化についてそれぞれ述べ、次に、これら機器タイプの組み合わせとしてのシステムの異常発生の定式化について述べ、最後に機器のタイプを3個に分類

したときの要素MC法によるシミュレーション方法を説明し、簡単な数値例により要素MC法シミュレーション結果の妥当性を確認する。

(1) 機器タイプ1の定式化

このタイプの機器は、直接運転に関わっているポンプや弁、熱交換器などであり、運転中計器の指示異常により運転員が即座に機器の故障を発見して修復にとりかかる。修復が完了すると直ちにプラントシステムの運転に参入できるものとする。装置の信頼性は故障率 λ と平均修復時間MTTRを用いて表される。

時刻0からtまでに起きる故障及びその修復による回復を考慮して、時刻tとt+dの間に、装置の故障が単位時間に発生する頻度を $h(t)$ とすれば、(2.4)及び(2.8)式及びこれらの式の但し書きを参照して、次式が成立する^[1]。

$$h(t)dt = R(0, t)dt + \int_0^t h(v)dv - \int_v^t S(v, w)R(w, t)dw \quad (2.11)$$

(2.11)式にLaplace変換を行って変数を整理し、逆変換により次式に示す解を求めることができる。

$$h(t) = \frac{\lambda - \mu}{\lambda + \mu} \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right\} \quad (2.12)$$

装置が故障しても修復にかかる場合(MTTR=∞)には、(2.12)式の $h(t)$ は、(2.4)式の $R(0, t)$ の表式と同一となる。

さらに、時刻tに装置が故障状態にある確率、すなわちアンアベイラビリティーを $u(t)$ とすれば、 $h(t)$ の定義により次式の関係が成立する。

$$h(t) = \lambda \{1 - u(t)\} \quad (2.13)$$

これから、 $u(t)$ が次のように求められる。

$$u(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left\{ 1 - e^{-(\lambda + \mu)t} \right\} \quad (2.14)$$

これらは、実際のプラントの運転時に経験する、機器の故障・修復を考慮した故障頻度密度及びアンアベイラビリティーの表式である。通常用いられる機器の $\lambda = 1.5 \times 10^{-3}/h$ 、 $\mu = (24h)^{-1}$ （年1.3回程度故障し1日で修復するような例）を考えると、(2.12)、(2.14)式の指数関数による時間変化項は運転開始してから3日も経過すれば5%以下の寄与になる。従って、通常のFT解析のためには時間に依存しない次式が用いられる。

$$h = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu} \quad (2.15)$$

$$u = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.16)$$

(2) 機器タイプ2の定式化

タイプ2機器は、定常時に運転（作動）してはいるが自己指示型でないため定期検査（試験）時にのみ故障が発見されて修復に取りかかるるものと定義される。例として警報装置など安全監視系の機器があり、機器の信頼性は、故障率 λ 、定期検査間隔TI及び平均修復時間MTTRを用いて表される。

タイプ2の故障が発生しても次の定期検査時までそれが発見されず、定期検査時になって故障が発見されてから、必要な保守及び修復を施す（このとき故障発生累積確率分布はゼロリセットされる）ことから、(2.4)及び(2.13)式より次の故障頻度密度 $h(t)$ 及びアンアベイラビリティ $u(t)$ が導かれる。

$$h(t) = R(nTI, t) = \lambda e^{-(t-nTI)/\lambda} \quad (2.17)$$

$$u(t) = 1 - e^{-(t-nTI)/\lambda} \quad (2.18)$$

ここで、 $nTI \leq t \leq (n+1)TI$ であり、定期検査時の故障発見後の修復過程は考慮していない。通常のFT解析のためには近似的に定期検査時の $h(t)$ 、及び平均の $u(t)$ が用いられる。

$$h = \lambda \exp(-\lambda TI) \quad (2.19)$$

$$u = \frac{1}{TI} \int_0^{TI} dt (1 - \exp(-\lambda t)) \sim \frac{1}{2} \quad (2.20)$$

(3) 機器タイプ3の定式化

機器タイプ3は、定常時には運転（作動）していないが運転要請時に所定の機能を発揮しないことで故障が発見されるものと定義される。例として、待機用機器あるいは工学的安全設備などの機器があり、信頼性は、要請時の故障確率Pと平均修復時間MTTRを用いて表される。運転員に対する所定の動作が要請される時の失敗などヒューマンエラーも機器タイプ3に分類される。

通常のFT解析では、故障頻度密度 h を0と置き、アンアベイラビリティ u を故障確率 p に等しく置いてシステムの信頼性解析を行う。

$$h = 0 \quad (2.21)$$

$$u = p \quad (2.22)$$

(4) 機器タイプ組み合わせの定式化

ある k 個の機器の故障の発生の組み合わせにより、あるシステム異常に至る事故シーケンスを考えよう。どの機器が最初に故障するかによって（これを起因事象という）異なる事故発生率が期待されるので、この事故シーケンスの発生頻度は、これらの総和として表される。事故シーケンスに関わる多くの機器には上述したタイプ1からタイプ3までが含まれるため、事故シーケンス発生頻度の定式化のためには、上述した個々の機器のタイプ別の $h(t)$ 及び $u(t)$ の表式を用いて、次式に示すような個々の機器の故障を起因事象とする事故発生率の総和として、単位時間当たりの事故発生率 $H(t)$ が次式のように表される。

$$H(t) = \sum_{j=1}^k \{ h_j(t) \prod_{i=1, i \neq j}^k u_i(t) \} \quad (2.23)$$

ここで、機器タイプ3は、運転要請時の故障あるいは過誤の確率のみが問題となる、機器あるいはヒューマンエラーなので起因事象とはなり得ず、その機器 j に関わる $h_j = 0$ において、(2.23)式の総和から除外される（ただし、 $u_i \neq 0$ として寄与する）。

前節(1)～(3)に示したように、 $h_j(t), u_i(t)$ 等は時間の経過と共に比較的早く漸近値に収束して一定となるので、 $H(t)$ についても、近似的に一定値としてよい。例として、タイプ1の機器2個 ($\lambda_1 = 1.5 \times 10^{-4}/h$, $\mu_1 = (24h)^{-1}$, $\lambda_2 = 1.5 \times 10^{-4}/h$, $\mu_2 = (48h)^{-1}$) から成るシステムを考えると、(2.15), (2.16)式を導いたときと同様な推論により、運転開始してから6日も経過すれば（この場合、 μ_2 が律速となる）(2.23)式は次式に示す時間的な漸近値に等しくなる。

$$\begin{aligned} H &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)} \frac{(\mu_1 + \mu_2)}{(\lambda_2 + \mu_2)} \\ &= 1.40 \times 10^{-2}/y \end{aligned} \quad (2.24)$$

上記は機器の数が2個の場合について示したが、一般に多くの機器及びタイプから構成される任意のシステムに対して、プラント寿命の長さを考慮すればシステム運転の任意の時点で事故発生率が一定と仮定することができる。

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} - \frac{(\mu_1 + \mu_2)}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \\
 &= 1.40 \times 10^{-2} / \text{y}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

上記は機器の数が2個の場合について示したが、一般に多くの機器及びタイプから構成される任意のシステムに対して、プラント寿命の長さを考慮すればシステム運転の任意の時点で事故発生率が一定と仮定することができる。

(5) 多くの機器からなるプラントシステムの要素MC法シミュレーション

通常のプラントの技術システムは、上述した3個の機器タイプに分類される多くの機器・装置から構成されるものと考えられる。このような技術システムの信頼性挙動を要素MC法で評価するためには、プラント運転の時間的経過に沿って、上に述べた様な機器タイプごとの故障発生・修復特性の違いに注意して、(2.6)及び(2.10)式により故障あるいは修復までの時間をランダムサンプリングして、目標とする事故モードの機器故障状態の重なりを追跡する。その重なりを検出したときの時間を事故発生時間として記録し、次のヒストリー計算においても同様な手順により事故発生までシステムに存在する各種機器の故障を時間軸に沿って追跡する。最終的にこれら記録・蓄積された事故発生時間を集計して平均値を取り、その逆数を平均事故発生率とする。このようにして求めた事故発生率が、前節(2.23)式により解析的に求められる値に相当する。ここで、機器タイプ3については、起因事象となり得ず、他の機器タイプの故障に伴う運転要請時において成功または失敗の確率を考慮すればよいだけなのでランダムサンプリングは行わずに、最終的にタイプ1とタイプ2に関して要素MC法で求めた事故発生率に、タイプ3の故障確率として与えられた値を掛けて事故発生率とする。これまで述べたような要素MC法による基本的な計算フローチャートをFig.2.1に示す。この図では、機器故障の重なりの検出過程を簡略化していて、実際のプログラミングでは以下の手順を考慮する。ここでは、Fig.2.2に示すように、例として機器が3個($i=1 \sim 3$)有って、それらの故障状態が重なり合うとき事故が発生する場合について説明する。

- 1) 機器*i*の故障時間、修復時間 (T_{fi} , Tri)をランダムサンプリングにより求める。
- 2) 機器*i*の故障時刻 $t_{fi}(=t + T_{fi})$ 、故障回復時刻 $tri(=t + T_{fi} + Tri)$ を、始め

の時刻 t に積算して求める。

- 3) tf_1, tf_2, tf_3 のうち、最大のもの tf_{MAX} を同定する。
- 4) $tr_k < tf_{MAX}$ となる機器 k に対しては、故障後の修復が完了しているので、新たなランダムサンプリングにより、次の故障時刻 tf_k' 、故障回復時刻 tr_k' を求める。3), 4)の手順を繰り返して、 $tf_{MAX} < tr_k'$ となるまで待つ。
- 5) この時、 tf_k' が tf_{MAX} を越える可能性がある。任意の時刻で、 $tf_1, tf_2, tf_3 < tr_1, tr_2, tr_3$ となることを検出して、事故発生時刻とする。

前節(4)で例として取り上げた機器タイプ1が2個からなる簡単なシステム例について、上に述べた方法によりMC法で10万ヒストリー（時刻0から事故発生に至るまでを1ヒストリーという）まで計算して平均事故発生率を求めると $1.42 \times 10^{-2}/y$ となる。一方、機器故障の定式化により導かれた(2.24)式からは $1.40 \times 10^{-2}/y$ となり、結果の一致度はよい。また、事故発生頻度を10年間毎に区切り1ヒストリー当たりに正規化して棒グラフ状に示すとFig. 2.3のようになる。これから、事故発生頻度分布は指数関数型となることが分かる。この事実に関連して、これまで、システムが多数の機器及びタイプからなる場合や猶予時間を考慮する場合にも単位時間当たりの事故発生率が一定となることを解析的に示した。従って、2.1節に述べたような個々の機器故障について故障率が一定であれば故障発生時間の確率分布が指数型となることを導いたときと同様な推論により、一般の多くの機器から構成され、かつ猶予時間も考慮するシステムに対して時間に対する事故発生頻度分布が指数型となることを示すことができる。

(6) 猶予時間のあるシステム事故発生シナリオの取り扱い

本報の冒頭にも述べたように、要素MC法の適用対象として考慮する再処理施設においては、機器故障の重なりが発生しても、重大な事故に発展するまでに通常10数時間の時間的余裕のあることが多いので、その間の故障の回復従って事故の回避が考えられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これを猶予時間(Grace period)と捉えて要素MC法によるシミュレーション解析を行うことができる。要素MC法では、Fig. 2.1の計算フローチャートに示すように、猶予時間は機器タイプ1及びタイプ2故障の重なりを検出してから附加して時間ステップを進め、再度機器故障の重なりの有無をチェックするシミュレーションループに入る（ここで、機器タイプ3に対して故障の回復

は考慮していない）。これは、概念的には、Fig. 2.2に示すように、シミュレーションにより機器の重なりの継続時間が与えられた猶予時間を超える場合を事故発生として記録することと解釈できる。

解析的には、近似的に(2.8)式の指數関数項と同様に考えて、猶予時間を T_d とすれば事故回復に関する機器故障修復率 μ_d の積和の負の指數関数 $\exp(-\sum \mu_d T_d)$ と表されるファクターだけ(2.23)式の事故発生率にかけて、減少割合を概算できる。ただし、この猶予時間の厳密な解析的取り扱いについては付録Aに述べる。

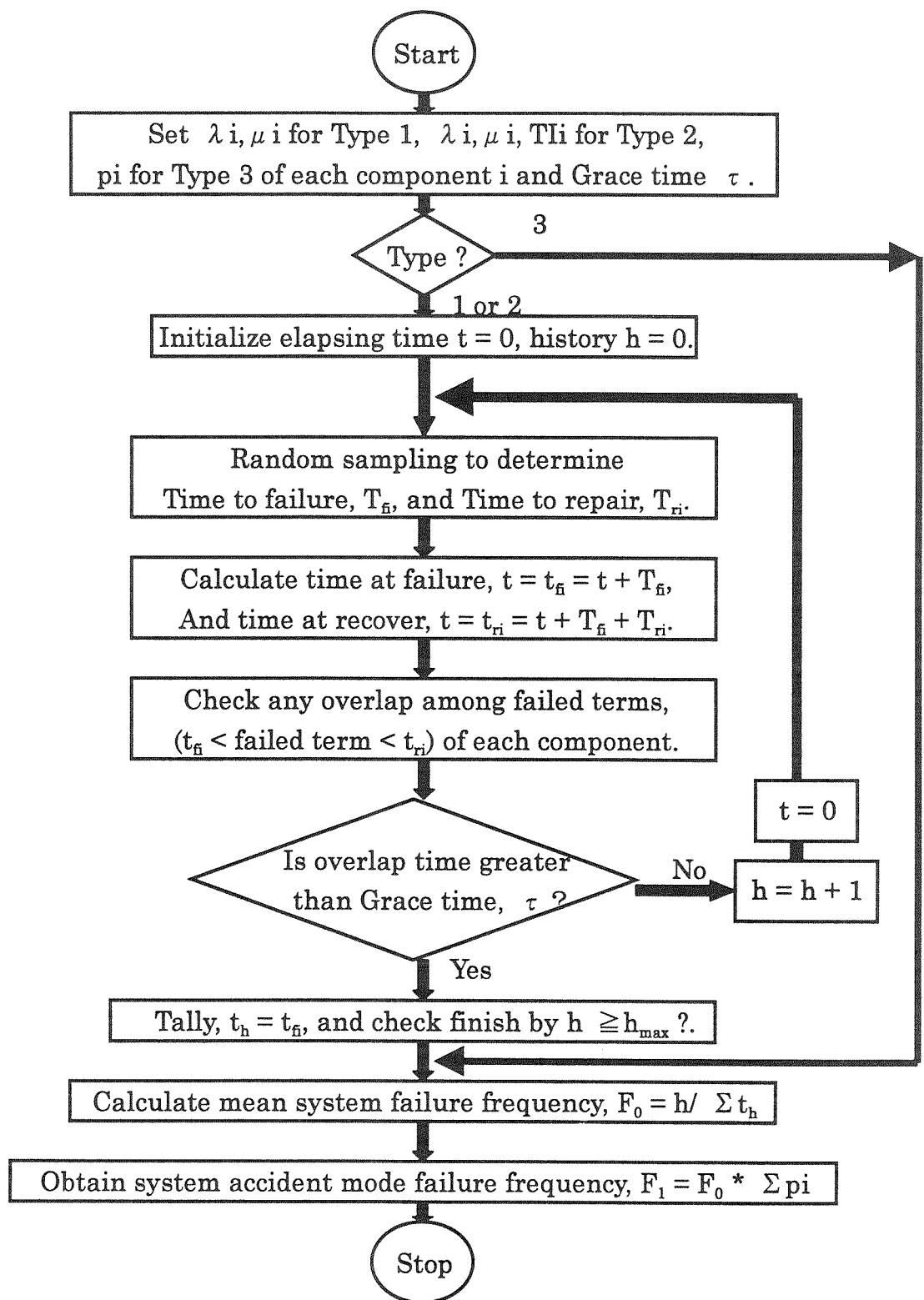


Fig.2.1 Basic flowchart for Component Monte Carlo simulation to obtain system accident mode failure frequency.

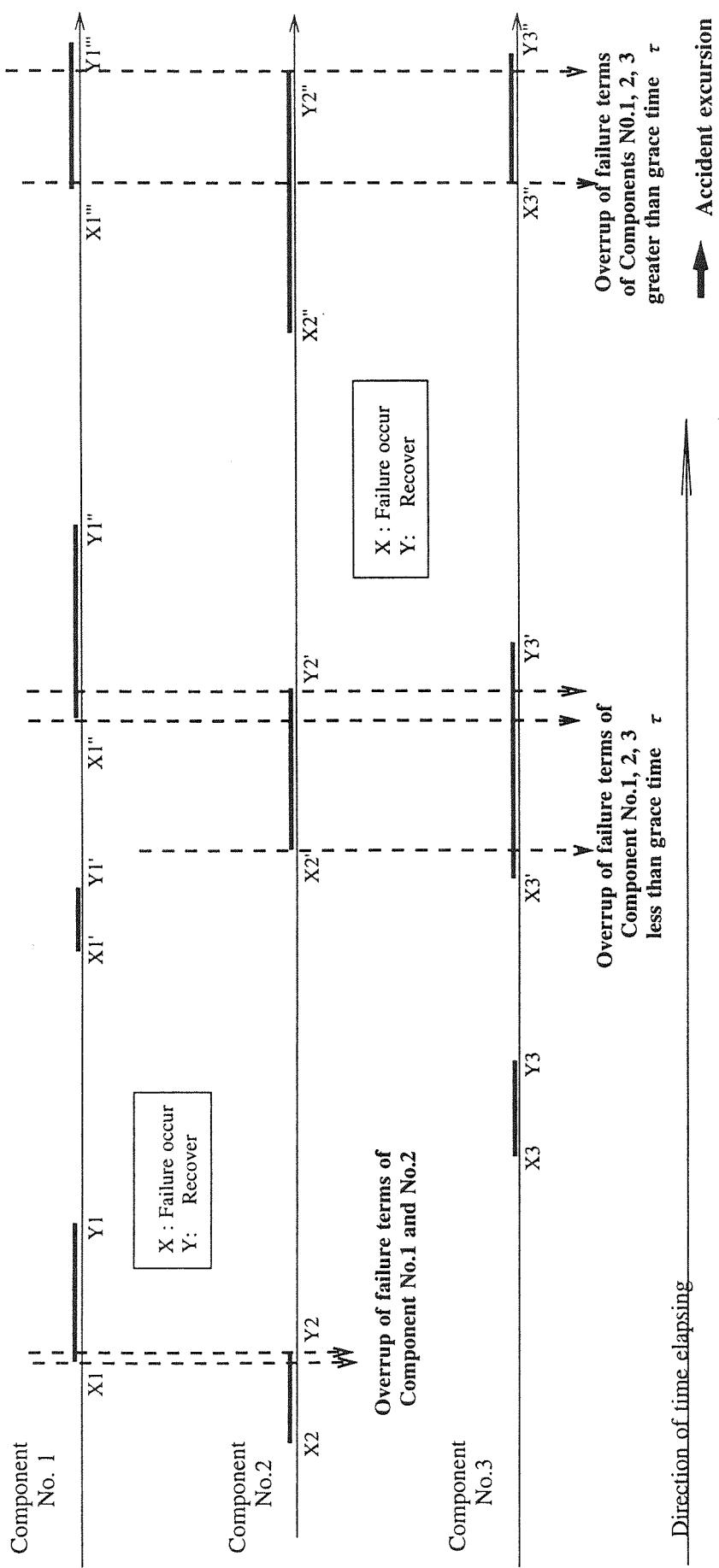


Fig.2.2 Schematic flow of component Monte Carlo simulation.

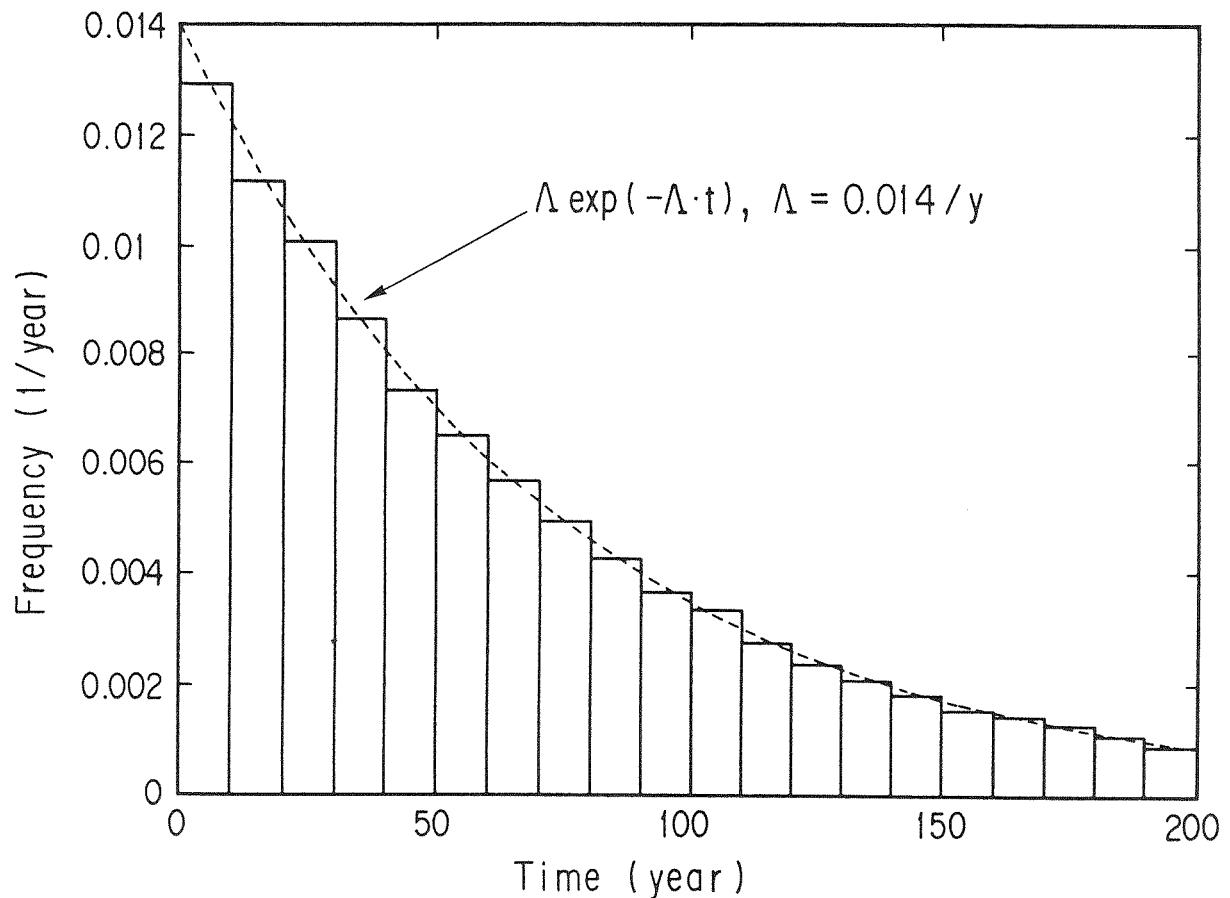


Fig.2.3 Histogram of normalized system failure frequency by 10 year interval for a two component system.

3. ひな型モデルによる基本的解析機能の確認

要素モンテカルロ法シミュレーションによる計算プログラムTITANの基本的解析機能を確認するため、再処理施設で考えられる事故シーケンスのひな型モデルを解析し、計算結果に含まれる統計誤差の程度、猶予時間を含む事故シーケンスへの解析適用性、並列計算による計算時間短縮可能性について調べる。

3.1 事故シーケンスひな型モデルの設定

事故シーケンスひな型モデルをFig. 3.1のFT形式で示す。シーケンスの構成要素となる基本事象及び信頼性データは、Table 3.1に示すように機器タイプ1が2個、機器タイプ2が1個、機器タイプ3が5個とする⁽⁷⁾。これは、第5節に述べるように、典型的な再処理施設におけるレッドオイル爆発事故に至る一つの事故シーケンスと考えられる。ただし本章では、ひな型モデルとして第5章に述べるものより簡略化したものを考え、詳細説明も省略する。Table 3.1に示す機器・装置の故障状態の重合により、システム異常状態、すなわち蒸発缶内部のTBP/有機溶媒と硝酸プルトニウム水溶液が温度制限値を越えて接触するという異常状態が発生する。どの程度時間が経過したら混合溶液が相互に反応して危険なレッドオイルを生成して爆発に至るかを知るには、実験に依らざるを得ない。ここではレッドオイルに変質して爆発するまでに要する時間（猶予時間）を0, 10, 30, 50hとパラメトリックに変えて事故発生率を解析してみる。猶予時間中にミキサセトラ液液界面制御系の故障(B004)あるいは蒸発缶における高温水蒸気の2次側流入(B039)が回復すれば事故発生が回避されたものとする。

3.2 解析結果と考察

ひな型モデルによる解析結果は、以下のように要約される。

- (1) 猶予時間0と10hの場合について、機器の修復時間を一定値としたときと指数分布に従うとしたときについて、ヒストリーを変化させて平均事故発生時間と標準偏差の関係を調べた。その結果をFig. 3.2からFig. 3.5までに示す。これらの図を見る

とヒストリー数が100回を超えると、いずれの場合も平均事故発生時間とその標準偏差の比は、5%以内の誤差で1.0に近づき、1000回を超えるとほぼ収束するようである。さらに、ヒストリー数を1000, 2000, 5000, 10000, 100000と増やしたときの平均事故発生時間、その標準偏差及び平均事故発生時間の逆数としての事故発生率の解析結果をTable3.2及び3.3に示す。これから、5000ヒストリーを越えるとMC法計算値の統計的変動はほぼ1%以内に収束するようである。すなわち、これ以上のヒストリー数增加による統計的変動は有効数字3桁目の±1（相対偏差の約±1%）以内に収まっている。またこのとき、平均事故発生時間とその標準偏差の一致度もよく、このことは事故発生時間の頻度分布が指數関数型となることを示す。

(2) Table 3.4に示すように猶予時間0の場合の解析的手法による結果 $2.48 \times 10^{-7}/y$ と、MC法による結果 $2.47 \times 10^{-7}/y$ は同一である。解析的手法では2.3(2)節で述べたように機器タイプ2に対する定式化に多少の近似が含まれるが、その影響は殆ど認められない。

(3) Table 3.4で猶予時間を0, 10h, 30h, 50hとした場合のMC法による事故発生率の計算結果は単調に減少している。猶予時間50hの場合には $9.50 \times 10^{-9}/y$ となり、猶予時間0の場合の $2.47 \times 10^{-7}/y$ と比較して減少ファクターは 3.8×10^{-2} となる。これは、猶予時間内に機器故障の回復によるシステム異常状態の終息が起こるためである。複数の機器故障からなる事故シーケンスに猶予時間を考慮した厳密な解析的方法では、付録Aに示すような複雑な手順により事故発生頻度が求められ、その結果はMC法による結果とほぼ一致することが確かめられる。

(4) Table 3.4に示すように、猶予時間の増加とともに計算機使用時間が急激に増加して、これが50hの場合には約3時間にもなる。そこで、日本原子力研究所の大型ベクトル並列計算機システムVPP500を使用して、複数のPE(Processor Element)を用いた並列計算による計算の高速化が可能であるかどうかを確かめた。要素MC法計算プログラムを並列化して、猶予時間10hの場合を例に解析を行った。PE数を1, 2, 4, 8, 16と増加したときの計算機使用時間は、Table 3.5に示すとおり、PE数にほぼ反比例して減少している。並列化効率(PE 1個あたりの計算機使用時間で比較した計算機使用効率)はPE数の増加とともに減少し、PE数16個のとき約80%となる。

(5) 並列計算による10000ヒストリーの事故発生率計算値の変動は、Table 3.5に示すように、PE数の変化によるランダムシーケンスの変更が起きるため、相対偏差で約±1%程度である。このことからもMC法による統計的変動が、この程度あるこ

とが分かる。

以上に述べた解析結果から、TITANコードの要素MC法シミュレーション解析機能に関わる、以下のような結論が導かれる。

- (1) 要素MC法によるシミュレーション結果には、充分にヒストリー数を取って収束した場合でも、約±1%程度の統計誤差が含まれる。この程度の誤差範囲は、事故発生頻度の予測において許容されるものと思われる。
- (2) また、猶予時間を含む事故シーケンスに関わる事故発生頻度の要素MC法による結果は、猶予時間の増大とともに単調に減少する。付録Aに述べる厳密な解析的方法による結果とMC法による結果はほぼ同一の結果となることから、時間的余裕のあるシステムに対する要素MC法シミュレーション解析結果は妥当である。
- (3) さらに、実際的なプラントシステム信頼性評価問題に対しては、多くの事故シーケンスに関わるシミュレーションが必要になり、これを実用的な計算時間の範囲で解析可能なようにするためには、並列計算に依らざるを得ないと思われる。ここでは、一つのカットセットの解析について並列計算を適用することにより、計算時間の大幅な短縮が可能なことを示した。現在、PE数が千台規模の高並列分散メモリ型計算機AP1000も実際に稼働していることを考えると⁽⁸⁾、モンテカルロシミュレーション解析に関わる計算時間の問題はほぼ解決するものと考えられる。

Table 3.1 List of reliability data⁽⁷⁾ for basic events of the simplified model.

Basic event*	Type	Failure rate	p	MTTR	TI
B004	1	$1.5 \times 10^{-4}/\text{h}$		24h	
B009	3		0.95	*	
B010	3		0.95	*	
B011	3		0.95	*	
B019	3		0.011	*	
B039	1	$1.5 \times 10^{-4}/\text{h}$		48h	
B071	2	$1.0 \times 10^{-4}/\text{h}$		8h	
B051	3		0.05	*	720h

* Description for these basic event names are illustrated in Fig.3.1

Table 3.2 Calculated results by Monte Carlo method for grace period (GP) of 0 h with histories varied.

Histories	Accident Frequency	Mean time To accident	Standard Deviation
1000	$2.38 \times 10^{-7}/\text{y}$	$4.20 \times 10^6/\text{y}$	$4.15 \times 10^6/\text{y}$
2000	$2.41 \times 10^{-7}/\text{y}$	$4.15 \times 10^6/\text{y}$	$4.19 \times 10^6/\text{y}$
5000	$2.47 \times 10^{-7}/\text{y}$	$4.05 \times 10^6/\text{y}$	$4.04 \times 10^6/\text{y}$
10000	$2.47 \times 10^{-7}/\text{y}$	$4.05 \times 10^6/\text{y}$	$4.09 \times 10^6/\text{y}$
100000	$2.47 \times 10^{-7}/\text{y}$	$4.06 \times 10^6/\text{y}$	$4.07 \times 10^6/\text{y}$

Table 3.3 Calculated results by Monte Carlo method for grace period (GP) of 10 h with histories varied.

Histories	Accident Frequency	Mean time to accident	Standard Deviation
1000	$1.24 \times 10^{-7}/y$	$8.06 \times 10^6 y$	$7.73 \times 10^6 y$
2000	$1.31 \times 10^{-7}/y$	$7.66 \times 10^6 y$	$7.51 \times 10^6 y$
5000	$1.27 \times 10^{-7}/y$	$7.83 \times 10^6 y$	$7.74 \times 10^6 y$
10000	$1.28 \times 10^{-7}/y$	$7.84 \times 10^6 y$	$7.85 \times 10^6 y$
100000	$1.27 \times 10^{-7}/y$	$7.84 \times 10^6 y$	$7.84 \times 10^6 y$

Table 3.4 Calculated results by deterministic and Monte Carlo methods with grace period (GP) varied.

Method	GP	Accident freq.	Elapsed time *
Deterministic	0	$2.48 \times 10^{-7}/y$	< 1s
Monte Carlo (1 PE, 10000 histories)	0	$2.47 \times 10^{-7}/y$	414s
	10h	$1.28 \times 10^{-7}/y$	802s
	30h	$3.43 \times 10^{-8}/y$	2975s
	50h	$9.50 \times 10^{-9}/y$	10720s

* Elapsed time by VPP500 computer system at JAERI

Table 3.5 Effect of parallelization of random sampling
with number of PE (Processor Element) varied
for GP = 10h and 10000 histories.

No. of PE	Accident freq.	Elap.time	Paral.eff.*
1	$1.27 \times 10^{-7}/y$	802s	100%
2	$1.28 \times 10^{-7}/y$	452s	89%
4	$1.28 \times 10^{-7}/y$	226s	89%
8	$1.30 \times 10^{-7}/y$	113s	89%
16	$1.29 \times 10^{-7}/y$	64s	78%

* Parallelization efficiency by VPP500 computer system
(= Ratio of elapsed time divided by number of PE).

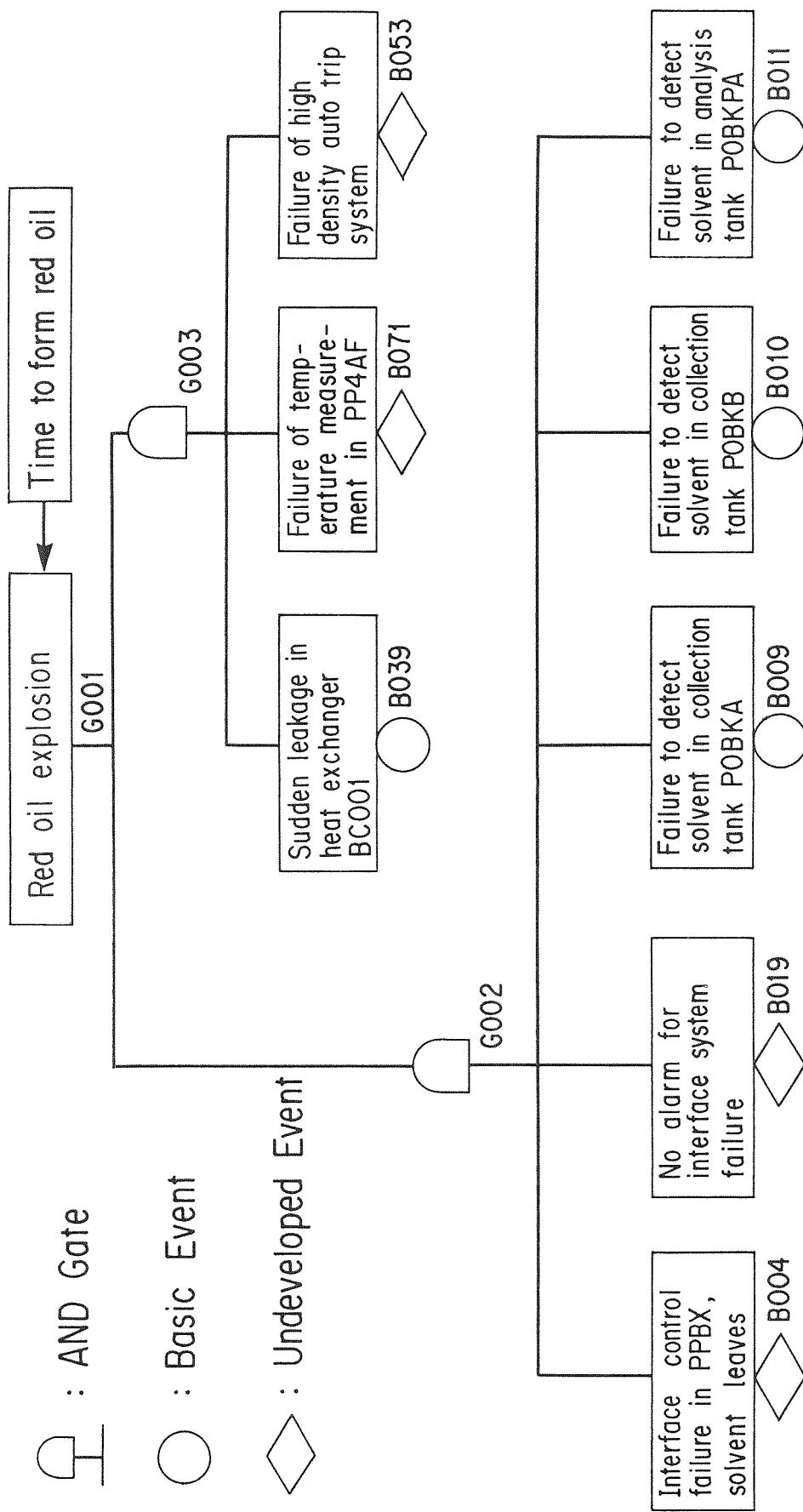


Fig.3.1 Fault tree expression for prototype model of red oil explosion accident sequence

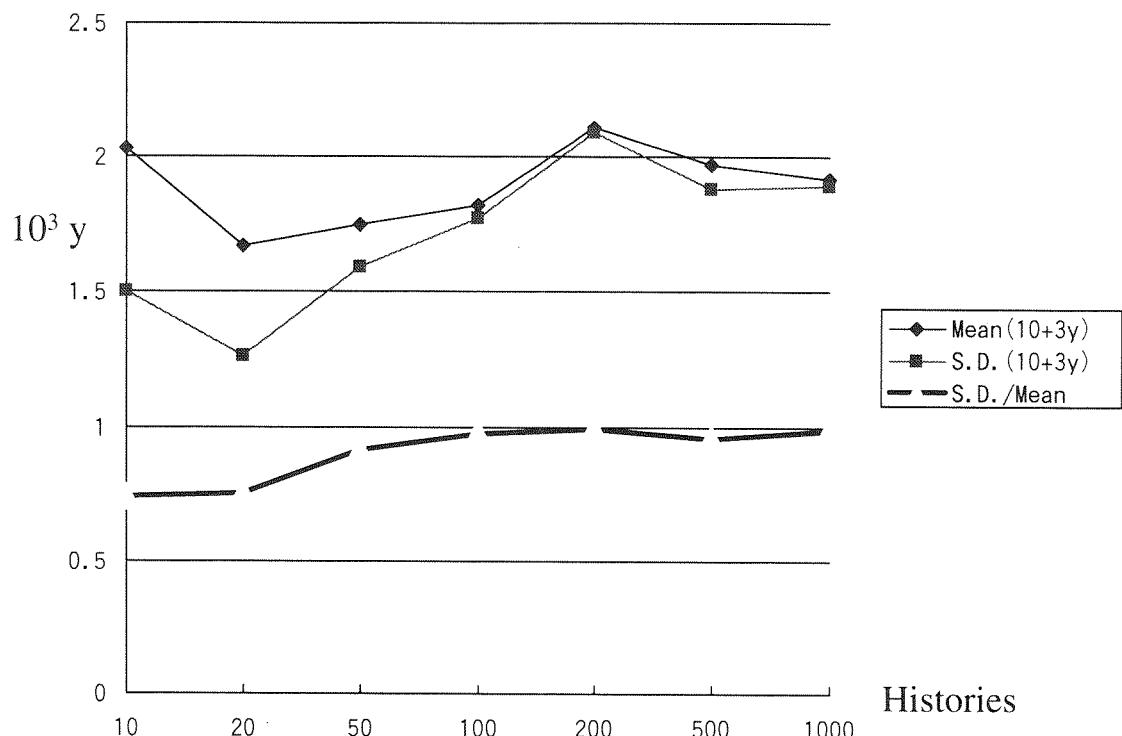


Fig. 3.2 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with $GP=0$, $MTTR = \text{const.}$

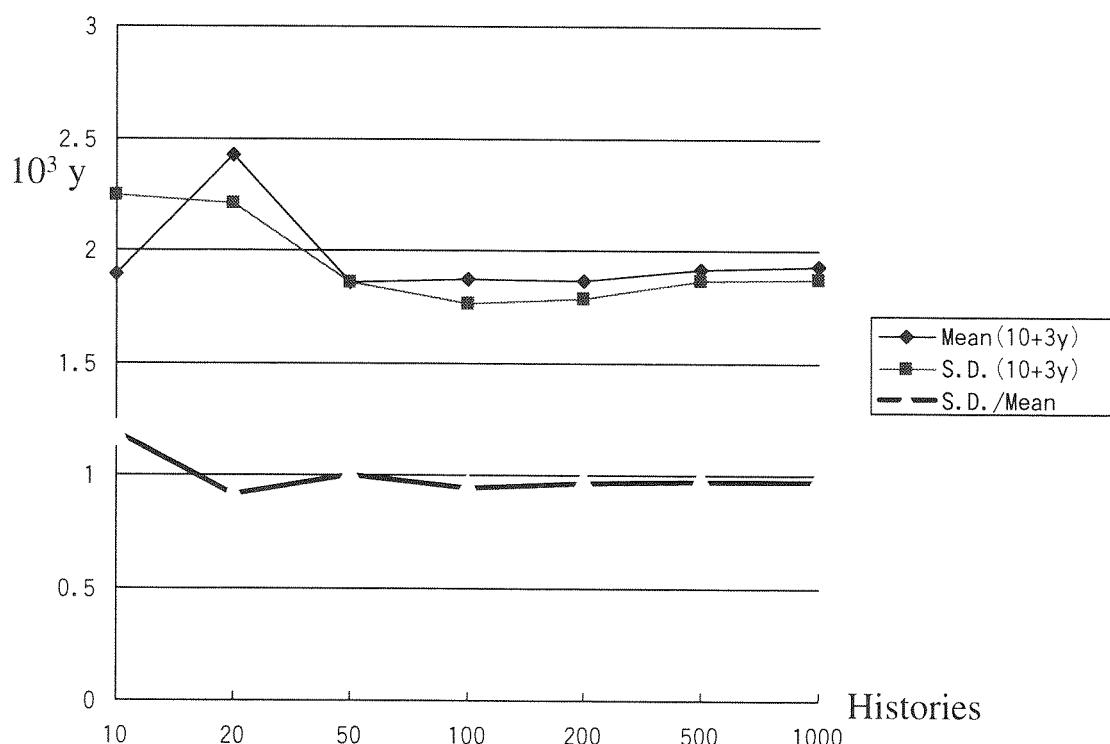


Fig. 3.3 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with $GP=0$, $MTTR = \text{exponential.}$

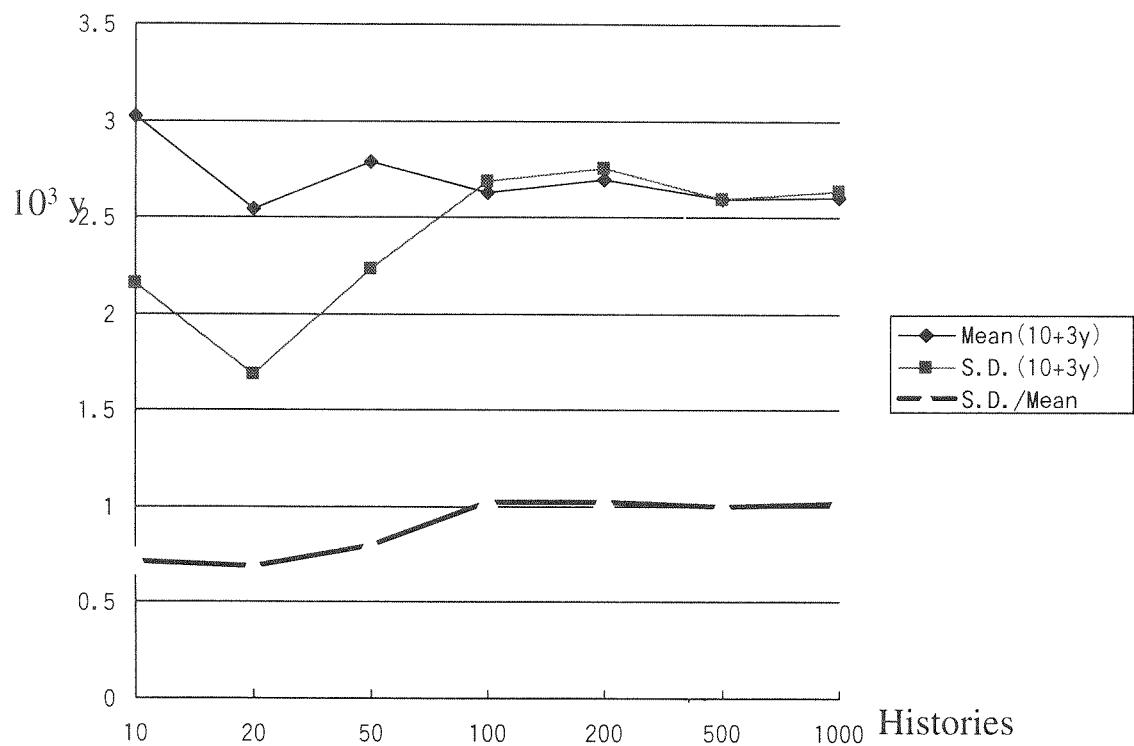


Fig. 3.4 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with $GP=10h$, $MTTR = \text{const.}$

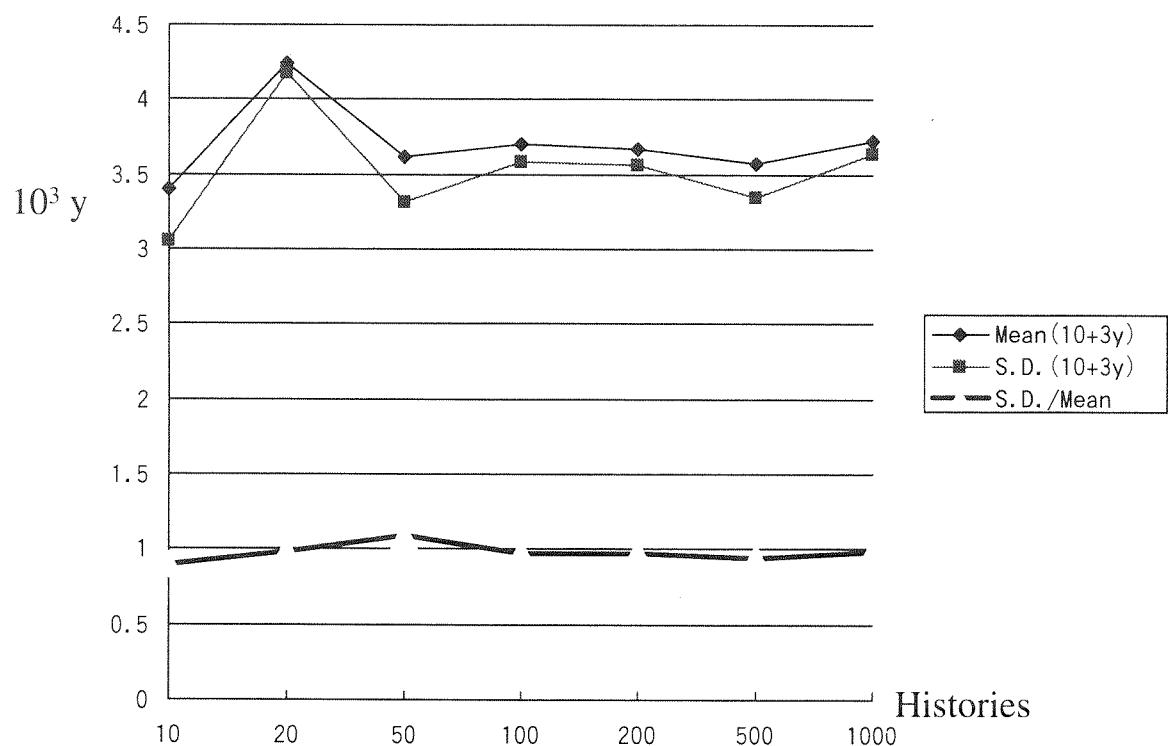


Fig. 3.5 Change of mean and standard deviation of accident occurrence time with $GP=10h$, $MTTR = \text{exponential.}$

4. 機器故障率等の不確実さ解析

カットセットの基本事象に関する各機器の信頼性データ、例えば故障率等は、値自体に不確実さを有する。これら基本事象に関する信頼性データの不確実さは、通常、対数正規分布で表され、頂上事象の事故発生頻度の値の誤差変動として影響を及ぼす。本章では、この影響の程度を要素MC法ランダムサンプリングにより求め、従来から核燃料施設のPSAに用いられるFT解析コードFTLによる結果と比較・検討する。

4.1 不確実さ解析の方法

(1) 解析的方法

FTLコードに組み込まれている解析的方法（モーメント法）では、そのFT解析において、その基事象である機器故障率や人的過誤率を入力パラメータとして、システム故障を構成するミニマルカットセットに対する1次モーメント（期待値）及び2次モーメント（分散）が求められる。

頂上事象の発生頻度 Q_{top} は、次式に示すようにミニマルカットセット*i*の発生頻度 Q_i の総和で表される。

$$Q_{top} = \sum_{i=1}^k Q_i \quad (4.1)$$

なお、ミニマルカットセットの発生頻度は、第2章種々の機器タイプの組み合わせのところで述べたように起因となる基事象の発生頻度とその他の基事象の生起確率の積になる。この式から、基事象の不確実さが正規分布に従うと仮定したときの頂上事象の期待値と分散を次のように求めることができる⁽⁹⁾。

$$E(Q_{top}) = \sum_{i=1}^k E(Q_i) \quad (4.2)$$

$$\text{Var}(Q_{top}) = \sum_{i=1}^k \text{Var}(Q_i) + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \text{Cov}(Q_i, Q_j) \quad (4.3)$$

ここで、Eは期待値、Varは分散、Covは共分散を表す関数である。

これらの式は、ミニマルカットセットの構成要素の各基事象の期待値、分散、共分散に遡って記述される。例えば、ミニマルカットセット*i*が2個の基事象Z1及びZ2から成るものとすれば、近似的に次式のように記述される。

$$E(Q_i) = E(Z1) \cdot E(Z2) \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(Q_i) &= \text{Var}(Z1) \cdot \text{Var}(Z2) + \text{Var}(Z1) \cdot [E(Z2)]^2 \\ &\quad + \text{Var}(Z2) \cdot [E(Z1)]^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

また、頂上事象が上に述べたミニマルカットセット*i*に加えて、ミニマルカットセット*j*（2個の基事象Z1及びZ3から成るものとする）により決定される場合には、其分散は次式のように記述される。

$$\begin{aligned} \text{Cov}(Q_i, Q_j) &= \text{Cov}(Z1 \cdot Z2, Z1 \cdot Z3) \\ &= \text{Var}(Z1) \cdot E(Z2) \cdot E(Z3) \end{aligned} \quad (4.6)$$

(4.4)から(4.6)式を(4.2)及び(4.3)に代入することにより、頂上事象の期待値と分散を求めることができる。

以上述べたように、決定論的な方法では、機器故障率や人的過誤率の正規分布を仮定した期待値及び分散から頂上事象の期待値及び分散が求められる。しかるに、これらの機器故障率や人的過誤率の不確実さ分布は、通常、対数正規分布として与えられるので、上に述べたような決定論的手法による事故発生率期待値の分散の解析結果は、安全側であるが過大に評価される。

(2) ランダムサンプリング法

一方、ランダムサンプリング法は、入力パラメータ λ_i の確率分布が与えられれば、各確率密度関数からランダムサンプリングにより1つずつ値を取り出し、 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ の組を作り、これに基づいて頂上事象の発生確率（事故発生頻度）を求め、これを何回も繰り返して事故発生頻度の分布を求める。ここで頂上事象の発生確率を求めるときに、ミニマルカットセットに基づく確率計算式に代入して直接求める方法と、要素MC法により求める方法がある。要素MCシミュレーションではFig. 4.1に計算フローを示すように、ある λ の組に対する事故発生時間を多数（通常n=1000以上）のヒストリー計算による平均値として求め、その逆数を

平均事故発生率として、次に、新たなランダムサンプリングによる入力パラメータの組を基に、同様な計算処理を多数回 ($m=1000$ 回程度) 行い、それらの結果から事故発生頻度の分布すなわち平均値及び分散が求められる。これから、明らかなようにランダムサンプリング法では、入力パラメータの分布として通常用いられる対数正規分布ばかりでなく、任意の分布型を扱うことができる。

要素モンテカルロ法では、個々の機器の故障率ばかりでなく、それらの組み合わせによる事故発生頻度を求める過程でもランダムサンプリング法によるため、多くの機器・装置から構成される技術システムの事故発生過程に関わる、全ての確率事象の確率的挙動をそのままの形で扱うことができる。

4.2 解析結果と考察

第3章で用いたひな型モデルの対象機器から、タイプ1及びタイプ2を取り出して構成されるシステムについて、機器故障率等の不確実さ解析を行う。Table 4.1に対象となる2個の機器タイプ1及び1個の機器タイプ2の信頼性データを示す。

(1) 1個の機器タイプ1(B004)から成る事故シーケンス(すなわち、その機器が故障すると事故が発生する場合)について、解析的方法及び要素MCランダムサンプリング法により不確実さ解析を行った結果をTable 4.2に示す。これを見ると、要素MC法では入力として与えた故障率データのエラーファクターが事故発生頻度のエラーファクターとしてそのまま再現されているのに対して、FT解析コードFTLの結果では、エラーファクターが2ないし3倍大きく算出されている。これらの結果から、機器故障率等の不確実さ解析においては、ランダムサンプリング法による方法が有効なことがわかる。Fig.4.2は、ランダムサンプリング法による事故発生頻度の分布を示すが、分布の形が対数正規分布によく乗っている。

(2) タイプ1の機器が2個(B004,B039)からなるシステムについてランダムサンプリング法により不確実さ解析をした結果をTable 4.3に、さらにタイプ2の機器(B071)を追加したシステム(Table 3.1にその信頼性データを示すひな型モデルからタイプ3を除いたもの)について解析した結果をTable 4.4に示す。要素MC法による結果を見ると、機器の数が多くなり複雑になるにつれて事故発生頻度の不確実さの

広がり、すなわちエラーファクターの値が大きくなるが、機器の倍数に比例して広がるわけではない。入力する故障率データのエラーファクターに対して、ひな型モデルの場合でも2倍程度の広がりである。また、猶予時間を0hと10hにさせても事故発生頻度のエラーファクターの広がりにそれほど違いを与えない。一方、FTLの解析結果では、明らかに過大な分散の値が得られることが分かる。Fig.4.3からFig.4.5までは、ランダムサンプリング法による事故発生頻度の分布を示すが、分布の形がよく対数正規分布に乗ることを示している。

(3) 要素MCランダムサンプリング法による解析結果と、 λ の値の一組をランダムサンプリング法を用いて求め、頂上事象の発生頻度はFTLによって求めた解析結果の比較をTable 4.5に示す。これを見ると、これらの方法によるエラーファクターの解析値の違いは認められない。すなわち、 λ の確率密度関数からランダムサンプリングにより1つずつ値を取り出して ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) の組を作った後、頂上事象の発生確率を求めるときにミニマルカットセットに基づく確率計算式に代入して直接求める方法と、要素MC法により求める方法では、事故発生頻度の不確実さ解析結果に有意な差はないということが言える。

Table 4.1 Reliability data for components used for uncertainty analysis.

Basic event	Type number	Reliability data
B004	1	Failure rate ; 0.15×10^{-3} (1/h) [1.31(1/y)] MTTR ; 24.0(h)
B039	1	Failure rate ; 0.15×10^{-3} (1/h) [1.31(1/y)] MTTR ; 48.0(h)
B071	2	Failure rate ; 0.10×10^{-3} (1/h) [0.88(1/y)] MTTR ; 8.0(h) Inspection period ; 720.0(h)

Table 4.2. Simulated results for the sequence of one basic event (Type 1).

(Sampling times of λ) \times (Histories of a λ)	No. of basic event	Input data for error factor of λ	Mean frequency of accident occurrence (1/y)	Standard deviation of accident frequency (1/y)	Error factor of accident occurrence frequency	CPU* time (s)
1000 \times 1000	1	2.0	1.338	0.591	2.00	18.2
1000 \times 1000	1	3.0	1.350	1.010	2.99	18.0
FTL	1	3.0	1.309	2.192	6.69	-

* Note; CPU time with SUN Sparc-station

Table 4.3. Simulated results for the sequence of two basic events.

(Sampling times of λ) \times (Histories of a λ)	No. of basic event	Grace time (h)	Input data for error factor of λ 's	Mean frequency of accident occurrence (1/y)	Standard deviation of accident frequency (1/y)	Error factor of accident occurrence frequency	CPU* time (s)
1000 \times 1000	2	0	2.0	1.343×10^{-2}	7.898×10^{-3}	2.45	2810
1000 \times 1000	2	0	3.0	1.366×10^{-2}	1.837×10^{-2}	5.32	3712
FTL	2	0	3.0	1.404×10^{-2}	3.559×10^{-2}	10.3	-
1000 \times 1000	2	10	2.0	7.418×10^{-3}	5.224×10^{-3}	2.84	5138
1000 \times 1000	2	10	3.0	7.341×10^{-3}	7.792×10^{-3}	4.17	6571

* Note; CPU time with SUN Sparc-station

Table 4.4. Simulated results for the sequence of three basic events.

(Sampling times of λ) \times (Histories of a λ)	No. of basic event	Grace time (h)	Input data for error factor of λ 's	Mean frequency of accident occurrence (1/y)	Standard deviation of accident frequency (1/y)	Error factor of accident occurrence frequency	CPU* time (s)
500 \times 500	3	0	2.0	5.167×10^{-4}	4.276×10^{-4}	3.28	28847
500 \times 500	3	0	3.0	4.912×10^{-4}	7.328×10^{-4}	5.93	48278
FTL	3	0	3.0	4.981×10^{-4}	2.739×10^{-3}	11.1	-
500 \times 500	3	10	2.0	2.850×10^{-4}	2.276×10^{-4}	3.18	52795
500 \times 500	3	10	3.0	2.661×10^{-4}	4.093×10^{-4}	6.27	

* Note; CPU time with SUN Sparc-station

Table 4.5 Comparison of results of uncertainty analyses by the MC method with those by the deterministic method.

Method to obtain accident frequency	Times for sampling λ × Histories for a particular λ	No. of event	Grace time (h)	Error factor input for each λ	Mean frequency of accident occurrence MFAO(1/Y)	Standard deviation for MFAO (1/Y)	Error factor analyzed for MFAO
Monte Carlo	1000×1000	1	0	2.0	1.338	0.591	2.00
Deterministic	10000×-	1	0	2.0	1.301	0.566	1.98
Monte Carlo	1000×1000	1	0	3.0	1.350	1.010	2.99
Deterministic	10000×-	1	0	3.0	1.296	0.952	2.95
Monte Carlo	1000×1000	2	0	2.0	1.343×10^{-2}	7.898×10^{-3}	2.45
Deterministic	10000×-	2	0	2.0	1.395×10^{-2}	8.963×10^{-3}	2.63
Monte Carlo	1000×1000	2	0	3.0	1.366×10^{-2}	1.837×10^{-2}	5.32
Deterministic	10000×-	2	0	3.0	1.383×10^{-2}	1.601×10^{-2}	4.55
Monte Carlo	1000×1000	2	10	2.0	7.418×10^{-3}	5.224×10^{-3}	2.84
Monte Carlo	1000×1000	2	10	3.0	7.341×10^{-3}	7.792×10^{-3}	4.17
Monte Carlo	500×500	3	0	2.0	5.167×10^{-4}	4.276×10^{-4}	3.28
Deterministic	10000×-	3	0	2.0	9.823×10^{-4}	8.074×10^{-4}	3.26
Monte Carlo	500×500	3	0	3.0	4.912×10^{-4}	7.328×10^{-4}	5.93
Deterministic	10000×-	3	0	3.0	9.634×10^{-4}	1.559×10^{-3}	6.46
Monte Carlo	500×500	3	10	2.0	2.850×10^{-4}	2.276×10^{-4}	3.18
Monte Carlo	500×500	3	10	3.0	2.661×10^{-4}	4.093×10^{-4}	6.27

*: One event is of B004, Two events are of B004 and B039, Three events are of B004, B039 and B071.

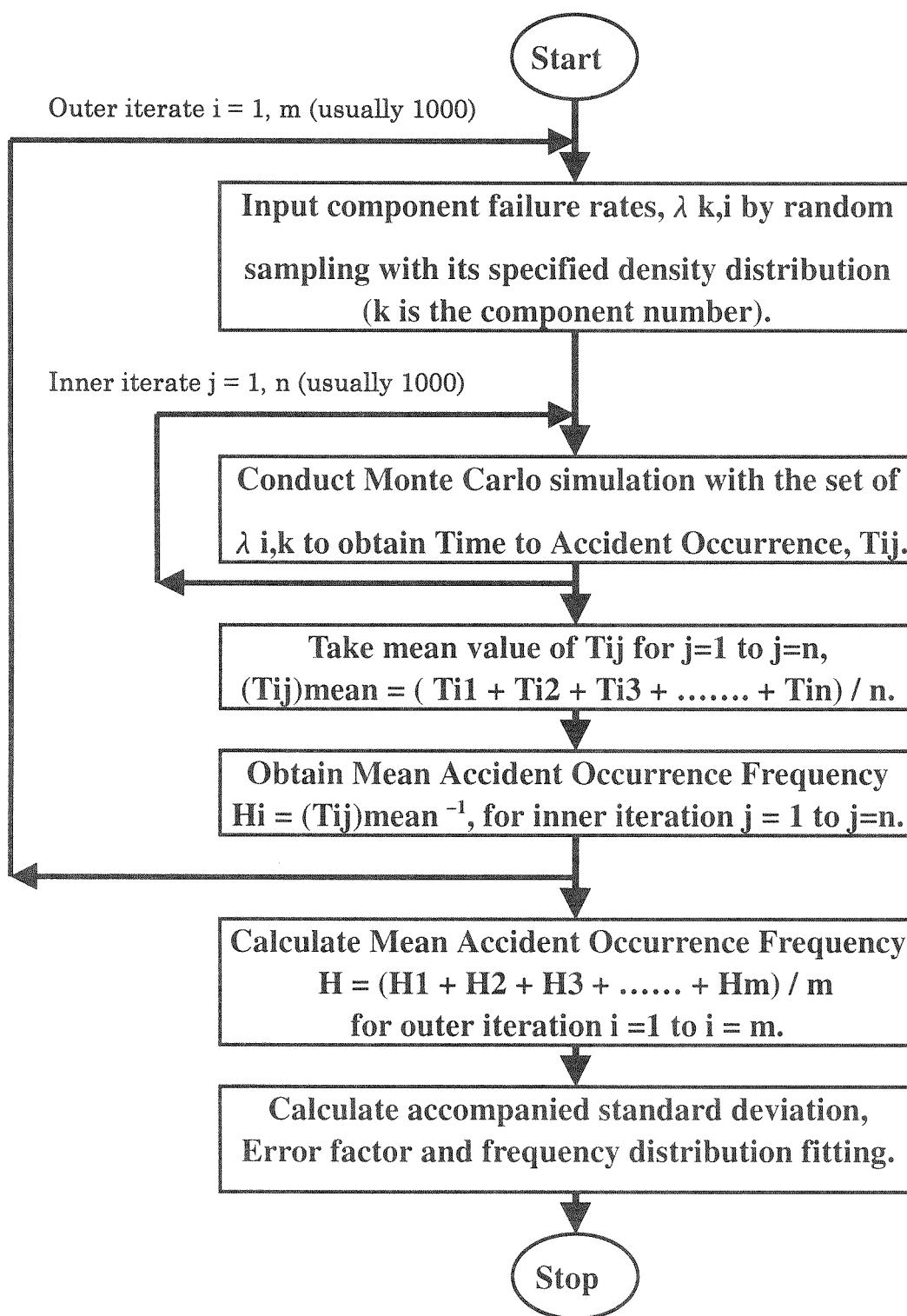


Fig.4.1 Component Monte Carlo simulation scheme for reliability data uncertainty analysis.

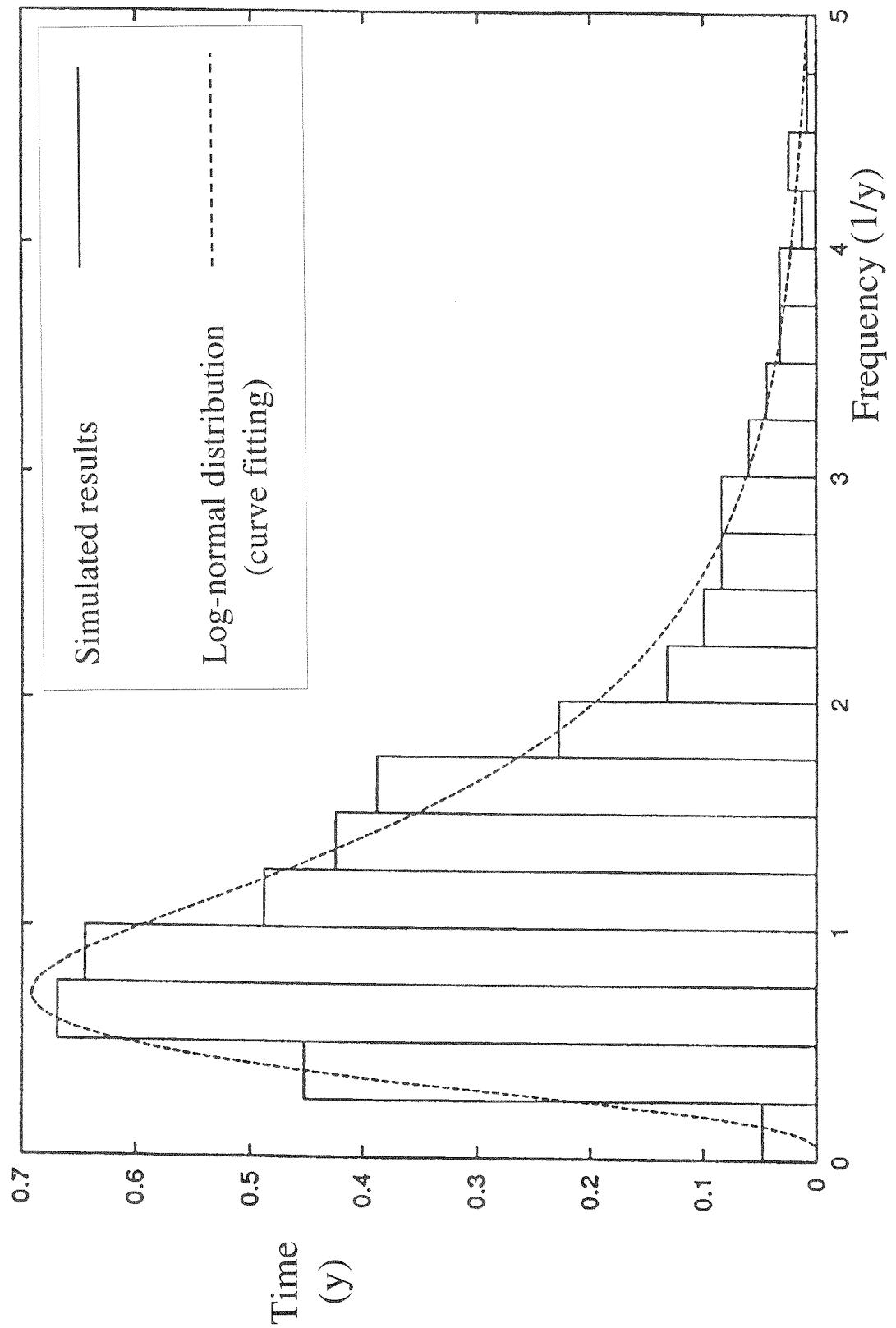


Fig. 4.2 Distribution of accident occurrence frequency for one component model with grace time 0 and an error factor 3.0 assigned.

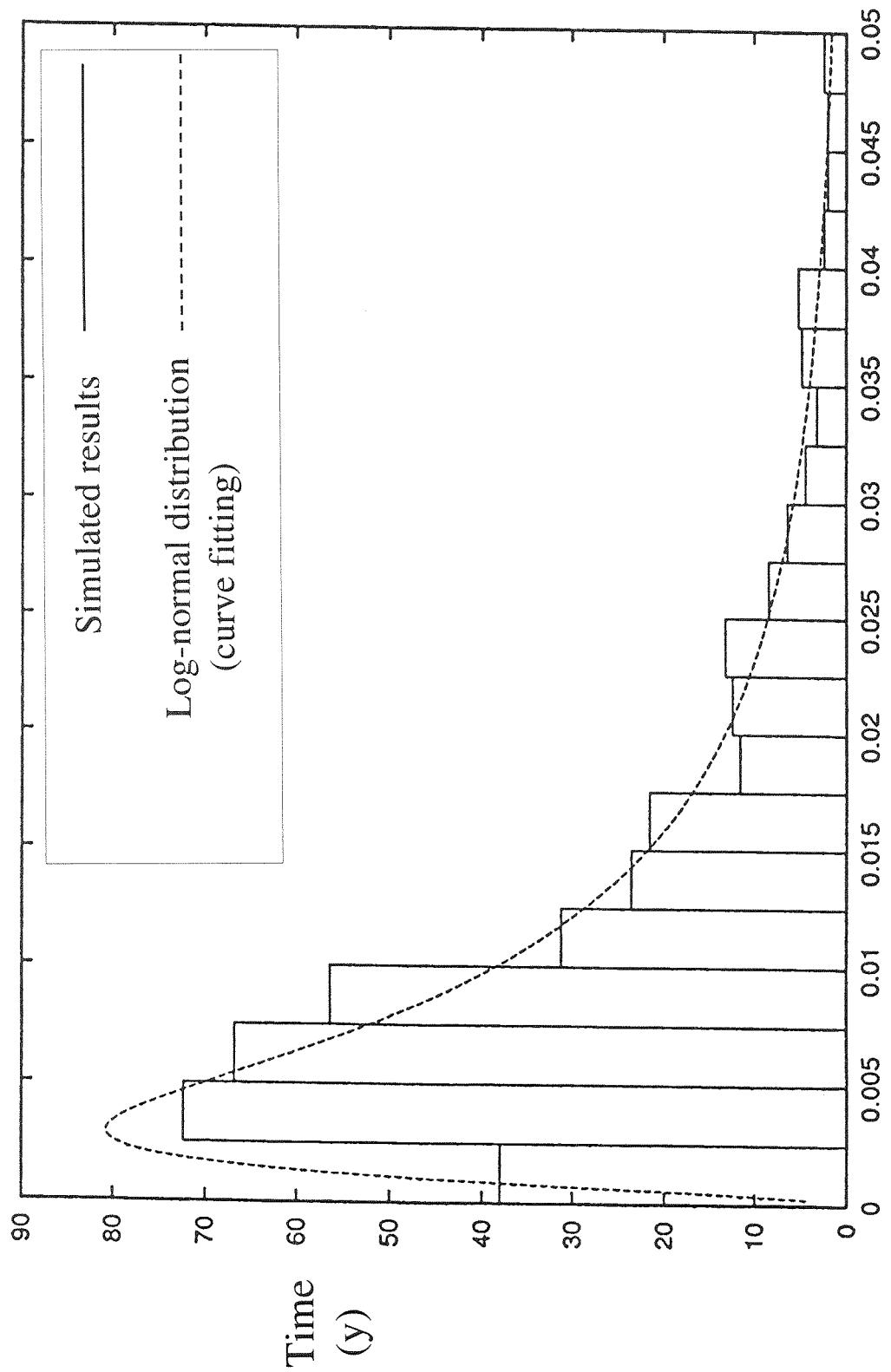


Fig. 4.3 Distribution of accident occurrence frequency for two components model with grace time 0 and error factors 3.0 assigned.

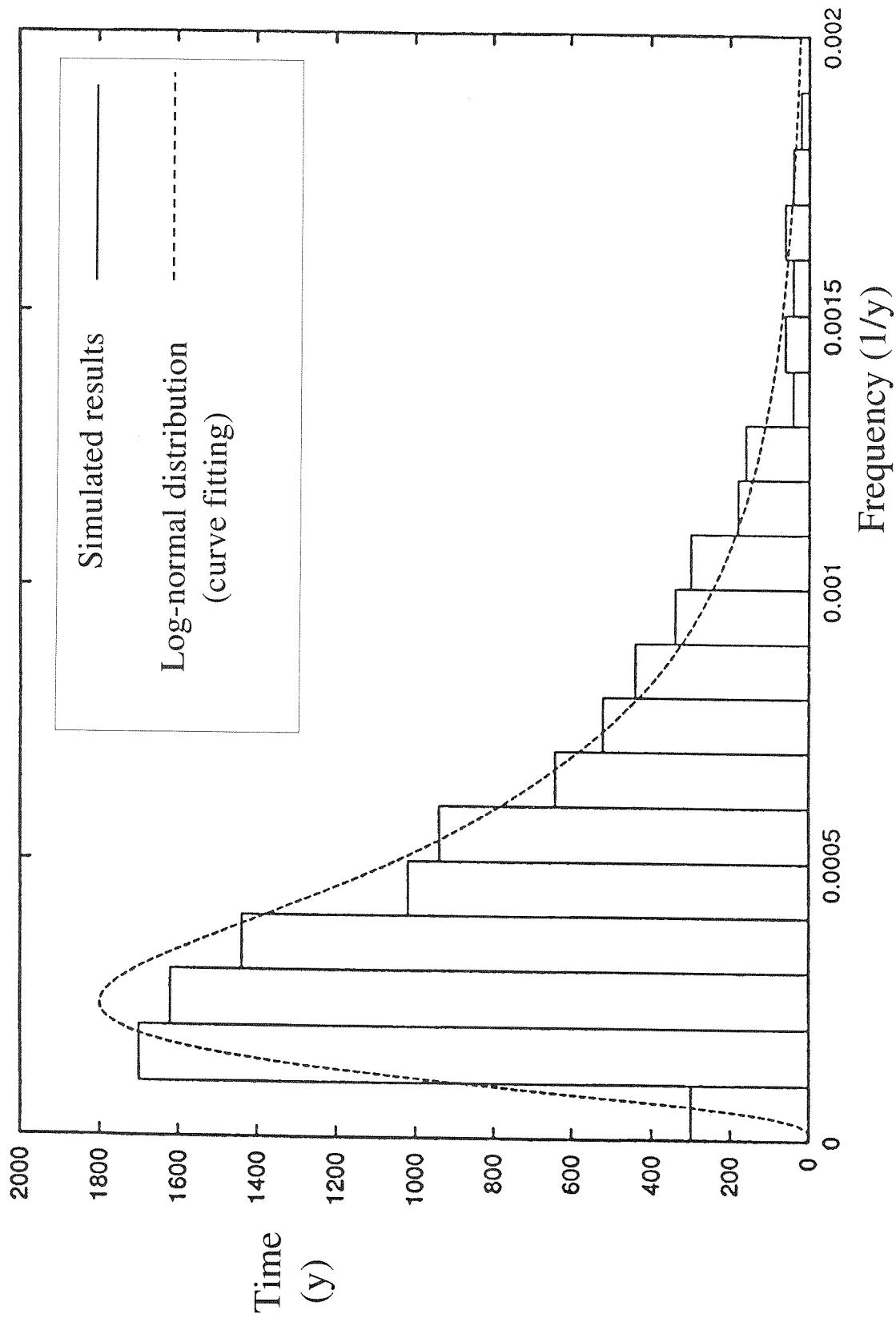


Fig. 4.4 Distribution of accident occurrence frequency for prototype model with grace time 0 and error factors 2.0s assigned.

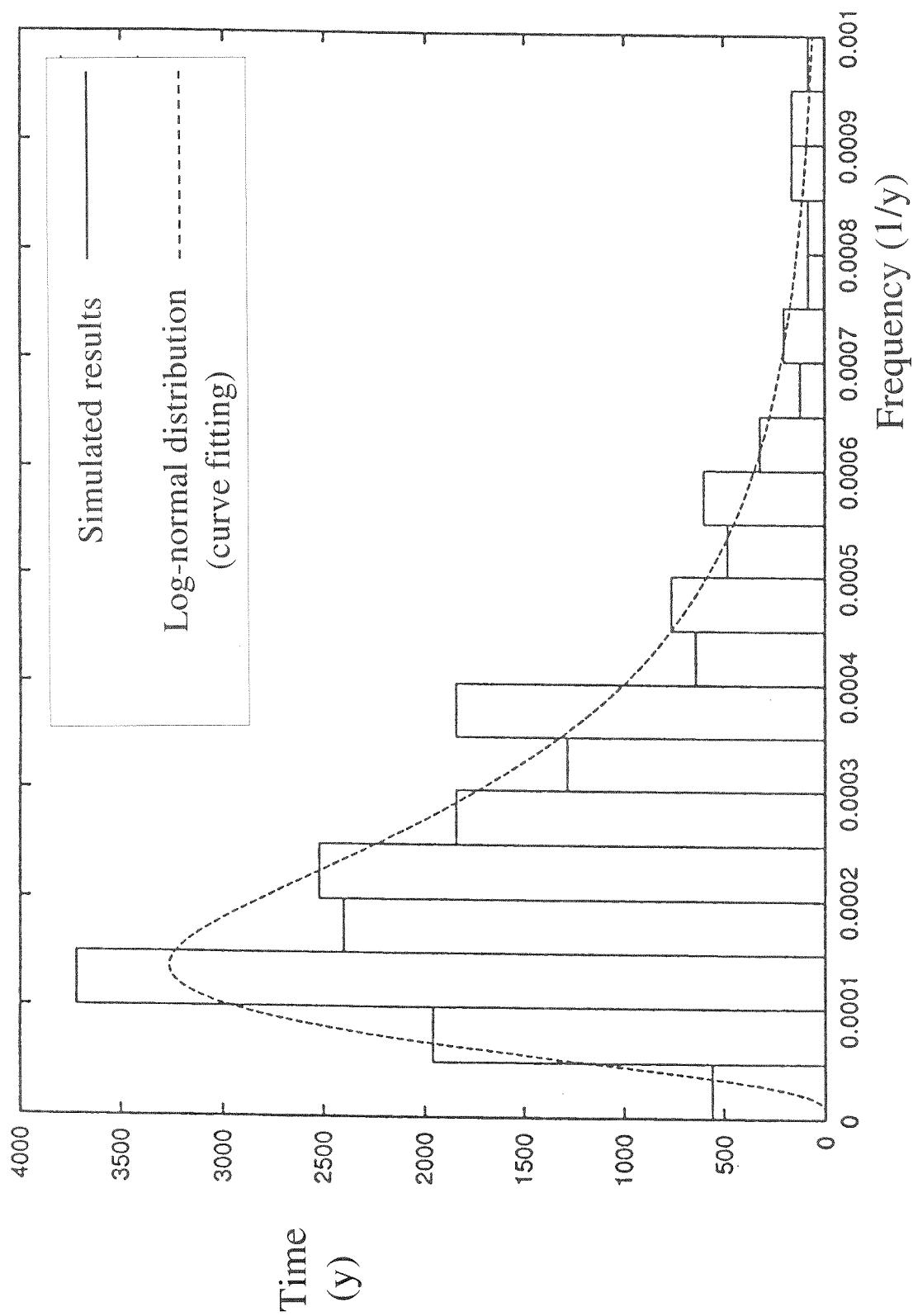


Fig. 4.5 Distribution of accident occurrence frequency for prototype model with grace time 10 h and error factors 2.0s assigned.

5. 複雑なプラントシステムへの適用

第3章では、簡単なサンプル問題として再処理施設のレッドオイル爆発に至る一つのカットセットを取り上げて解析した。実際には、一つの事故モードについて多くの異なる機器の故障の組み合わせからなる多数の事故シーケンスの関与が考えられる。また、これらの故障状態が継続して、ある一定の時間的余裕を経過してから事故に進展する可能性もある。従って、このような複雑な構成、様相を呈する実際のプラントシステムの事故発生頻度を求めるためには、多くのカットセットを解析し、かつそれぞれのカットセットの構成要素の時間的余裕を考慮する必要がある。

実際のプラントシステムの信頼性解析において、従来のFT解析では、はじめに定性的解析により多数のカットセットを同定し、次にそれぞれのカットセットについてFTの頂上事象の発生頻度を定量的に求め、最終的にその総和をとってシステムの事故発生頻度とする。MC法ではカットセットについて別々にシミュレーション解析するのは非効率的なので、実際のプラント運転状態における時間的経過を想定して、システムに存在する多数の機器・装置の故障発生・回復の挙動を満遍なくチェックし、それらの故障状態の重合のある組み合わせを検出して、あるカットセットに対応する事故発生の有無を判定するようとする。このようなシミュレーション・アルゴリズムの採用により、多数の機器・装置が関与する多くのカットセットも同時にランダムサンプリングすることにより計算時間の短縮化も図られ、要素MC法開発の本来の目的とする、実際のプラント運転に沿ったシステムの事故発生シミュレーションが可能となる。

5.1 シミュレーションのための基本的アルゴリズムの構築

今ここに、タイプ1またはタイプ2の機器B1,B2,B3から構成されるシステムがあり、2個のカットセット(B1&B2)と(B1&B3)が事故発生に関わる事故シーケンスとして同定されたものとしよう。これらを同時にランダムサンプリングして事故発生頻度を求めるには、次のようなアルゴリズムを考える。ただし、説明の簡単化のため猶予時間は0と仮定する。

- (1) B1,B2,B3のランダムサンプリングにより、それぞれの故障時刻T1,T2,T3

及び修復時刻 S_1, S_2, S_3 を求める。

- (2) (B1&B2) のカットセットを考えると、事故が発生している（機器の故障状態の重なる）時間は、次の不等式で表される。

$$\max(T_1, T_2) < \text{Time} < \min(S_1, S_2) \quad (5.1)$$

従って、 $\max(T_1, T_2) > \min(S_1, S_2)$ のときは事故は発生せず、事故発生の時刻は $\max(T_1, T_2)$ かそれより先である。(B1&B3) のカットセットについても同様である。

ここで、機器 B1 について考えてみる。

もし、 $S_1 < \max(T_1, T_2)$, $S_1 < \max(T_1, T_3)$ が成立すれば、B1 の機器が故障している期間 ($T_1 \sim S_1$) は、システム全体として事故は発生していない。このため、この場合には機器 B1 に対してランダムサンプリングを行い、 T_1, S_1 を更新する。

次に、機器 B2 について考えてみる。

もし、 $S_2 < \max(T_1, T_2)$ が成り立っていれば、機器 B2 が故障している期間 ($T_2 \sim S_2$) の間は、システム全体として事故は発生していない。このため、機器 B2 に対してランダムサンプリングを行い、 T_2, S_2 を更新する。

さらに、機器 B3 について考えてみる。

もし、 $S_3 < \max(T_1, T_3)$ が成り立っていれば、機器 B3 が故障している期間 ($T_3 \sim S_3$) の間は、システム全体として事故は発生していない。このため、機器 B3 に対してランダムサンプリングを行い、 T_3, S_3 を更新する。

- (3) 上記(2)の操作を $\max(T_1, T_2) < \min(S_1, S_2)$, $\max(T_1, T_3) < \min(S_1, S_3)$ のいずれかが成り立つまで繰り返す。なお、このいずれかが成立する最初の時刻が、このシミュレーション試行に対する事故発生時刻である。

5.2 サンプル問題の記述

上で述べたシミュレーションのアルゴリズムにより要素MC法計算プログラムを作成して、実際のプラントの機器構成に近いモデルを対象としたサンプル問題を設定して解析する。サンプル問題は、10数年前ドイツのPSEプロジェクトで安全性解析手法の開発のためのモデルとなった、年間350トンの使用済ウラン燃料処理能力規模の再処理施設⁽⁷⁾を対象とする。ここでは、プルトニウム蒸発缶のレッドオイル爆発事故に至る事故発生頻度を解析する。解析に関与する主要な系統は、Fig. 5.1に示すような蒸発缶に至るプルトニウム精製サイクルである⁽⁵⁾。レッドオイル爆発事故を頂上事象とするFTをFig. 5.2～Fig. 5.8に示す。

Fig. 5.2を見ると蒸発缶に有機溶媒がキャリオーバーする原因の一つのグループとしてゲートG004に集まる一連の機器・装置の故障がある。これには、ミキサセトラPPBKの液液界面制御装置の故障(B004)を引き金として、これによる警報の不発信(B019)あるいは警報発信への運転員対応なし(B058)が重なり有機溶媒が水相流に同伴して流出する。次に、プルトニウム硝酸水溶液を一時的に貯留する中間槽POBKA及び引き続く中間槽POBKBにおける溶液密度測定による有機溶媒検出の失敗(B009, B010)、さらには分析槽POBKPAにおける溶液密度測定失敗(B011)とサンプリング組成分析系統使用不可による有機溶媒検出の失敗(B023)が重なり、プルトニウム蒸発缶内部に水相に伴った有機溶媒が蓄積する。ここで、B023の代替として、分析槽POBKPAでの攪拌機故障(B024)、サンプリングエラー(B025)、分析結果の記載ミス(B026)、分析結果を待たずに溶液移送(B027)、分析結果不合格にも拘わらず溶液移送(B028)の内の一つが考えられる。以上は、ミキサセトラでの機器故障を起因事象と考えたが、パルスカラムでの通過量制御系故障(B013)及びこれに対する運転員対応操作忘れ(B018)を起因事象とする一連の事故シーケンスが考えられる。

Fig. 5.2のG004と並び、もう一つの蒸発缶への有機溶媒キャリオーバーの原因のグループとしてゲートG005に集まる一連の機器・装置の故障がある。これには、中間槽POBKA水位制御系の故障(B031)及び中間槽POBKB水位制御系の故障(B032)、中間槽POBKAの水位制御系の故障が中間槽POBKBにおける故障以前にすでに故障している確率(B029)、分析槽POBKPAにおけるサンプリング組成分析系統使用不可による有機溶媒検出の失敗(B023)が重なり、蒸発缶における溶媒蓄積が進む。ここで、上と同

様に、B023の代替として、B024, B025, B026, B027, B028のうちの一つが考えられる。ここで、B031とB032がそれぞれ独立に同時生起する代わりに、ひとつの共通原因故障(B030)が生起することも考えられる。

蒸発缶における有機溶媒蓄積と相前後して、レッドオイル爆発の事故原因あるいは補助要因を形成するものに蒸発缶加熱・温度制御系統の異常が考えられる。これは、Fig. 5.2 の F T に示すゲートG003に集まる一連の機器故障の重なりである。すなわち、熱交換器BC001における1次側スチーム配管腐食による高温水蒸気の2次側への流入(B039)及び蒸発缶における温度制御監視系の故障(B071)、さらには内部温度及び溶液密度の異常を検出したが対応操作なく(B054)、また蒸発缶の運転を自動的に停止する系統の故障(B053)が重なり、蒸発缶は過熱されたまま温度制限値(約135°C)を越えて運転が続行される。ここで、B039とB071の代わりに、高温水供給系の共通原因故障(B042)が考えられる。

このようにして、蒸発管内部にプルトニウム水溶液を含んだ有機溶媒が、過熱された状態で運転が継続され、ある一定の時間(猶予時間)が経過するとレッドオイルに変質して爆発すると考えられる。

5.3 サンプル問題の解析と結果の考察

(1) 猶予時間無しの計算

F T 解析コードF T Lによりサンプル問題を解析して、抽出されたカットセット約100個の内より、上位9個を選定して猶予時間0とした場合についてモンテカルロシミュレーションを行い、事故発生頻度を求める。なお、この上位9個までの事故発生頻度解析結果を合計したものは、全カットセットに対する事故発生頻度の総計の約80%を占める。Table 5.1 に上位9個のカットセットに関する全ての基本事象と、関連する信頼性パラメータの値を示す。また、Table 5.2 は、これらのカットセットのそれぞれについて構成要素となる基本事象を並べて示す。

Table 5.3 に猶予時間を考慮しない場合について、F T Lによる計算結果とモンテカルロシミュレーション計算結果を比較して示す。モンテカルロ計算は、5.1節に述べたアルゴリズムにより9個のカットセットを1度にシミュレーションした場合と、各カットセットごとにシミュレーションした場合の結果を並べて示す。ここに示すように、カットセットに対する3種類の計算結果は、ほぼ同一の値が得られ

た。モンテカルロシミュレーションに要する計算時間は、1度に計算する場合が、各カットセットごとに計算する場合に比べて約10分の1と大幅に少なくなっている。これは、1度に計算する場合は、合計ヒストリー数200,000を与えたとき、各カットセットのヒストリー数が事故発生頻度の大きさにはほぼ比例して自動的に割り振られたのに対して、各カットセットごとに計算する場合は、同一の精度を得るためにそれぞれヒストリー数100,000を与えたためである。

モンテカルロ法で1度に計算する場合、元々事故発生頻度が小さいカットセットに対してはヒストリー数が少ないため、計算精度が充分でない。しかし、このカットセットに対しては事故発生頻度が小さいために、全体のカットセットに対する事故発生頻度への影響は小さい。従って、この場合、事故発生頻度が小さいカットセットに対してヒストリー数は少なくなるが、全体の計算精度を落とすことになるわけではなく、Table 5.3に示したように、むしろ計算時間を大幅に節約するメリットが認められる。

Table 5.4 にモンテカルロ法で1度に計算した場合の、各カットセットごとの事故発生時間の平均値と標準偏差の値をそれらの比と共に示す。前にも説明したように、これらの比が全て約1.0に収れんしているのは、これらカットセットごとの事故発生時間の分布が指數分布になることを示す。

(2) 猶予時間をパラメータとした計算

猶予時間を0, 10h, 30hとしたモンテカルロ法シミュレーション解析結果をTable 5.5 に示す。これらは合計ヒストリー数100,000を与えて全てのカットセットを一度に計算した結果である。猶予時間0については、合計ヒストリー数を200,000とした計算結果の方がTable 5.3 に示したように精度よいが、その違いは僅かである。カットセットの種類によって変化割合は多少異なるものの、猶予時間が長くなるに従って事故発生頻度は一様に減少してゆくことが分かる。また、計算時間は、ペンティアム MMX1.33MHzのパーソナルコンピューターを使用して、猶予時間30hの計算ケースで約400秒であり実用性を問題とするほどでもない。

(3) 猶予時間、滞留時間及び機器故障修復時間をパラメータとした計算

猶予時間に加えてプロセスの滞留時間、さらにこれらに直接関わる機器故障修復時間を考慮すると、レッドオイル爆発事故の発生頻度計算値にどのような変化が現れるかを調べる。このため、Table 5.2 に示したもの内、カットセットN0.6を取

り上げて解析してみる。これは、B004, B058, B009, B010, B011, B023, B042, B053, B054 の 9 個の基本事象からなるカットセットである。カットセットNo. 6に関する事故シナリオは、次のように記述される。

Fig. 5.1に示したように、ミキサセトラ界面制御系の故障が発生(B004)して、警報発生にも拘わらず運転員が適切に対応しなかった(B058)とき、有機溶媒が水相に同伴して流出する。この場合、ミキサセトラ界面制御系の故障が復旧しても、その間に流出した有機溶媒は中間槽の方へ進むので、ここでは、B058の回復による事故の収束は考慮しない（そのMTTRを10000hとする-Table 5.1参照）。中間槽POBKAに入った有機溶媒を含む水溶液は、密度計故障による有機溶媒検出失敗(B009)してから、バッチ運転のため一定の時間のあいだ滞留した後、中間槽POBKBに送られる。中間槽POBKBにおいても、同様に、有機溶媒の検出失敗(B010)後、一定の滞留時間経過してから、分析槽POBKPAに送られる。ここでも密度測定による有機溶媒検出に失敗(B011)して、さらにサンプリング分析しようとしたが分析装置の使用不可によりできなく(B023)、一定の滞留時間後に有機溶媒を含んだ水溶液はそのまま蒸発缶に送られる。この時、熱交換器が故障発生(B042)し、それによる自動停止系も作動(B053)せず、また修正動作もない(B054)ならば、蒸発缶において温度制限値135°Cを越えた過熱状態が続き、一定の猶予時間経過後に、有機溶媒はレッドオイルに変質して加速度的な反応（爆発）が発生する。ここで、熱交換器の故障修復に関わる平均時間を8hとし、B054,B053に関わる修復は無いもの(MTTR=10000h)とする。Fig. 5.9に、複数の機器故障が発生し、これらの異常事象がシーケンス的に繋がって爆発事故に進展する様子を模式的に示す。

上に述べた事故シナリオにおいて、中間槽及び分析槽のバッチ運転に関わる滞留時間(Stagnant Time)をそれぞれ5h, 10h、レッドオイル変質までの猶予時間(Grace Time)を0, 30hと仮定し、さらに、B009,B010,B011に関して密度計の故障に気づいた運転員が修復作業にはいるまでの平均時間(MTTR)を10h, 30hの2通り（同時に同じ値を取るものとする）を考慮して、要素MC法によりシミュレーション解析する。また、Fig. 5.9に示すように、この事故シーケンスにおいては、ミキサセトラ界面制御系の故障発生(B004)と熱交換器の故障発生(B042)の両方が起因事象となることが考えられる。比較のため、B004及びB042の両方をタイプ1機器とする場合と、B004がタイプ1でB042がタイプ3とする場合に分けて解析する。解析に必要となる基本事象の信頼性データをTable 5.6 に、また、猶予時間と滞留時間をパラメータと

した計算ケースの組み合わせをTable 5.7及びTable 5.8に示す。

B042をタイプ3機器とする場合の解析結果をTable 5.9に示す。これを見ると、滞留時間あるいは猶予時間が長くなるほど事故発生頻度が少なくなり、滞留時間と猶予時間が一定の場合には修復時間が長いほど事故発生頻度は多くなる。また、これらの計算では、計算時間が事故発生頻度の値にほぼ反比例している。

B042をタイプ1機器とする実際に近いプラントシステムを考慮する場合の解析結果をTable 5.10に示す。これを見ると、猶予時間、滞留時間、修復時間の組み合わせが同一のTable 5.9のケースと比較すると、基本的にタイプ1の機器が2個存在する場合(前者)には機器故障の重なる頻度が少なく、従って事故発生頻度も2桁から3桁少なくなることが分かる。その他、Table 5.9と同様、滞留時間あるいは猶予時間が長くなるほど事故発生頻度が少なくなり、滞留時間と猶予時間が一定の場合には修復時間が長いほど事故発生頻度は多くなる。

Table 5.1 Reliability data for basic events.

Basic Event	Type No.	Failure rate (1/h) or Error Probability	Mean Time to Repair (MTTR) (h)
B004	1	1.50×10^{-4} (1/h)	24.0
B009	3	0.95	10000.
B010	3	0.95	10000.
B011	3	0.95	10000.
B013	1	1.50×10^{-4} (1/h)	24.0
B018	3	0.01	10000.
B023	3	0.013	10000.
B025	3	3.0×10^{-3}	10000.
B026	3	3.0×10^{-3}	10000.
B027	3	3.0×10^{-3}	10000.
B028	3	3.0×10^{-3}	10000.
B029	3	0.5	10000.
B030	1	1.50×10^{-5} (1/h)	24.
B031	1	1.50×10^{-5} (1/h)	24.
B032	1	1.50×10^{-5} (1/h)	24.
B042	3	1.00×10^{-5}	10000.
B053	3	9.70×10^{-3}	10000.
B054	3	0.1	10000.
B058	3	0.01	10000.
B068	1	5.0×10^{-7} (1/h)	24.

Table 5.2 Write down of minimal cut-sets.

Minimal Cut-set I.D.	Basic Event Sequence					
1	B030	B042	B054	B029	B053	B023
2	B030	B042	B054	B029	B053	B028
3	B030	B042	B054	B029	B053	B027
4	B030	B042	B054	B029	B053	B025
5	B030	B042	B054	B029	B053	B026
6	B004 B010	B042 B011	B054 B058	B053	B023	B009 B018
7	B013 B009	B042 B011	B054 B010	B053	B023	B018
8	B031 B023	B032	B042	B054	B029	B053
9	B068	B042	B054	B053	B023	

Table 5.3 Calculated results for mean frequency of accident occurrence (MFAO) with grace time = 0.

Minimal Cut-set I.D.	By Fault Tree code FTL	Once through calculation by MC code TITAN		Each cut-set calculation by MC code TITAN	
		MFAO(1/y)	Histories	MFAO(1/y)	Histories
1	8.282×10^{-12}	8.346×10^{-12}	83731	8.318×10^{-12}	100000
2	1.911×10^{-12}	1.930×10^{-12}	19110	1.908×10^{-12}	100000
3	1.911×10^{-12}	1.886×10^{-12}	19189	1.908×10^{-12}	100000
4	1.911×10^{-12}	1.908×10^{-12}	19224	1.908×10^{-12}	100000
5	1.911×10^{-12}	1.894×10^{-12}	19063	1.908×10^{-12}	100000
6	1.416×10^{-12}	1.399×10^{-12}	14064	1.414×10^{-12}	100000
7	1.416×10^{-12}	1.401×10^{-12}	14033	1.414×10^{-12}	100000
8	5.922×10^{-13}	5.983×10^{-13}	5994	5.906×10^{-13}	100000
9	5.523×10^{-13}	5.733×10^{-13}	5592	5.514×10^{-13}	100000
Total	1.990×10^{-11}	1.993×10^{-11}	200000	1.992×10^{-11}	900000
CPU time*		63 (s)		575 (s)	

*) CPU times are for a Pentium MMX133MHz personal computer.

Table 5.4 Once through calculated results of MFAO, MTAO, SD and ratios of SD/MTAO.

Minimal Cut-set I.D.	Once through calculation by MC code TITAN		Mean Time Accident Occurrence (MTAO) (y)	Standard Deviation (SD) (y)	SD/MTAO
	MFAO (1/y)	Histories			
1	8.346×10^{-12}	83731	$5.016 \times 10^{+10}$	$4.993 \times 10^{+10}$	0.9953
2	1.930×10^{-12}	19110	$4.950 \times 10^{+10}$	$4.963 \times 10^{+10}$	1.003
3	1.886×10^{-12}	19189	$5.088 \times 10^{+10}$	$5.122 \times 10^{+10}$	1.007
4	1.908×10^{-12}	19224	$5.039 \times 10^{+10}$	$5.009 \times 10^{+10}$	0.9941
5	1.894×10^{-12}	19063	$5.032 \times 10^{+10}$	$5.052 \times 10^{+10}$	1.004
6	1.399×10^{-12}	14064	$5.025 \times 10^{+10}$	$5.054 \times 10^{+10}$	1.006
7	1.401×10^{-12}	14033	$5.010 \times 10^{+10}$	$4.978 \times 10^{+10}$	0.9937
8	5.983×10^{-13}	5994	$5.009 \times 10^{+10}$	$4.902 \times 10^{+10}$	0.9785
9	5.733×10^{-13}	5592	$4.877 \times 10^{+10}$	$4.898 \times 10^{+10}$	1.004
Total	1.993×10^{-11}	200000	$5.017 \times 10^{+10}$	$5.008 \times 10^{+10}$	0.9982

Table 5.5 Calculated results for MFAO(Mean Frequency of Accident Occurrence) with grace time changed.

Minimal Cut-set I.D.	MFAO(1/y) by Fault tree Code FTL	Once through calculation by TITAN (grace time = 0)		Once through calculation by TITAN (grace time = 10)		Once through calculation by TITAN (grace time = 30)	
		MFAO(1/y)	Hist.	MFAO(1/y)	Hist.	MFAO(1/y)	Hist.
1	8.282×10^{-12}	8.291×10^{-12}	41690	5.490×10^{-12}	42042	2.385×10^{-12}	42560
2	1.911×10^{-12}	1.908×10^{-12}	9551	1.255×10^{-12}	9716	5.527×10^{-13}	9734
3	1.911×10^{-12}	1.897×10^{-12}	9716	1.252×10^{-12}	9715	5.493×10^{-13}	9695
4	1.911×10^{-12}	1.923×10^{-12}	9731	1.255×10^{-12}	9710	5.471×10^{-13}	9813
5	1.911×10^{-12}	1.901×10^{-12}	9585	1.230×10^{-12}	9586	5.412×10^{-13}	9819
6	1.416×10^{-12}	1.378×10^{-12}	7000	9.252×10^{-13}	7146	4.061×10^{-13}	7270
7	1.416×10^{-12}	1.381×10^{-12}	6922	9.528×10^{-13}	7257	4.099×10^{-13}	7338
8	5.922×10^{-13}	6.079×10^{-13}	3003	2.541×10^{-13}	1942	5.151×10^{-14}	868
9	5.523×10^{-13}	5.678×10^{-13}	2802	3.743×10^{-13}	2886	1.628×10^{-13}	2903
Total	1.990×10^{-11}	1.985×10^{-11}	10^5	1.299×10^{-11}	10^5	6.581×10^{-12}	10^5
CPU Time*		32 (s)		57 (s)		396 (s)	

*) CPU times are for a Pentium MMX133MHz personal computer.

Table 5.6 Reliability data of basic events in Cut-set No.6 for parameter change survey calculation.

Basic Event	Type No.	Failure Rate (1/h) or Error Probability	Mean Time To Repair (h)
B004	1	1.5×10^{-4} (1/h)	24
B009	3	0.95	10 or 30
B010	3	0.95	10 or 30
B011	3	0.95	10 or 30
B023	3	0.013	10000
B042(1)	3	1.0×10^{-5}	10000
B042(2)	1	2.0×10^{-8} (1/h)	8
B053	3	9.7×10^{-3}	10000
B054	3	0.1	10000
B058	3	0.01	10000

Table 5.7 Combination of parameter change for calculation cases with B042(1) (type 3).

Case ID.	Stagnant Time (h) For POBKA/B and POBKPA tanks	Grace Time (h)	MTTR (h) for B009,B010,B011
1	0	0	1 0
2	0	3 0	1 0
3	0	3 0	3 0
4	5	0	1 0
5	5	0	3 0
6	5	3 0	1 0
7	5	3 0	3 0
8	1 0	0	1 0
9	1 0	0	3 0
1 0	1 0	3 0	3 0

Table 5.8 Combination of parameter change for calculation cases with B042(2) (type 1).

ケース No.	Stagnant Time (h) For POBKA/B and POBKPA tanks	Grace Time(h)	MTTR(h) for B009,B010,B011
1	0	0	1 0
2	0	3 0	3 0
3	5	0	1 0
4	5	0	3 0
5	1 0	0	3 0

Table 5.9 Calculated results of parameter change survey
for calculation cases with B042(1) (type 3).

Case I.D.	Histories	MFAO (1/y)	MTAO (y)	Standard Deviation (y)	Ratio	CPU * Time (s)
1	10000	1.143×10^{-12}	$6.991 \times 10^{+11}$	$7.039 \times 10^{+11}$	1.007	-
2	1000	6.862×10^{-17}	$1.457 \times 10^{+16}$	$1.487 \times 10^{+16}$	1.021	224
3	10000	2.926×10^{-14}	$3.418 \times 10^{+13}$	$3.525 \times 10^{+13}$	1.031	5
4	10000	2.946×10^{-14}	$3.394 \times 10^{+13}$	$3.418 \times 10^{+13}$	1.007	6
5	10000	2.681×10^{-12}	$3.730 \times 10^{+12}$	$4.042 \times 10^{+12}$	1.084	1
6	1000	3.572×10^{-18}	$2.799 \times 10^{+17}$	$2.936 \times 10^{+17}$	1.049	4176
7	10000	1.054×10^{-14}	$9.485 \times 10^{+13}$	$9.526 \times 10^{+13}$	1.004	15
8	10000	1.413×10^{-13}	$7.079 \times 10^{+14}$	$7.194 \times 10^{+14}$	1.016	104
9	10000	8.355×10^{-14}	$1.197 \times 10^{+13}$	$1.244 \times 10^{+13}$	1.039	2
10	10000	3.814×10^{-15}	$2.622 \times 10^{+14}$	$2.622 \times 10^{+14}$	0.999	39

*) CPU times are for a Pentium MMX133MHz personal computer.

Table 5.10 Calculated results of parameter change survey
for calculation cases with B042(2) (type 1).

Case I.D.	Histories	MFAO (1/y)	MTAO (y)	Standard Deviation (y)	Ratio	CPU * Time (s)
1	1000	2.936×10^{-14}	$3.206 \times 10^{+13}$	$3.376 \times 10^{+13}$	0.991	310
2	200	1.248×10^{-17}	$8.015 \times 10^{+16}$	$7.215 \times 10^{+16}$	0.9	184595
3	1000	1.223×10^{-16}	$8.176 \times 10^{+15}$	$8.333 \times 10^{+15}$	1.019	183438
4	1000	1.279×10^{-15}	$7.821 \times 10^{+14}$	$8.132 \times 10^{+14}$	1.040	1754
5	200	3.488×10^{-17}	$2.867 \times 10^{+16}$	$2.965 \times 10^{+16}$	1.034	3180

*) CPU times are for a Pentium MMX133MHz personal computer.

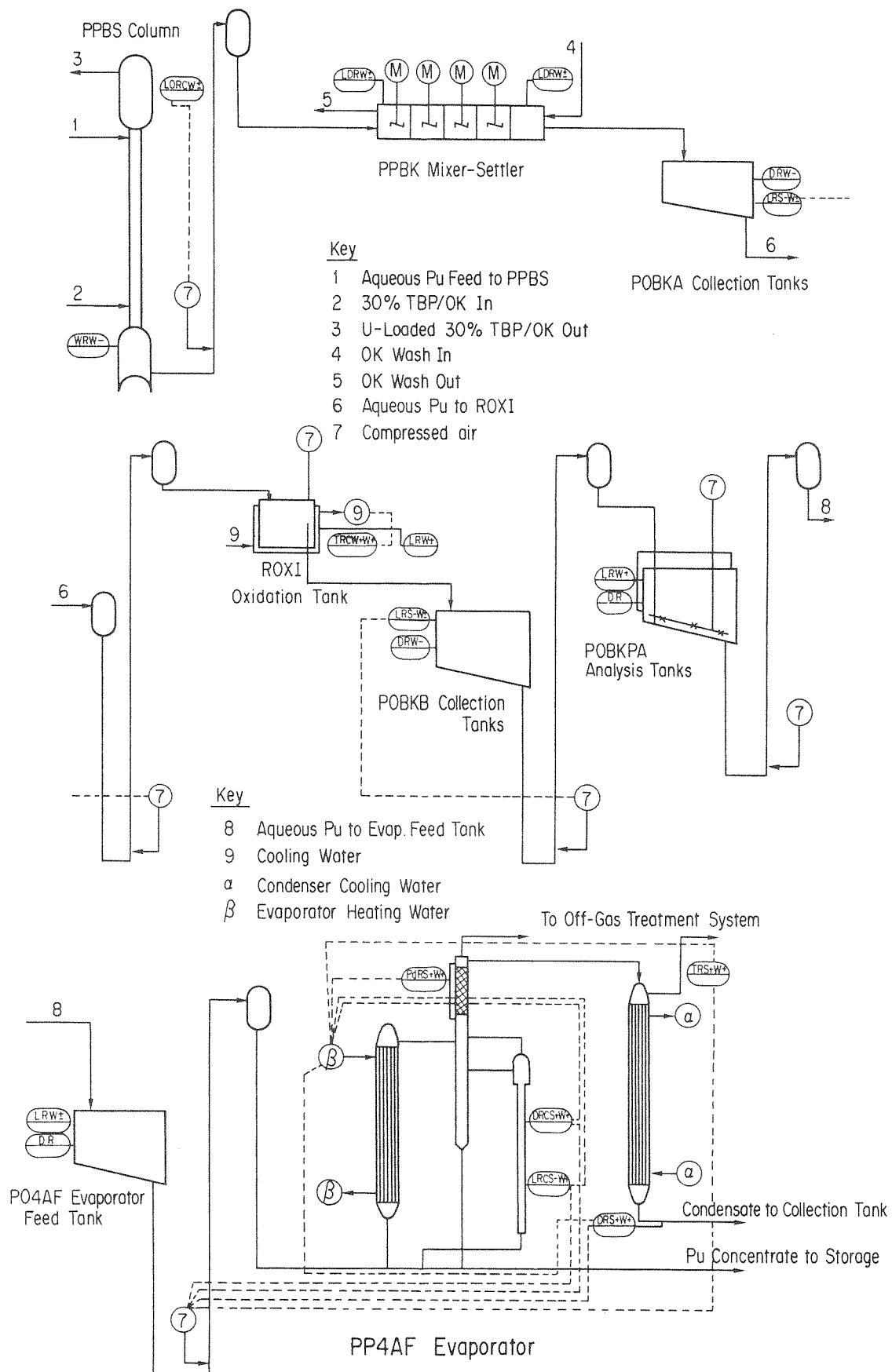


Fig. 5.1 Final plutonium purification process model of typical reprocessing plant for sample problem.

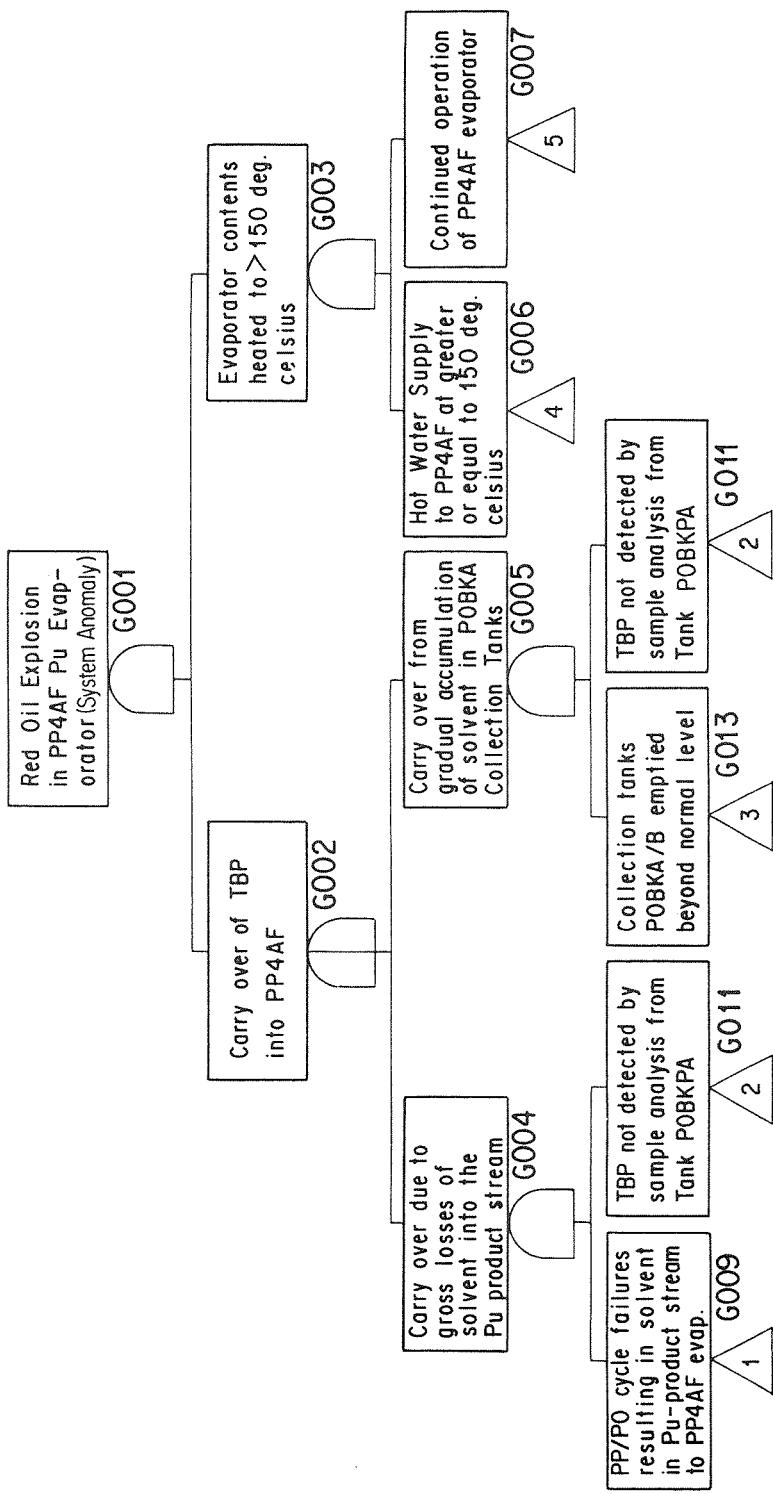


Fig.5.2 Fault tree of system anomaly for red oil explosion in PP4AF evaporator.

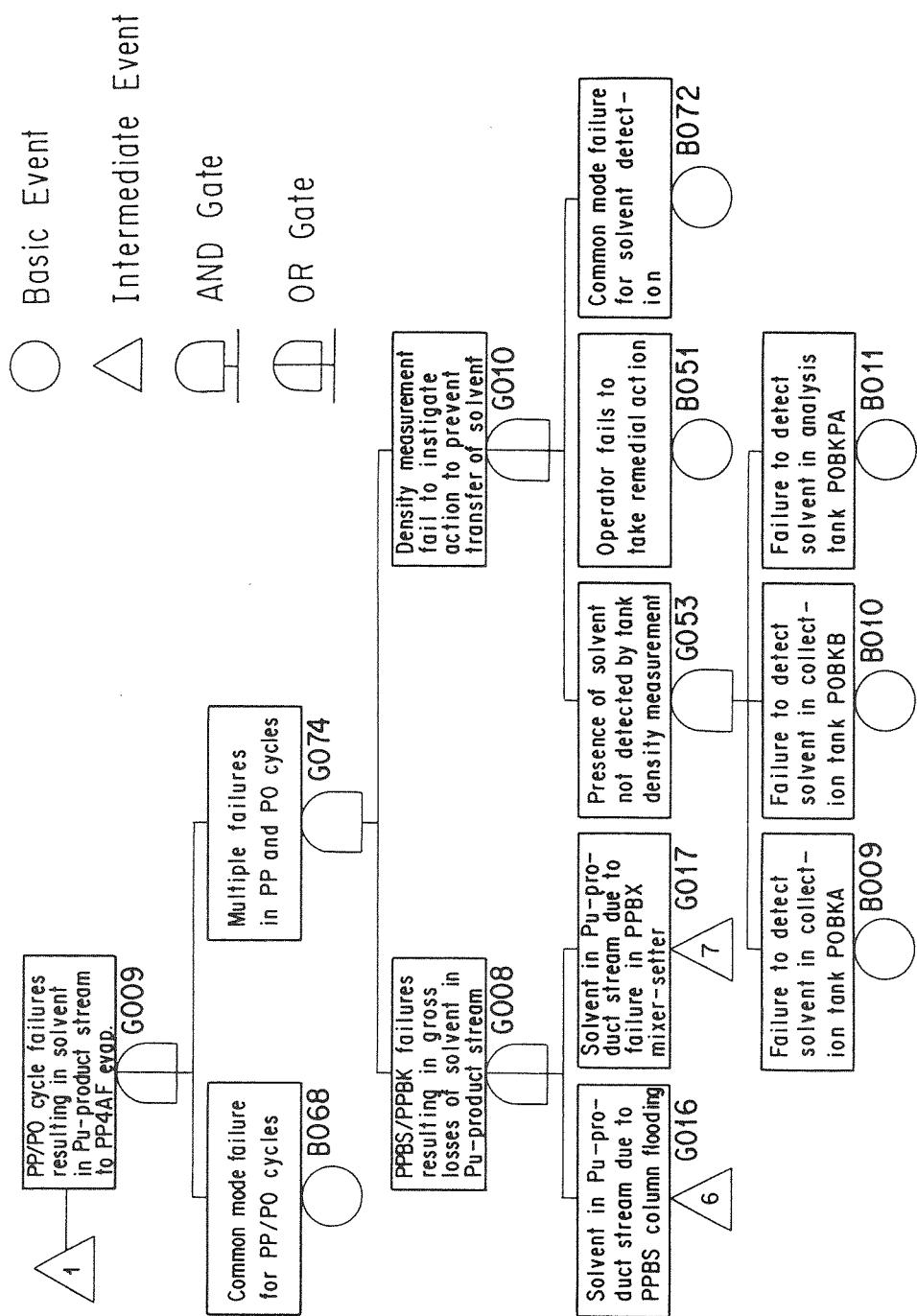


Fig. 5.3 Fault tree for plutonium purification/oxidation cycle failures resulting in solvent carried by plutonium aqueous stream.

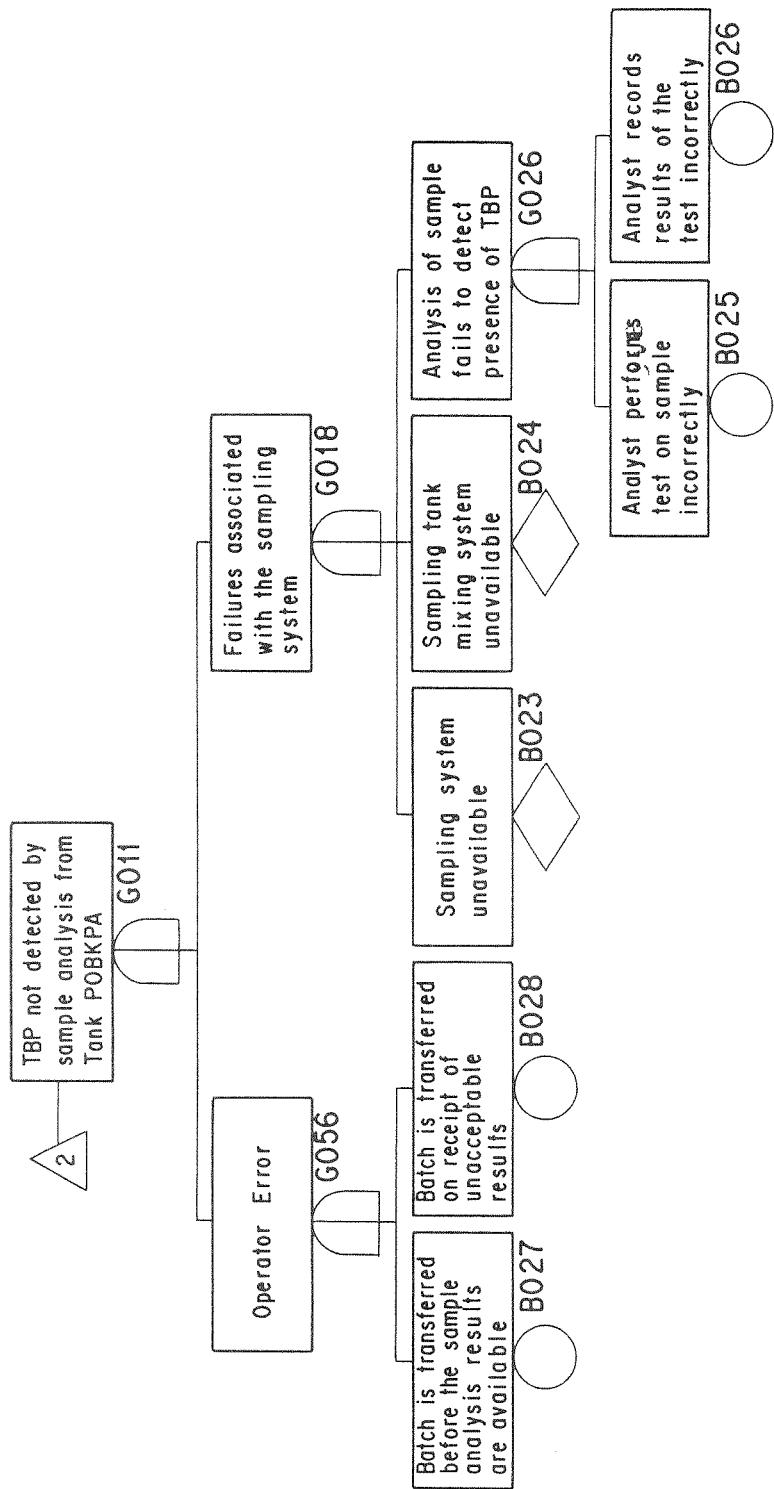


Fig. 5.4 Fault tree for TBP not detected in POBKPA analysis tank.

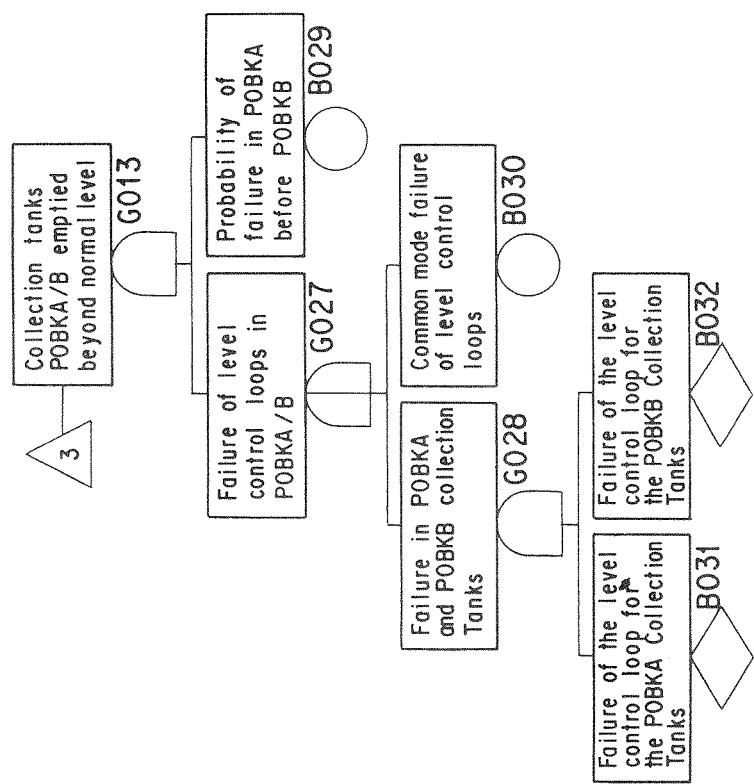


Fig. 5.5 Fault tree for POBKA/B collection tanks emptied beyond normal.

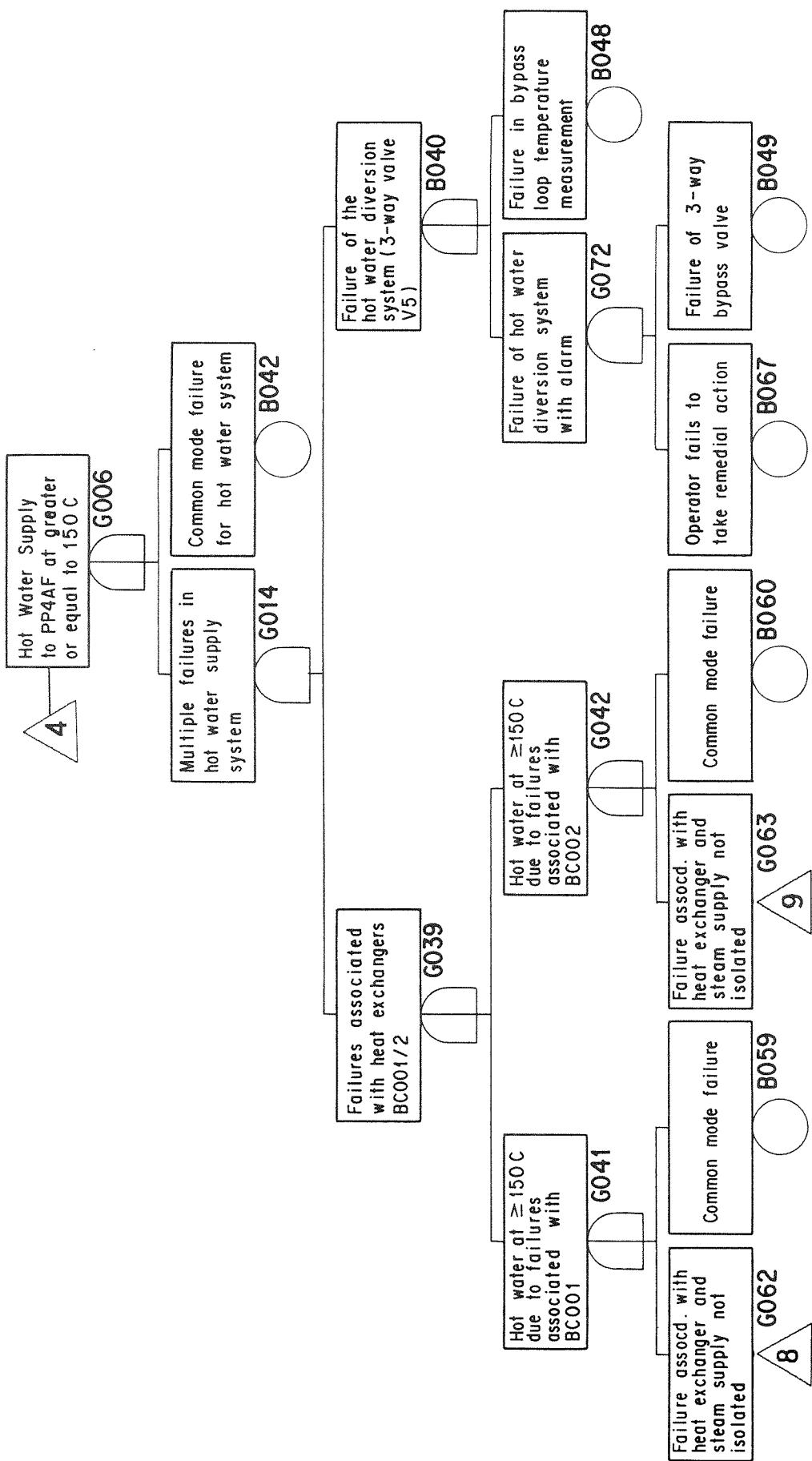


Fig. 5.6 Fault tree for hot water supply higher than 150 degree centigrade to PP4AF evaporator.

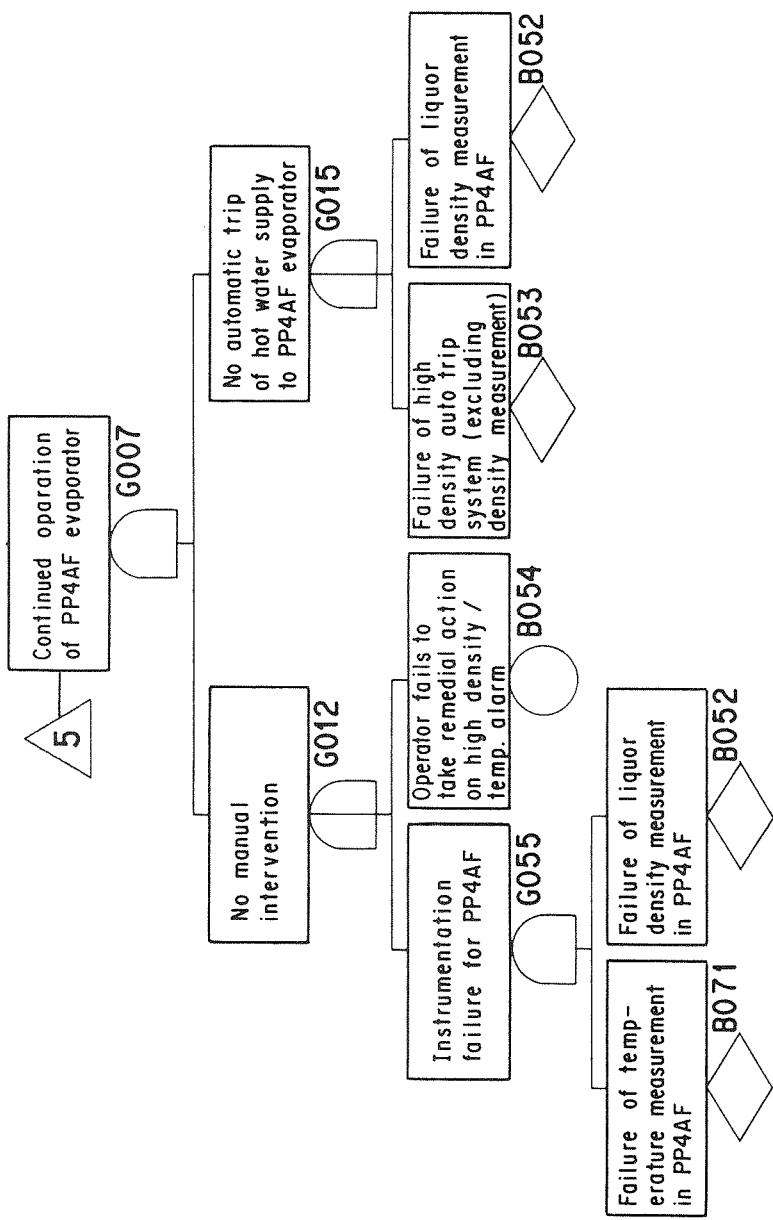


Fig. 5.7 Fault tree for continued operation of PP4AF plutonium evaporator with hot water supply system failed.

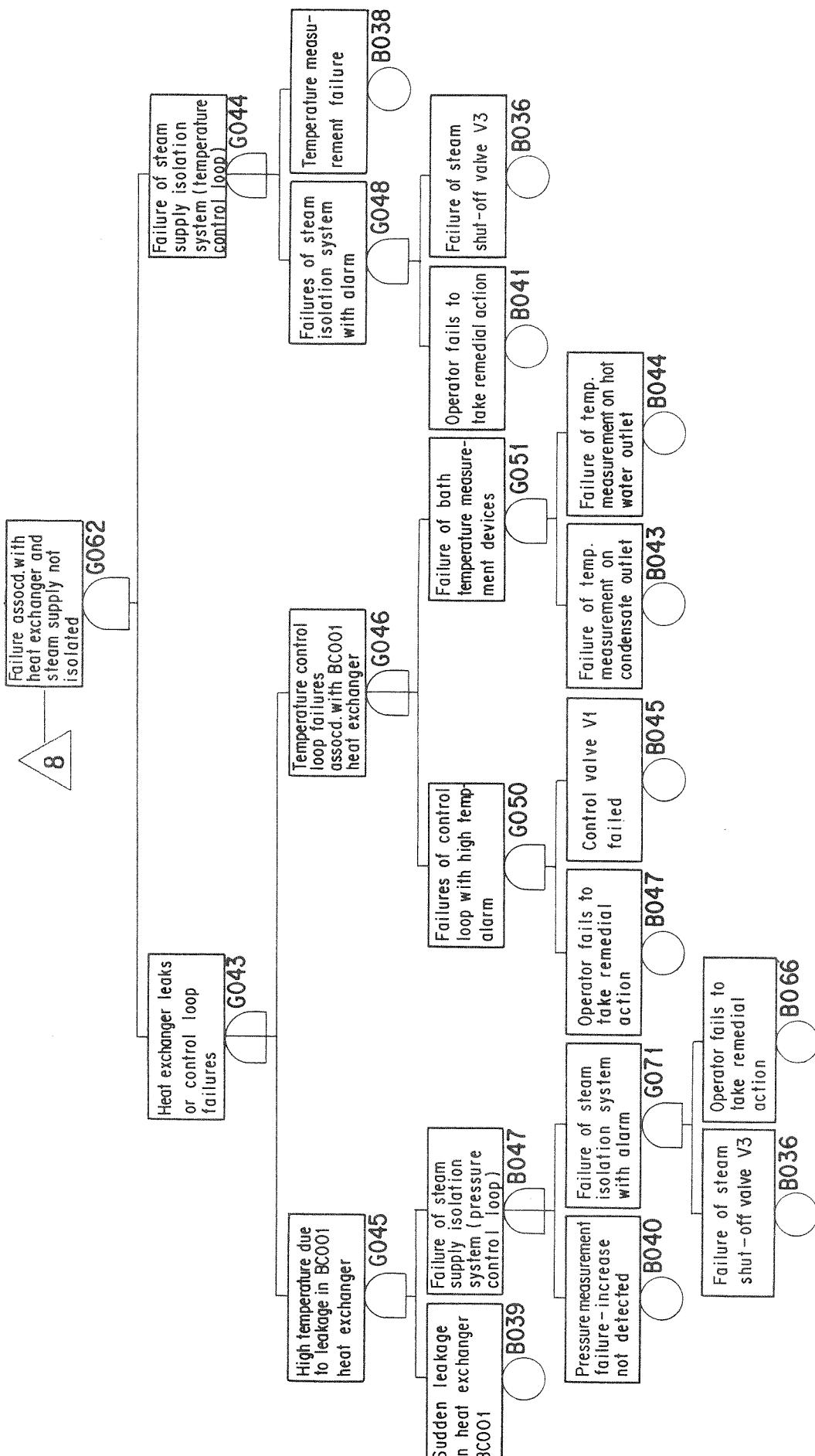


Fig. 5.8 Fault tree for failures associated with heat exchangers and steam supply system not isolated.

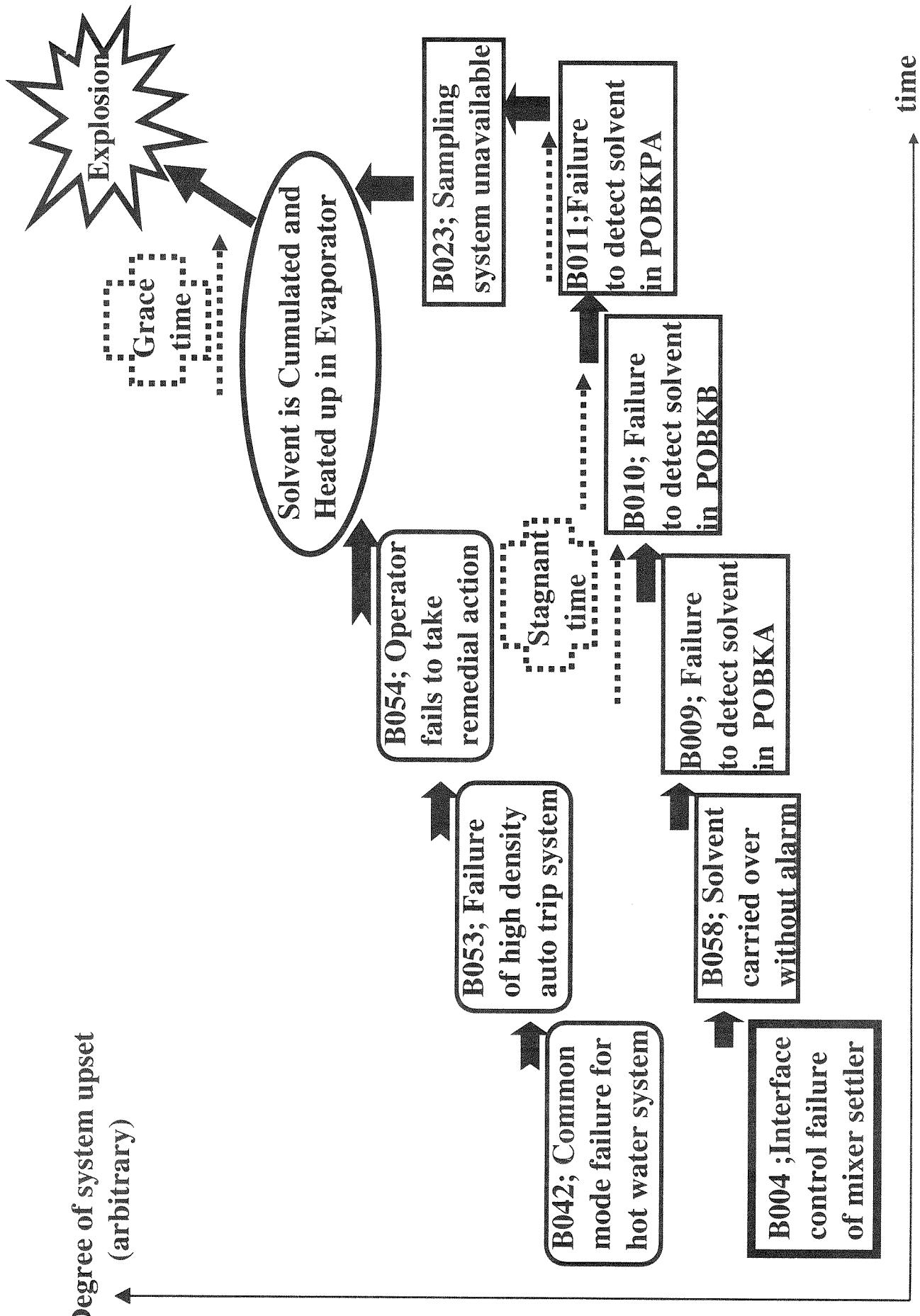


Fig. 5.9 Diagram of sequential event development into top event; Explosion.

6. カットセットに依らない入力形式（事象グループ法）

6.1 新たな入力形式の提案

これまでに述べた要素MC法によるシミュレーション解析においては、事故シーケンスを記述する入力データは全てカットセット形式で与えた。カットセットは、FTの定性的解析によって求めることができるが、解析対象とするプラントのシステムが複雑になればなるほど事故発生をFTで記述すること自体簡単ではない。そこで、要素MC法では、独自の事故シーケンス記述用のデータ入力方式をオプションとして考える。これは、評価すべき異常事象及びその原因の抽出のために従来から用いられている、HAZOP(Hazard and Operability Study)あるいはFMEA(Failure Mode and Effect Analysis)と呼ばれる手法⁽¹⁰⁾を応用するものである。

HAZOPは、化学プロセスの異常事象発生のメカニズムを明らかにするために考案されたものである。具体的には、工程ごとに評価すべき機器あるいはシステムに対する液や気体等の供給系統ごとにノードを定め、そこで流体等のパラメータ(流量、圧力、温度等)に対して定常運転状態からの「ずれ」を想定した上で、想定した機器あるいはシステムの異常事象発生の有無及びその「ずれ」の発生要因の定性的洗い出しを行うものである。また、FMEAは、機器類に対して考えられる故障等がシステムに及ぼす潜在的な影響等を評価する手法であり、具体的には工程または設備ごとに評価すべき機器あるいはシステムを構成部品レベルに機能分類した上で、これら構成部品に発生すると予想される故障モードを考え、この故障が発生した場合に、機器あるいはシステムが受ける影響の洗い出しを行うものである。

HAZOPを例にして説明すると、複数の専門家と対象プロセスに精通した現場技術者等から構成されるチームを設けて、いくつかの関連するガイドワード(流量や温度等の増大、減少等)のもとに異常発生原因や事故への進展を自由な発想の基に議論し、潜在的な異常事象の原因をブレーンストーミングにより明らかにする。これから、異常事象原因等を分類・整理し、事象の進展フロー図を作成して事故事象に至る過程の検討を行う。英国のBNFL社では、この手法を支援するため、Fig. 6.1に示すようにプロセスフローシート、図面、運転手順指示書、品質管理計画、運転経験、プロセス情報、保守記録、安全解析書等のデータを提供する計算機データベースシステムも整備されている⁽¹¹⁾。

要素モンテカルロシミュレーションコードTITANの入力オプションとして用意しようとするのは、HAZOP手法において潜在的な異常事象の原因を明らかにして、異常事象進展フロー図などを作成する過程で明らかとなる、これら異常事象の原因のグループ化情報をそのまま入力データとして利用する。このようにすれば、FT構築という煩雑な作業を回避することができ、必要な入力データ数も少なくてすむと思われ、省力化に繋がる。

新たな方式では、一定のシステム異常事象を発生すると考えられる機器・装置の故障（基本事象）の組み合わせをサブグループ単位として事象グループを構成し、事故に至るためのグループ化情報とともにデータ入力し、これらのデータからモンテカルロ計算に進むためのカットセットをコード内部で用意できるようする。例えば、第5章に述べたサンプル問題のレッドオイル爆発事故を取り上げれば、ミキサセトラ等の故障により有機溶媒が蒸発缶に流入する異常事象に到達するまでの機器・装置の故障の組み合わせが1つの事象グループを構成し、また、加熱制御系の故障により蒸発缶の温度上昇が制御できなくなる異常事象に至るまでの機器・装置の故障の組み合わせがもう1つの事象グループを構成する。この2つの事象サブグループに属する各の機器・装置の故障の組み合わせ（サブグループ）の同時生起によりレッドオイル爆発を誘引するものと考えられる。例としてTable 5.1に示す20個の基本事象からなるレッドオイル爆発事故について説明する。これらに付随する現象をサブグループ毎に分けると以下のようになる。

事象グループ 1

(ミキサセトラ等の故障により有機溶媒が蒸発缶に流入する異常事象)

サブグループ1, 1

B004; ミキサセトラ界面制御系の故障

B058; 運転員の対応操作無し

B023; 分析槽POBKPAでのサンプリング分析システム使用不可

B009; 中間槽POBKAでの密度測定による溶媒検出失敗

B010; 中間槽POBKBでの密度測定による溶媒検出失敗

B011; 中間槽POBKPAでの密度測定による溶媒検出失敗

サブグループ1, 2 (上記B023を次に置換)

B024; 分析槽POBKPAでの攪拌機故障

サブグループ1,3（上記B024を次に置換）

B025; 分析槽POBKPAでのサンプリングエラー

サブグループ1,4（上記B025を次に置換）

B026; 分析槽POBKPAでの分析結果の記載ミス

サブグループ1,5（上記B026を次に置換）

B027; 分析槽POBKPAで分析結果を待たずに溶液移送

サブグループ1,6（上記B027を次に置換）

B028; 分析槽POBKPAで分析結果不合格に関わらずバッチ移送

サブグループ1,7

B030; 中間槽(POBKA/POBKB)水位制御系の共通原因故障

B029; POBKAがPOBKB故障の前に故障している確率

B023; 分析槽POBKPAでのサンプリング分析システム使用不可

サブグループ1,8（上記B023を次に置換）

B024; 分析槽POBKPAでの攪拌機故障

サブグループ1,9（上記B024を次に置換）

B025; 分析槽POBKPAでのサンプリングエラー

サブグループ1,10（上記B025を次に置換）

B026; 分析槽POBKPAでの分析結果の記載ミス

サブグループ1,11（上記B026を次に置換）

B027; 分析槽POBKPAで分析結果を待たずに溶液移送

サブグループ1,12（上記B027を次に置換）

B028; 分析槽POBKPAで分析結果不合格に関わらずバッチ移送

サブグループ1,13

B031; 中間槽POBKA水位制御系の故障

B032; 中間層POBKB水位制御系の故障

B029; POBKAがPOBKB故障の前に故障している確率

B023; 分析槽POBKPAでのサンプリング分析システム使用不可

サブグループ1,14（上記B023を次に置換）

B024; 分析槽POBKPAでの攪拌機故障

サブグループ1,15（上記B024を次に置換）

B025; 分析槽POBKPAでのサンプリングエラー

サブグループ1,16（上記B025を次に置換）

B026; 分析槽POBKPAでの分析結果の記載ミス

サブグループ1,17（上記B026を次に置換）

B027; 分析槽POBKPAで分析結果を待たずに溶液移送

サブグループ1,18（上記B027を次に置換）

B028; 分析槽POBKPAで分析結果不合格に関わらずバッチ移送

サブグループ1,19

B013; パルスカラム通過量制御系の故障

B018; 運転員の対応操作無し

B023; 分析槽POBKPAでのサンプリング分析システム使用不可

B009; 中間槽POBKAでの密度測定による溶媒検出失敗

B010; 中間槽POBKBでの密度測定による溶媒検出失敗

B011; 中間槽POBKPAでの密度測定による溶媒検出失敗

サブグループ1,20（上記B023を次に置換）

B024; 分析槽POBKPAでの攪拌機故障

サブグループ1,21（上記B024を次に置換）

B025; 分析槽POBKPAでのサンプリングエラー

サブグループ1,22（上記B025を次に置換）

B026; 分析槽POBKPAでの分析結果の記載ミス

サブグループ1,23（上記B026を次に置換）

B027; 分析槽POBKPAで分析結果を待たずに溶液移送

サブグループ1,24（上記B027を次に置換）

B028; 分析槽POBKPAで分析結果不合格に関わらずバッチ移送

事象グループ2

（加熱制御系の故障により蒸発缶の温度上昇が制御できなくなる異常事象）

サブグループ2,1

B042; 高温水供給系の共通原因故障

B053; 蒸発缶内濃縮液高密度検出・運転自動停止系故障

B054; 高密度/高温度アラームに対する対応処置無し

以上、事象グループが2個、それらに属するサブグループが各々24個と1個できた。事象グループ1に属するサブグループ数が多いのは、B023, B024, B025, B026, B027, B028 の各基本事象が並列(OR)で入っているからであり、これらをひとつと考えれば4個になる。計算プログラム内部でカットセットを求めるならば、（事象グループ1に属するサブグループ）×（事象グループ2に属するサブグループ）によって合計24個のカットセットが生じることとなる。これらをモンテカルロ法により追跡する場合、あまり頻度の少ないものは全体の事故発生頻度へ寄与する割合も小さいので、計算結果の出力時に入力データで指定した値以下のものは捨てこととするか、あるいは上位からN番目のもののみを出力データとして採用するかオプションとして指定できるようにする。ヒストリー数が多く計算時間がよけいにかかる場合には、計算中にモニターしてカットセットの切り捨てが可能なようすればよい。

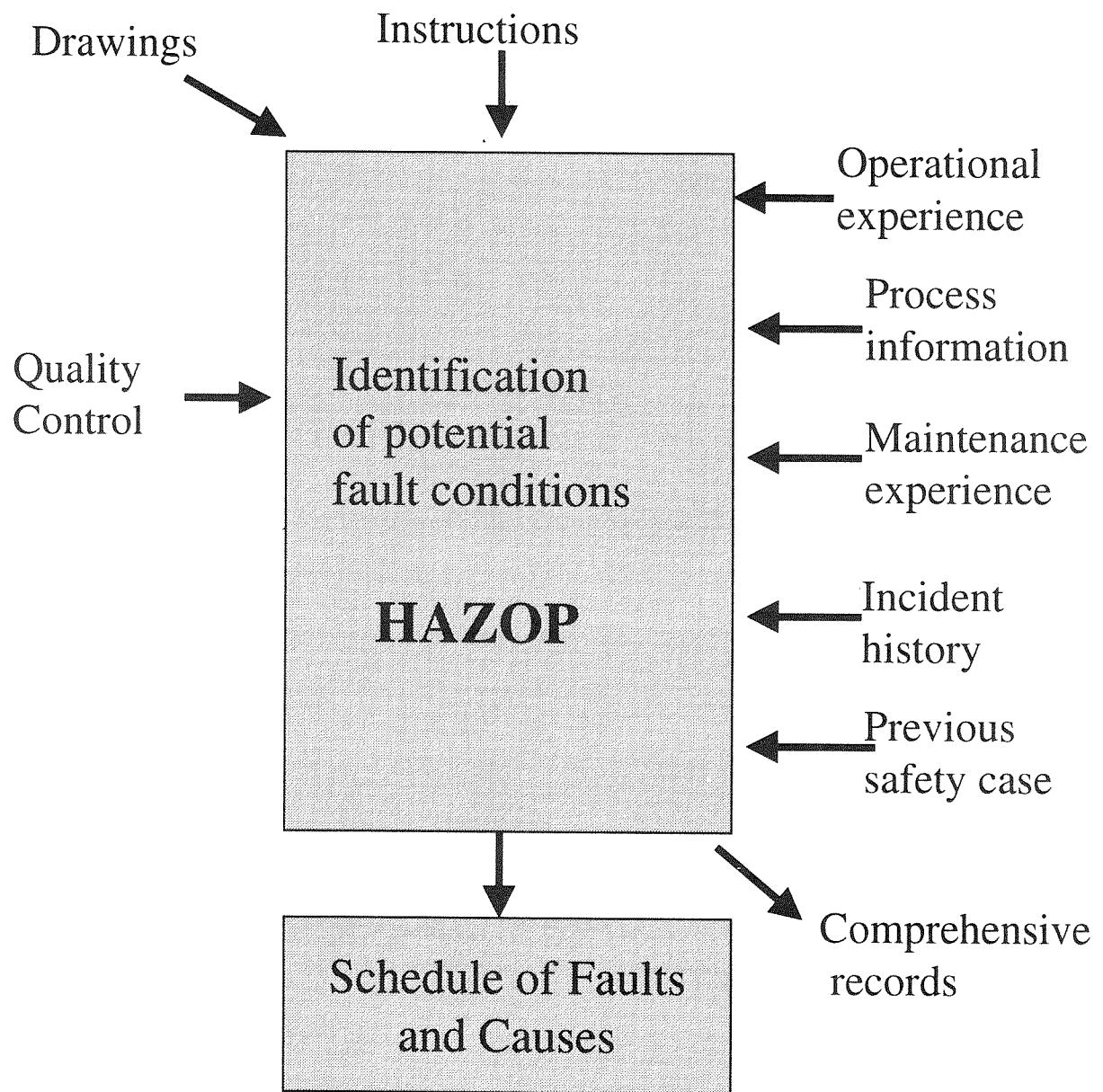


Fig.6.1 The HAZOP process flow diagram.

7. 結論と今後の課題

プラントシステムの事故発生頻度を予測するため、従来からMC法など統計的手法やFTA解析手法が用いられてきた。MC法の中でも、システムを構成する個々の機器・装置に対してランダムサンプリングする方法は、機器・装置の故障発生・回復挙動に関わる特性を近似的取り扱いを廃してモデル化し、システム全体の信頼性挙動をシミュレートすることができる反面、計算機使用時間が膨大となり実用的でないとされ、顧慮されないできた。近年電子計算機の発達が著しく、計算機使用時間に関わる問題は解消されつつある。本報では、多種多様な機器故障に関わる事故原因が存在し、それらが並立して事故発生に関与するような、しかも事故発生に至るまで事象の進展が比較的緩慢な再処理施設の事故シーケンスを精度よく定量的に解析するため、上に述べた特徴を有する要素MC法シミュレーションコードTITANを開発した。

本報では要素MC法シミュレーションの基本的方法について述べ、解析的方法による定式化の結果の比較により本法による結果が妥当なことを示した。さらにドイツの典型的な再処理施設のモデルプラントにおけるレッドオイル爆発に関するサンプル問題の解析を通して、実施設への適用におけるMC法統計計算の誤差の範囲、計算時間の程度を把握した。

これから次に掲げるような事項が課題として考えられる。

(1) MC法で事故発生率を求めようとすると、統計的変動が不可避であり、限られた時間内で求めようとする事故発生率の大きさにもよって一概には言えないが、普通に1000ないし10000ヒストリーまで計算することにより相対偏差±1%程度に收められると考えられる。収束判定条件としてランダムサンプリングによる統計的変動の許容幅 ϵ_1 と、事故発生率とその標準偏差の差の許容幅 ϵ_2 を指定して計算することが考えられ、この ϵ_1 と ϵ_2 の一般的な設定範囲を多くの応用計算により定める必要がある。

(2) 本報では、サンプル問題として再処理施設のレッドオイル爆発に至る一つのシステム故障モードを取り上げて解析した。実際には、多くの異なる機器の故障に関わる多くの故障モードが関与するため、システム全体の信頼性解析を行うためには、もっと多くの計算時間が必要となる。このため実際的なプラントシステム信頼性評価問題に対して実用的な計算時間の範囲で解析可能なことを示す必要がある。本報

では、並列計算により計算時間の大幅な短縮が可能なことを示したが、PE数が千台規模の高並列分散メモリ型計算機AP1000も実際に稼働していて、これを使用すれば計算時間の問題はほぼ解決するであろう。

(3) 上記に関連して、実際のプラントシステムの信頼性解析において、従来のFT解析では多数のカットセットを別々に解析して発生頻度の総和を取るが、MC法では、プラント運転の時間的経過に沿って、システムに存在する多数の機器・装置の故障発生・回復の挙動を満遍なくチェックし、それらの故障状態の重合のある組み合わせを検出して、あらかじめ指定した事故シーケンス（即ち、FT解析によるカットセットに相当するもの）と照合して事故発生の有無を判定することも考えられる。このような計算方式により、大規模システムへの適用が可能となり、計算時間の短縮化も図られるであろう。

(4) 最近の原子力施設の運転には、デジタル式制御装置が用いられることが多く、計器等からの情報・データが集中的に管理されることから、リスク管理へ本手法を最も効率よく適用することができると考えられる。

(5) 本報では、機器・装置の故障率等の信頼性データは時間経過に対して一定値と仮定したが、実際にはシステム環境条件の変化（特に事故進展に伴い、温度・圧力等の物理的条件の変化に加えて、運転員の心理的条件の変化など）や、機器の部分故障などにより信頼性データが時事刻々変化することが考えられる。また、機器の故障発生や修復の時間に対する確率密度分布は指数型を仮定したが、これが例えれば正規分布型になることも考えられる。要素MC法は時間軸に沿って個々の機器故障・回復に関わる確率的現象をランダムサンプリングにより追跡するため、原理的にこのような状況を扱うことができる。従って実際の状況に合わせた複雑な機器故障・修復の確率的挙動をシミュレーションすることも可能である。

謝　　辞

最後に、本報告を作成するに当たり、多くの方々から有益なご意見、コメントを戴いた。特に、傍島眞 原研・安全性試験研究センター計画調査室次長及び、村松健 原研・原子炉安全工学部原子炉安全評価研究室長には貴重なるご助言、ご指導を戴いたことに感謝致します。

—— 参考文献 ——

- (1) Vesely, W.E. : Nucl. Engineering and Design, **13**, 337(1973).
- (2) Billinton, R. and Sankarakrishnan, A. : Reliability Engineering and System Safety, **44**, 131(1994).
- (3) Lewis, E.E. and BOHM, F. : Nucl. Engineering and Design, **77**, 49(1984).
- (4) Nomura, Y. : J. Nucl. Sci. Technol., **29**, 813(1992).
- (5) Nomura, Y., Leicht, R. and Ashton, P : J. Nucl. Sci. Technol., **31**, 850(1994).
- (6) Nomura, Y., Naito, Y. : Nucl. Technol., **121**, 3(1998).
- (7) Leicht, R., Dorst, H.J., Neghabian, R., Neuber, J., Puttke, B. : Abschlussbericht Fachband 5 of Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), (1985).
- (8) Ishihara, H., et al. : IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing, May 9 ~ 10 (1991).
- (9) 確率論的安全評価 (PSA) 実施手順に関する調査検討－レベル1PSA、内的事象－
(財)原子力安全研究協会 (PSA実施手順調査検討専門委員会) 平成4年7月。
- (10) 野村靖 : JAERI-M 85-200 (1985).
- (11) Sunman, C. R. J., Campbell, R. J. and Wakem, M. J., : Proceedings of the First NUCEF International Symposium NUCEF'95, October 16-17, 1995, Hitachinaka, Japan, p. 142 (1995).

付録A 猶予時間のあるシステムの解析的手法による厳密な取り扱い

プラント運転期間中のプラント状態の推移、たとえば、予備機切り替えによる装置の運転中の保守の有無、あるいは、運転中の故障率あるいは修理時間の変化等に対応して、事故の発生頻度も時間的に推移する。また、機器が故障してもある好ましくない事象に進展するまでに時間余裕[猶予時間(Grace Time)と考えられる]がある場合には、その時間余裕内に機器が修復されれば、その好ましくない事象は顕在化しない。特に再処理施設では一般的に事象の進展が緩慢なことから、機器故障により異常・事故事象が発生した場合、当該故障機器を修復できる可能性が比較的高いと考えられる。従って、P S Aを現実的に行うためには、故障機器の修復を評価モデル上適切に取り扱うことが重要であり、ここでは、(財)原子力発電技術機構で行われた作業結果^(A.1)を参考として、簡単な修復モデルのプロトタイプに対して、従来から用いられている古典的な解析的手法による厳密な解析結果と、ランダムサンプリング法によるシミュレーション結果を比較して、本論文で取り上げた要素M C法による解析結果の妥当性を示す。

A.1 修復モデルのプロトタイプ

再処理施設で想定される事故における猶予時間の例としては、「高レベル廃液貯蔵タンクにおいて冷却機能が喪失してから溶液が崩壊熱により温度上昇し沸騰に到るまでの時間」^(A.2)、「蒸発缶に誤移送された有機溶媒やTBPが異常過熱されてレッドオイルを生成し、これが急激な分解反応を起こして爆発するまでの時間」^(A.3)、「プルトニウム生成サイクルの抽出カラムにおけるプルトニウム異常蓄積により臨界に到るまでの時間」^(A.4)等が挙げられる。猶予時間(τ [h])の設定の仕方は、例えば上記の高レベル廃液貯蔵タンクの冷却能喪失事故では、廃液自身の崩壊熱による発熱とタンク表面からの自然放熱の差分が溶液の温度上昇に寄与するとして算出される。

ここでは、修復モデルのプロトタイプとして、Fig.A.1に示すFTで表示され

るようなものを考える。ここで、頂上事象の発生頻度はブール代数処理され、基本事象の組み合わせからなるミニマムパスの発生頻度の総和で表される。従って、頂上事象の発生頻度を求めるためには、猶予時間を考慮した基本事象の重ねあわせからなるミニマムパスの発生頻度を求め、それらの総和をとればよい。基本事象はFig.A.1に示すように機器故障A, B, D, E及び運転員対応の失敗Cからなり、頂上事象は $T=AB+CE+DE$ で表される。基本事象A, B, D, Eの故障率は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ [1/h]、平均修復時間は0~24[h]、修復時間分布は基本事象A, D, Eについては対数正規分布、Bは指数分布とする。基本事象Cは事故時運転員対応であり、起因事象はなく、失敗確率で与えられたとした。

A.2 猶予時間 τ を考慮した事故発生頻度の解析方法

一般に解析的手法を用いる場合、 τ 時間以上継続する頂上事象の状態確率すなわち事故発生頻度は、ひとつの機器について他の機器との故障が τ 時間以上重なる割合を表す修正係数を、複数の機器故障が τ 時間以上重なっている状態の確率あるいは事故発生頻度にかけて、それらの積・和で表される。ここで、Fig.A.2の例に示すように、

- ・ 頂上事象の存在する確率を求めるには、ブール代数がそのまま適用できる、
- ・ 複数の事象がANDで結ばれたものの発生頻度を求めるには、ひとつの事象の発生頻度（故障率）と他の事象の存在確率のタスキがけとなり多くの項に展開される。Fig.A.2に示すように、

$F'(X)$ ； 故障継続時間が猶予時間 τ [h]以上となる故障・事故発生頻度 [1/h]

$P'(X)$ ； 状態継続時間が猶予時間 τ [h]以上となる事象の存在確率 [-]

Xが单一事象の場合、例えばAまたはBのときには、それぞれの機器の故障率($F'(A)=\lambda'(A)$, $F'(B)=\lambda'(B)$)は、記号の右肩に'ダッシュ'を付与することにより、故障継続時間が猶予時間 τ [h]以上となることを表す。また、存在確率 $P'(X)$ は、次節に述べる確率収支式を前進差分で解いて得られる解に、修正係数（故障が重なる時間が τ 以上の割合）をかけて求められる。

A.2.1 確率収支式による状態存在確率の算定

Fig.A.3にカットセット1次のシャノン線図、Fig.A.4にカットセット2次及び3次のシャノン線図を示す。これらは、カットセットの次数（含まれる基本事象の数）に対応した、実現する可能性のある状態の存在確率相互間の関係を、余裕時間（猶予時間） τ 以上の故障率及び修復率（修理率）と τ 未満の故障率及び修復率（修理率）により示したものである。記号の右肩に付与した2回のダッシュは、故障継続時間が τ 時間未満であることを示す。カットセットの次数が実際のプラントシステムに近い2次、3次となるにつれ考慮すべき状態の数、故障及び修復の関係線図は飛躍的に大規模、複雑化することが分かる。これらから、カットセット1次、2次、3次に対応する存在確率間の収支式が、Fig.A.5に示すように導かれる。これらの時間に関する全微分方程式を初期値0と置いて前進差分法で解くことにより、任意時刻における各状態の存在確率が求められる。上に述べた時間に関する連立全微分方程式の各項の係数に用いられる時間余裕を考慮した故障率、修理率データ(λ' , λ'' , μ' , μ'' 等)を求めるため、通常与えられる λ 、 μ のデータに対して前処理を施す。故障率の前処理は、猶予時間 τ 以上故障する発生割合を、故障率 λ にかける。また、修理率に関しては、修理率は平均修復時間の逆数として定義されるので、時間余裕 τ 時間以上の修理時間について平均値を求めて、その逆数を修理率とする。故障時間の確率密度関数が対数正規分布の場合には、無限大までの数値積分を避けるため、Fig.A.6に示すように定式化して求められる。故障時間の確率密度関数が指数型分布の場合には、Fig.A.7に示すように、より簡単に定式化して求められる。

A.2.2 修正係数の導入

上記のシャノン線図から導かれた連立全微分方程式の解として求められる存在確率は、プラントシステムの取りうる各々の状態に関わるものである。これらの状態は、関係する機器の故障時間が τ 時間以上と τ 時間以下によって区別されているのみであり、故障の重なっている時間については、0から ∞ まであって規定されていない。このため、Fig.A.2に示すようなカットセットの発生頻度を求めるため入力する必要のある $P'(X)$ などは、シャノン線図から求められる存在確率に、複数の故障が重なっている時間が τ 時間以上となる確率（修正係数）をかける必要がある。

機器Xについて故障時間の確率密度関数を $f_X(t)$ で表すと、 τ 時間以上の故障の継続時間のうち他の機器との故障の重なりが τ 時間以上となる割合 $R(\tau)$ は、平均論的に述べると、機器Xの τ 時間以上の故障時間の期待値 $T'(\tau)$ ；

$$T'(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} t f_X(t) dt / \int_{\tau}^{\infty} f_X(t) dt$$

に対して、 τ 時間分だけ除いた残りの部分の割合として次式のように求められる。

$$R(\tau) = (T'(\tau) - \tau) / T'(\tau)$$

$$= 1 - \tau / \{ \int_{\tau}^{\infty} t f_X(t) dt / \int_{\tau}^{\infty} f_X(t) dt \} \quad (1.1)$$

複数の機器故障に関わる事象については、それぞれの τ 時間以上故障継続する確率に上記の修正係数をかける必要がある。例えば、機器A,Bについて τ 時間以上故障する確率 $P(A) \cdot P(B)$ に次式で表される修正係数をかける必要がある。

$$[1 - \tau / \{ \int_{\tau}^{\infty} t f_A(t) dt / \int_{\tau}^{\infty} f_A(t) dt \}] \cdot [1 - \tau / \{ \int_{\tau}^{\infty} t f_B(t) dt / \int_{\tau}^{\infty} f_B(t) dt \}] \quad (1.2)$$

A.3 猶予時間 τ を24時間とした場合の解析結果例

上に述べた方法により猶予時間 τ を24時間として解析した結果は、 $1.4 \times 10^{-12}/h$ となつた^(A.1)。一方、試みにTITANコードによるシミュレーション結果はヒストリー数100として、 $1.6 \times 10^{-12}/h$ が得られ、ほぼ同一の値が得られる。このTITANコードによる計算結果は、PC Pentium MMX133MHZを用いて行って得られたものである。

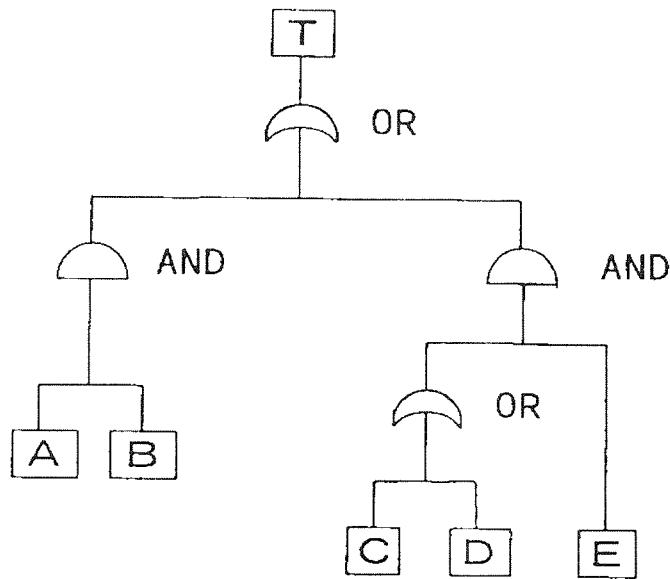
付録Aの参考文献

(A.1) (財)原子力発電技術機構・原子力安全解析所: INS/S97-10 (1997).

(A.2) 野村靖: JAERI-M 91-160 (1991).

(A.3) Nomura, Y., Leicht, R. and Ashton, P.: J. Nucl. Sci. and Technol., 31, 850
(1994).

(A.4) Nomura, Y. and Naito, Y.: Nucl. Technol. 121, 3 (1998).



	Failure rate [1/h]	Mean time to repair [h]	Distribution function of time to repair
A	1×10^{-6} ($\div 10^{-2} [1/y]$)	24 ($\eta \exp(\sigma^2/2)$)	Log-normal distribution $\eta = 14.5, \sigma = 1$
B	1×10^{-7}	24	Exponential distribution $1/\mu = 24$
C*			
D	1×10^{-6}	12	Log-normal distribution $\eta = 4.4, \sigma = 1.414$
E	1×10^{-5}	6	Log-normal distribution $\eta = 4.7, \sigma = 0.7071$

Note* for event C, probability of 1×10^{-6} is given as an operator error after 24 hours elapsed from beginning of the accidental situation.

Fig. A.1 Event components with reliability data for the sample problem analysis to evaluate the repair model.

Probability

$$P' (A \cdot B) = P' (A) \cdot P' (B)$$

$$P' (A \cdot B \cdot C) = P' (A) \cdot P' (B) \cdot P' (C)$$

Frequency

$$F' (A \cdot B) = F' (A) \cdot P' (B) + F' (B) \cdot P' (A)$$

$$\begin{aligned} F' (A \cdot B \cdot C) &= F' (A) \cdot P' (B \cdot C) + F' (B) \cdot P' (A \cdot C) \\ &\quad + F' (C) \cdot P' (A \cdot B) \end{aligned}$$

For example;

$$T = A \cdot B + C \cdot E + D \cdot E ;$$

$$P' (T) = P' (A \cdot B) + P' (C \cdot E) + P' (D \cdot E)$$

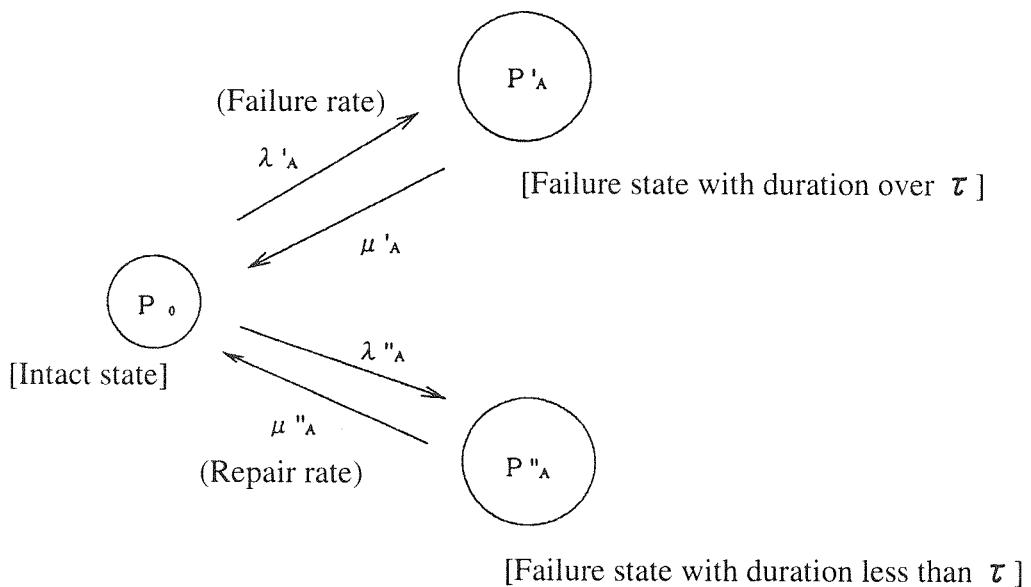
$$\begin{aligned} F' (T) &= F' (A) \cdot P' (B) + F' (B) \cdot P' (A) + F' (C) \cdot P' (E) \\ &\quad + F' (E) \cdot P' (C) + F' (D) \cdot P' (E) + F' (E) \cdot P' (D) \end{aligned}$$

Here, $F' (A) = \lambda' (A)$, $F' (B) = \lambda' (B)$, $F' (C) = \lambda' (C)$,

$F' (D) = \lambda' (D)$, $F' (E) = \lambda' (E)$ are failure rate for failure state lasting over τ .

Note; $P' (A)$, $P' (B)$, $P' (C)$, $P' (D)$, $P' (E)$, $P' (A \cdot B)$, $P' (C \cdot E)$, $P' (D \cdot E)$ Are to be multiplied by correction factors.

Fig. A.2 Deployment of Boolean algebra for a top event.



λ^i ; Failure rate of component i [1/h]

$\lambda'(i)$, $\lambda''(i)$; Failure rate of component i for failure state lasting over τ

$\lambda''(i)$, $\lambda''(i)$; Failure rate of component i for failure state lasting less than τ

μ^i ; Repair rate of component i [1/h]

$\mu'(i)$, $\mu''(i)$; Repair rate of component i for failure state lasting over τ

$\mu''(i)$, $\mu''(i)$; Repair rate of component i for failure state lasting less than τ

Fig. A.3 Shannon diagram for cut set of first order.

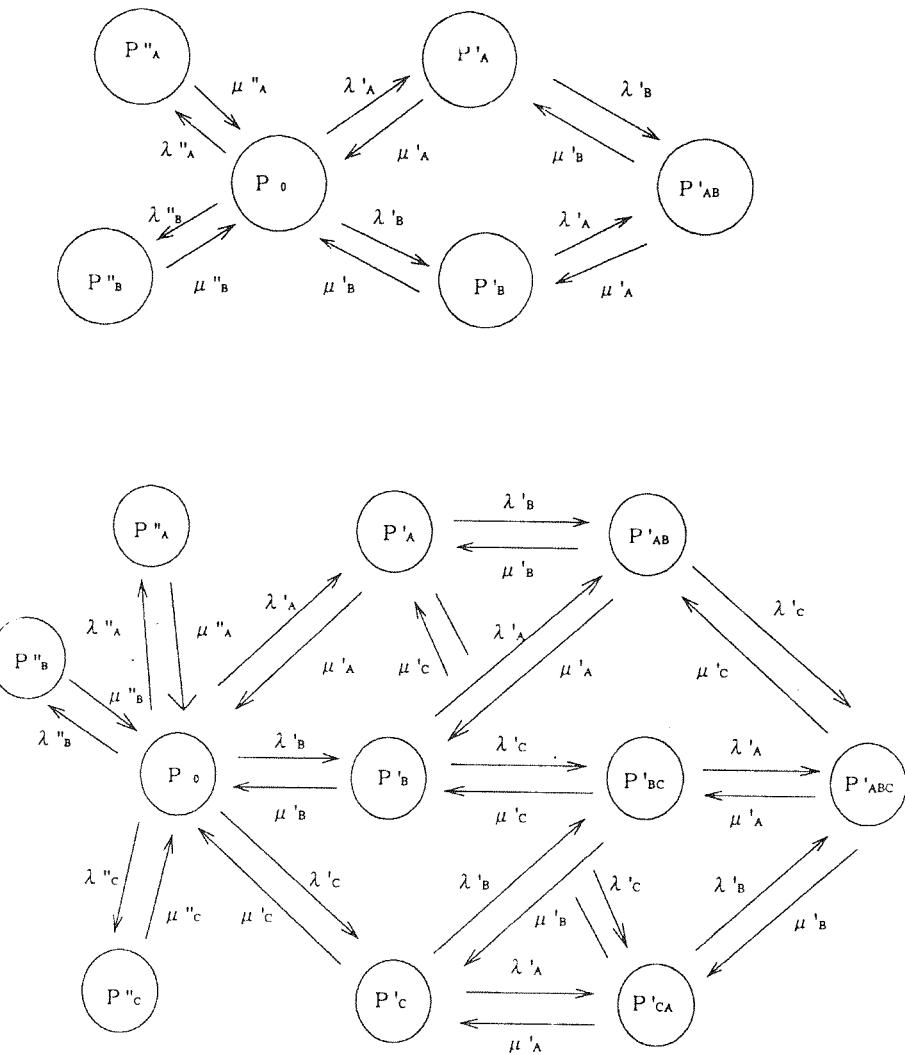


Fig. A.4 Shannon diagram for cut-sets of second and third order.

(primary)

$$d P_0 / d \theta = -\lambda'_A P_0 + \mu'_A P'_A - \lambda''_A P_0 + \mu''_A P''_A$$

$$d P'_A / d \theta = \lambda'_A P_0 - \mu'_A P'_A$$

$$d P''_A / d \theta = \lambda''_A P_0 - \mu''_A P''_A$$

(secondary)

$$d P_0 / d \theta = -\lambda'_A P_0 + \mu'_A P'_A - \lambda'_B P_0 + \mu'_B P'_B - (\lambda''_A + \lambda''_B) P_0 + \mu''_A P''_A + \mu''_B P''_B$$

$$d P'_A / d \theta = \lambda'_A P_0 - \mu'_A P'_A - \lambda'_B P'_A + \mu'_B P'_{AB}$$

$$d P'_B / d \theta = \lambda'_B P_0 - \mu'_B P'_B - \lambda'_A P'_B + \mu'_A P'_{AB}$$

$$d P'_{AB} / d \theta = \lambda'_B P'_A - \mu'_B P'_{AB} + \lambda'_A P'_B - \mu'_A P'_{AB}$$

$$d P''_A / d \theta = \lambda''_A P_0 - \mu''_A P''_A$$

$$d P''_B / d \theta = \lambda''_B P_0 - \mu''_B P''_B$$

(third)

$$d P_0 / d \theta = -\lambda'_A P_0 + \mu'_A P'_A - \lambda'_B P_0 + \mu'_B P'_B - \lambda'_C P_0 + \mu'_C P'_C - (\lambda''_A + \lambda''_B + \lambda''_C) P_0 + \mu''_A P''_A + \mu''_B P''_B + \mu''_C P''_C$$

$$d P'_A / d \theta = \lambda'_A P_0 - \mu'_A P'_A - \lambda'_B P'_A + \mu'_B P'_{AB} - \lambda'_C P'_A + \mu'_C P'_{CA}$$

$$d P'_B / d \theta = \lambda'_B P_0 - \mu'_B P'_B - \lambda'_A P'_B + \mu'_A P'_{AB} - \lambda'_C P'_B + \mu'_C P'_{BC}$$

$$d P'_C / d \theta = \lambda'_C P_0 - \mu'_C P'_C - \lambda'_B P'_C + \mu'_B P'_{BC} - \lambda'_A P'_C + \mu'_A P'_{CA}$$

$$d P'_{AB} / d \theta = \lambda'_B P'_A - \mu'_B P'_{AB} + \lambda'_A P'_B - \mu'_A P'_{AB} - \lambda'_C P'_{AB} + \mu'_C P'_{ABC}$$

$$d P'_{BC} / d \theta = \lambda'_C P'_B - \mu'_C P'_{BC} + \lambda'_B P'_C - \mu'_B P'_{BC} - \lambda'_A P'_{BC} + \mu'_A P'_{ABC}$$

$$d P'_{CA} / d \theta = \lambda'_A P'_C - \mu'_A P'_{CA} + \lambda'_C P'_A - \mu'_C P'_{CA} - \lambda'_B P'_{CA} + \mu'_B P'_{ABC}$$

$$d P'_{ABC} / d \theta = \lambda'_C P'_{AB} - \mu'_C P'_{ABC} + \lambda'_A P'_{BC} - \mu'_A P'_{ABC} + \lambda'_B P'_{CA} - \mu'_B P'_{ABC}$$

$$d P''_A / d \theta = \lambda''_A P_0 - \mu''_A P''_A$$

$$d P''_B / d \theta = \lambda''_B P_0 - \mu''_B P''_B$$

$$d P''_C / d \theta = \lambda''_C P_0 - \mu''_C P''_C$$

 θ ; elapsed time

Fig. A.5 Balance equations of state probabilities for primary, secondary and third order cut-sets.

Expressed only for a basic event A

Probability density function for time to failure, t

$$f_A(t) = \frac{t^{-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t/\eta)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

For example, $\eta = 14.5$, $\sigma = 1$

$$\lambda_A = 1 \times 10^{-6} [1/h]$$

$$\mu_A = 1/24 [1/h]$$



Preprocessing without integration over infinity.

Failure rate for failure state lasting less than τ ;

$$\lambda''_A = \lambda_A \int_0^\tau f_A(t) dt$$

Failure rate for failure state lasting over τ ;

$$\lambda'_A = \lambda_A - \lambda''_A$$

Mean time to repair for failure state lasting less than τ ;

$$1/\mu''_A = \int_0^\tau t f_A(t) dt / \int_0^\tau f_A(t) dt$$

Mean time to repair for failure state lasting more than τ ;

$$1/\mu'_A = \int_\tau^\infty t f_A(t) dt / \int_\tau^\infty f_A(t) dt$$

$$= \left\{ (1/\mu_A) - \int_0^\tau t f_A(t) dt \right\} / \left\{ 1 - \int_0^\tau f_A(t) dt \right\}$$

Correction factor;

$$\alpha_A = 1 - \tau \mu'_A$$

Fig. A.6 Preprocessing of reliability data
with log-normal distribution for basic events A, D, E.

Probability density function of time to failure;

$$f_B(t) = \mu e^{-\mu t}$$

For example, $\mu = 1/24$

$$\lambda_B = 1 \times 10^{-7} \quad [1/h]$$

$$\mu_B = 1/24 \quad [1/h]$$



Preprocessing

Failure rate for failure state lasting less than τ ;

$$\lambda''_B = \lambda_B \{ 1 - e \times p(-\mu_B \tau) \}$$

Failure rate for failure state lasting over τ ;

$$\lambda'_B = \lambda_B e \times p(-\mu_B \tau)$$

Mean time to repair for failure state lasting less than τ ;

$$1/\mu''_B = \frac{1 - (1 + \mu_B \tau) e \times p(-\mu_B \tau)}{\mu_B \{ 1 - e \times p(-\mu_B \tau) \}}$$

Mean time to repair for failure state over τ ;

$$1/\mu'_B = (1/\mu_B) + \tau$$

Correction factor;

$$\begin{aligned} \alpha_B &= (1/\mu_B) / ((1/\mu_B) + \tau) \\ &= 1 - \tau \mu'_B \end{aligned}$$

Fig. A.7 Preprocessing of reliability data with exponential distribution for a basic event B.

付録B TITANの取り扱いマニュアル

B.1 入力データ

プログラムの入力データはフリーフォーマットである。入力データに使用する文字はすべて半角の英数字である。

入力方法はミニマルカットセット毎に入力する場合と、事象グループで入力する場合とがある。
 <1 s t レコード>, <2 n d レコード>に関しては両方の方法とも同一の入力である。

B.1.1 入力データ（ミニマルカットセット毎に入力する場合）

<1 s t レコード>

SORT, MAXTT, LOOP, YUUYO, TMAXIN, NHIS, THIS

SORT :1カラムから4カラムにSORTと記入すると、ミニマルカットセットごとに出力する計算結果を、寿命が小さい順に並び替える。（SORTは半角大文字である。）
 ミニマルカットセットの入力した順に出力する時は、この部分は何も記入しない。

MAXTT :試行回数。

機器故障率等の値の分布を考慮する時は、1組の故障率等の値に対する試行回数である。

LOOP :機器故障率等の値の分布を考慮する時、故障率等の値の繰り返し回数。
 通常は1とする。

YUUYO :猶予時間（時）。

猶予時間を考えないときは0とする。

TMAXIN :最大試行時間（時）。

この時間を超えても事故が発生しない時は、計算を打ち切る。
 事故発生時間の目安をつけて、通常は大きな値を入力する。

NHIS :故障時間のヒストグラムをファイル出力するときに入力する。
 ヒストグラムのランクの個数を入力する。

THIS :故障時間のヒストグラムをファイル出力するときに入力する。

ヒストグラムの 1 ランクの大きさ(年)を入力する。

NHIS, THIS の例；

NHIS, THIS にそれぞれ、20, 100.0 と入力すると次の意味になる。

故障時間のヒストグラムは (0 年～100 年) (100 年～200 年) . . . (1800 年～2000 年)
と区切って求める。

< 2 n d レコード >

このレコードは、機器の個数繰り返し入力する。

NAME, NK, TYPE, CHTIME, RAMBDA, MTTR, MIUDIS, ERRFR, TAIRYU

NAME : 機器（基本事象）名称（8 文字以内のキャラクターで入力する。）

途中に空白を含んではならない。）

NK : 機器（基本事象）番号。（順に 1、2、3、. . . と記入する。）

TYPE : 機器（基本事象）タイプ。（1, 2, 3 のいずれかを記入する。）

CHTIME : 機器タイプが 2 のとき、故障チェック時間を記入する。（単位 時）
機器タイプが 1, 3 の時は 0 を指定する。

RAMBDA : 機器タイプ 1, 2 の時 機器故障率を記入する。（単位 1／時）
(機器故障率は指數分布である。)
機器タイプ 3 の時 機器故障確率を記入する。

MTTR : 平均修復時間。（単位 時）

MIUDIS : MTTR の分布を指定する。

= - 2 ; 指數分布

= - 1 ; 一定値

> 0.0 ; 対数正規分布。数値はエラーファクター。

注) MIUDIS を対数正規分布と指定すると、計算時間は数倍に増大する。

ERRFR : 機器故障率等の分布を考慮する時、RAMBDA の分布は対数正規分布とする。
ここでは、対数正規分布のエラーファクターを指定する。
機器故障率等の分布を考慮しない時は、1.0 とする。

ERRFM : 機器故障率等の分布を考慮する時、 μ ($=1/MTTR$) の分布は対数正規分布とする。
ここでは、対数正規分布のエラーファクターを指定する。
機器故障率等の分布を考慮しない時は、1.0 とする。

TAIRYU : 滞留時間を考慮するために指定する。
滞留時間を考慮できる機器はタイプ3のみである。
滞留時間を考慮するタイプ3機器に対して、その機器が付随しているタイプ1, 2
の機器が故障してから、そのタイプ3機器が働くまでの滞留時間を指定する。
(単位 時)
タイプ1, 2の機器では0.0とする。
滞留時間を考慮しないタイプ3機器では0.0とする。

<3 r d レコード>

2 n d レコードの終りを示すため、空白行を1レコード入力する。

<4 t h レコード>

このレコードは、ミニマルカットセットの数繰り返し入力する。

NC, NUM1, NUM2

NC : ミニマルカットセット番号。 (順に 1, 2, 3, . . . と記入する。)

NUM1 : このミニマルカットセットに含まれる、タイプ1, タイプ2の機器数。

NUM2 : このミニマルカットセットに含まれる、タイプ1, タイプ2のすべての機器が故障した
時に働くタイプ3の機器の数。

<4. 1 t h レコード>

このレコードは<4 t h レコード>のNUM1回繰り返し入力する。

NK, NUM3

NK : 機器番号。 (<2 n d レコード>のNKの値。) (タイプ1, タイプ2の機器のみ。)

NUM3 : 上記NKの機器が故障した時に働くタイプ3の機器の数。

<4. 1. 1 t h レコード>

<4. 1 t h レコード>のNUM3の値が0の時、このレコードは入力しない。

<4. 1 t h レコード>のNUM3の値が0でない時、このレコードは1レコード入力する。
NK1, NK2, NK3, NK4, ...

<4. 1 t h レコード>のNKで指定した機器が故障した時に働くタイプ3の機器の機器番号をNUM3個入力する。

<4. 2 t h レコード>

<4 t h レコード>のNUM2の値が0の時、このレコードは入力しない。

<4 t h レコード>のNUM2の値が0でない時、このレコードは1レコード入力する。
NK1, NK2, NK3, NK4, ...

<4 t h レコード>のミニマルカットセットに含まれる、タイプ1, タイプ2のすべての機器が故障した時に働くタイプ3の機器の機器番号をNUM2個入力する。

B.1.2 入力データ（事象グループで入力する場合）

<1 s t レコード> (ミニマルカットセット毎に入力する場合と同一)

<2 n d レコード> (ミニマルカットセット毎に入力する場合と同一)

<3 r d レコード>

2 n d レコードの終りを示し、事象グループで入力することを示すために、1カラムから5カラムに GROUP と記入する。

<4 t h レコード>

このレコードは、事象グループ数繰り返し入力する。

GROUP, NG

GROUP : 1カラムから5カラムに GROUP と記入する。

NG : グループ番号。 (順に 1, 2, 3, . . . と記入する。)

<4. 1 t h レコード>

このレコードは<4 t h レコード>で指定したグループに属するサブグループ数だけ繰りかえし入力する。

NAME1, NAME2, NAME3, ...

NAME1, ... : サブグループを構成する機器（基本事象）の名称（2nd レコードで指定したもの）を1レコードに羅列する。

B.2 入力データ例

B.2.1 例1（ミニマルカットセットごとに入力）

1000 1 30.0 1.0D50	< 1 s t レコード> MAXTT, LOOP, YUUYO, TMAXIN
B004 1 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード> 機器データ
B009 2 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B010 3 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B011 4 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B013 5 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B018 6 3 0.0 0.01 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B023 7 3 0.0 0.013 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B025 8 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B026 9 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B027 10 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B028 11 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B029 12 3 0.0 0.5 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B030-0 13 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B031 14 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B032 15 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B042 16 3 0.0 1.00e-5 8.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B053 17 3 0.0 9.70E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B054 18 3 0.0 0.1 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B058 19 3 0.0 0.01 10000. -1 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B068 20 1 0.0 5.00E-7 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B030-1 21 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B030-2 22 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B030-3 23 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
B030-4 24 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.0	< 2 n d レコード>
< 3 r d レコード>	
1 1 5	< 4 t h レコード> ミニマルカットセット 1
13 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 7	< 4. 2 t h レコード>
2 1 5	< 4 t h レコード> ミニマルカットセット 2
21 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 11	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 3
3 1 5	< 4 t h レコード>
22 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 10	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 4
4 1 5	< 4 t h レコード>
23 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 8	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 5
5 1 5	< 4 t h レコード>
24 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 9	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 6
6 1 8	< 4 t h レコード>
1 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 17 7 2 3 4 19	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 7
7 1 8	< 4 t h レコード>
5 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 17 7 6 2 4 3	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 8
8 2 5	< 4 t h レコード>
14 0	< 4. 1 t h レコード>
15 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 12 17 7	< 4. 2 t h レコード> ミニマルカットセット 9
9 1 4	< 4 t h レコード>
20 0	< 4. 1 t h レコード>
16 18 17 7	< 4. 2 t h レコード>

B.2.2 例2（ミニマルカットセットごとに入力）

1000	1	30.0	1.0D50								
B004	1	1	0.0	1.50e-4	10000.	-1	1.0	1.0	0.0		
B009	2	3	0.0	0.95	30.	-2	1.0	1.0	0.0		
B010	3	3	0.0	0.95	30.	-2	1.0	1.0	5.0	滞留時間のため B004 故障後 5 時間かかる	
B011	4	3	0.0	0.95	30.	-2	1.0	1.0	10.	滞留時間のため B004 故障後 10 時間かかる	
B023	5	3	0.0	0.013	10000.	-1	1.0	1.0	15.	滞留時間のため B004 故障後 15 時間かかる	
B042	6	3	0.0	1.00e-5	10000.	-1	1.0	1.0	0.0		
B053	7	3	0.0	9.70E-3	10000.	-1	1.0	1.0	0.0		
B054	8	3	0.0	0.1	10000.	-1	1.0	1.0	0.0		
B058	9	3	0.0	0.01	10000.	-1	1.0	1.0	0.0		

```

1 1 4
1 4
9 2 3 4
6 7 8 5

```

機器 9,2,3,4 は B004 に付隨
機器 6,7,8,5 は ミニマルカットセットに付隨

B.2.3 例3（事象グループで入力）

```

SORT 200000 1 00.0 1.0D50 20 5.0E11      <==> < 1 s t レコード>
B004 1 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.    <==> 基本事象 B004 のデータ
B009 2 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.    <==> 基本事象 B009 のデータ
B010 3 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.
B011 4 3 0.0 0.95 10000. -1 1.0 1.0 0.
B013 5 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.
B018 6 3 0.0 0.01 10000. -1 1.0 1.0 0.
B023 7 3 0.0 0.013 10000. -1 1.0 1.0 0.
B025 8 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.
B026 9 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.
B027 10 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.
B028 11 3 0.0 3.0E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.
B029 12 3 0.0 0.5 10000. -1 1.0 1.0 0.
B030 13 1 0.0 1.50e-5 24.0 -2 1.0 1.0 0.
B031 14 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.
B032 15 1 0.0 1.50e-4 24.0 -2 1.0 1.0 0.
B042 16 3 0.0 1.00e-5 8.0 -2 1.0 1.0 0.
B053 17 3 0.0 9.70E-3 10000. -1 1.0 1.0 0.
B054 18 3 0.0 0.1 10000. -1 1.0 1.0 0.
B058 19 3 0.0 0.01 10000. -1 1.0 1.0 0.

GROUP                                <==> グループ 1 のサブグループを以下に入力
GROUP 1                               <==> サブグループ 1,1 の基本事象名称
B004 B058 B023 B009 B010 B011          <==> サブグループ 1,2 の基本事象名称
B004 B058 B025 B009 B010 B011
B004 B058 B026 B009 B010 B011
B004 B058 B027 B009 B010 B011
B004 B058 B028 B009 B010 B011
B030 B029 B023
B030 B029 B025
B030 B029 B026
B030 B029 B027
B030 B029 B028
B031 B032 B029 B023
B031 B032 B029 B025
B031 B032 B029 B026
B031 B032 B029 B027
B031 B032 B029 B028
B013 B018 B023 B009 B010 B011
B013 B018 B025 B009 B010 B011
B013 B018 B026 B009 B010 B011
B013 B018 B027 B009 B010 B011
B013 B018 B028 B009 B010 B011

GROUP 2                                <==> グループ 2 のサブグループを以下に入力
B042 B053 B054                          <==> サブグループ 2,1 の基本事象名称

```

B.3 計算結果のリスト出力

B.3.1 入力例 1 の出力

MAXTT(TRAIL NUMBER) = 1000
 LOOP(RAMBDA NUMBER) = 1
 YUYO = 3.000E+01(HOUR)
 TMAXIN(MAX TIME) = 1.000E+50(HOUR)

*** KIKI DATA ***

NO.	NAME	TYPE	CHECK-TIM.	RAMBDA(P)	MTTR(HOUR)	MIU DIST.	ERR-F(RAM)	ERR-F(MIU)	TAIRYUU
1	B004	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
2	B009	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
3	B010	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
4	B011	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
5	B013	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
6	B018	3	0.000E+00	1.000E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
7	B023	3	0.000E+00	1.300E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
8	B025	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
9	B026	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
10	B027	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
11	B028	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
12	B029	3	0.000E+00	5.000E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
13	B030-0	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
14	B031	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
15	B032	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
16	B042	3	0.000E+00	1.000E-05	8.000E+00	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
17	B053	3	0.000E+00	9.700E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
18	B054	3	0.000E+00	1.000E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
19	B058	3	0.000E+00	1.000E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
20	B068	1	0.000E+00	5.000E-07	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
21	B030-1	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
22	B030-2	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
23	B030-3	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
24	B030-4	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00

**** MIN-CUTSET DATA ****

MIN-CUTSET 1
B030-0

B042 B054 B029 B053 B023

MIN-CUTSET 2
B030-1

B042 B054 B029 B053 B028

MIN-CUTSET 3
B030-2

B042 B054 B029 B053 B027

MIN-CUTSET 4
B030-3

B042 B054 B029 B053 B025

MIN-CUTSET 5
B030-4

B042 B054 B029 B053 B026

MIN-CUTSET 6
B004

B042 B054 B053 B023 B009 B010 B011 B058

MIN-CUTSET 7
B013

B042 B054 B053 B023 B018 B009 B011 B010

MIN-CUTSET 8
B031
B032

B042 B054 B029 B053 B023

MIN-CUTSET 9
B068

B042 B054 B053 B023

**** FTL RESULT ***

FTLの結果（猶予時間は考慮されていない）

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)
1	9.454E-16	8.282E-12
2	2.182E-16	1.911E-12
3	2.182E-16	1.911E-12
4	2.182E-16	1.911E-12
5	2.182E-16	1.911E-12
6	1.616E-16	1.416E-12
7	1.616E-16	1.416E-12
8	6.761E-17	5.922E-13
9	6.305E-17	5.523E-13
TOTAL	2.272E-15	1.990E-11

**** MONTECALRO RESULT ***

モンテカルロの結果

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)	PROB.	HIT-N	MEAN(Y)	S.D.(Y)	S.D./MEAN
1	2.637E-16	2.310E-12	4.220E-01	422	1.827E+11	1.955E+11	1.070E+00
2	7.191E-17	6.300E-13	9.500E-02	95	1.508E+11	1.436E+11	9.522E-01
3	5.970E-17	5.230E-13	9.400E-02	94	1.797E+11	1.650E+11	9.177E-01
4	6.739E-17	5.904E-13	1.080E-01	108	1.829E+11	1.864E+11	1.019E+00
5	5.215E-17	4.569E-13	9.600E-02	96	2.101E+11	1.895E+11	9.021E-01
6	4.853E-17	4.251E-13	7.700E-02	77	1.811E+11	1.849E+11	1.021E+00
7	4.425E-17	3.876E-13	7.400E-02	74	1.909E+11	1.843E+11	9.653E-01
8	3.653E-18	3.200E-14	6.000E-03	6	1.875E+11	1.251E+11	6.671E-01
9	2.415E-17	2.116E-13	2.800E-02	28	1.323E+11	1.341E+11	1.013E+00
TOTAL	6.302E-16	5.520E-12	1.000E+00	1000	1.812E+11	1.839E+11	1.015E+00

事故発生頻度

事故発生時間(平均とS.D.)

*** ELAPSE TIME INFORMATION

TOTAL E-TIME = 18.0000000000000
CAL. E-TIME = 18.0000000000000

B.3.2 入力例 2 の出力

MAXTT(TRAIAL NUMBER) = 1000
 LOOP(RAMBDA NUMBER) = 1
 YUUYO = 3.000e+01(HOUR)
 TMAXIN(MAX TIME) = 1.000e+50(HOUR)

*** KIKI DATA ***

NO.	NAME	TYPE	CHECK-TIM.	RAMBDA(P)	MTTR(HOUR)	MIU DIST.	ERR-F(RAM)	ERR-F(MIU)	TAIRYUU
1	B004	1	0.000e+00	1.500e-04	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00
2	B009	3	0.000e+00	9.500e-01	1.000e+01	-2.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00
3	B010	3	0.000e+00	9.500e-01	1.000e+01	-2.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	5.000e+00
4	B011	3	0.000e+00	9.500e-01	1.000e+01	-2.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	1.000e+01
5	B023	3	0.000e+00	1.300e-02	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	1.500e+01
6	B042	3	0.000e+00	1.000e-05	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00
7	B053	3	0.000e+00	9.700e-03	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00
8	B054	3	0.000e+00	1.000e-01	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00
9	B058	3	0.000e+00	1.000e-02	1.000e+04	-1.000e+00	1.000e+00	1.000e+00	0.000e+00

**** MIN-CUTSET DATA ****

MIN-CUTSET 1
 B004
 B058 B009 B010 B011
 B042 B053 B054 B023

**** FTL RESULT ***

FTL の結果 (猶予時間、滞留時間等は考慮されていない)
い)

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)
1	6.487e-17	5.683e-13
TOTAL	6.487e-17	5.683e-13

**** MONTECARLO RESULT ***

モンテカルロの結果

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)	PROB.	HIT-N	MEAN(Y)	S.D(Y)	S.D./MEAN
1	4.078e-22	3.572e-18	1.000e+00	1000	2.799e+17	2.936e+17	1.049e+00
TOTAL	4.078e-22	3.572e-18	1.000e+00	1000	2.799e+17	2.936e+17	1.049e+00

事故発生頻度

事故発生時間 (平均と S.D)

*** ELAPSE TIME INFORMATION

TOTAL E-TIME = 4176.000000000000
 CAL. E-TIME = 4176.000000000000

B.3.3 入力例 3 の出力

MAXTT(TRAIAL NUMBER) = 200000
 LOOP(RAMBDA NUMBER) = 1
 YUYO = 0.000E+00(HOUR)
 TMAXIN(MAX TIME) = 1.000E+50(HOUR)

*** KIKI DATA ***

NO.	NAME	TYPE	CHECK-TIM.	RAMBDA(P)	MTTR(HOUR)	MIU DIST.	ERR-F(RAM)	ERR-F(MIU)	TAIRYUU
1	B004	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
2	B009	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
3	B010	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
4	B011	3	0.000E+00	9.500E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
5	B013	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
6	B018	3	0.000E+00	1.000E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
7	B023	3	0.000E+00	1.300E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
8	B025	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
9	B026	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
10	B027	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
11	B028	3	0.000E+00	3.000E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
12	B029	3	0.000E+00	5.000E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
13	B030	1	0.000E+00	1.500E-05	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
14	B031	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
15	B032	1	0.000E+00	1.500E-04	2.400E+01	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
16	B042	3	0.000E+00	1.000E-05	8.000E+00	-2.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
17	B053	3	0.000E+00	9.700E-03	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
18	B054	3	0.000E+00	1.000E-01	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
19	B058	3	0.000E+00	1.000E-02	1.000E+04	-1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00

KIKI NO= 35

NAME=B004	B009	B010	B011	B013	B018	B023	B025	B026
B027	B028	B029	B030	B031	B032	B042	B053	B054
B058	B004*	B004*	B004*	B030*	B030*	B030*	B030*	B030*
B031*	B031*	B031*	B013*	B013*	B013*	B013*	B013*	B013*

**** MIN-CUTSET DATA ****

<===== プログラム内部で構成したミニマルカットセット

MIN-CUTSET	1	B004	B058	B023	B009	B010	B011
		B042	B053	B054			
MIN-CUTSET	2	B004*	B058	B025	B009	B010	B011
		B042	B053	B054			
MIN-CUTSET	3	B004*	B058	B026	B009	B010	B011
		B042	B053	B054			
MIN-CUTSET	4	B004*	B058	B027	B009	B010	B011
		B042	B053	B054			
MIN-CUTSET	5	B004*	B058	B028	B009	B010	B011
		B042	B053	B054			
MIN-CUTSET	6	B030	B029	B023			
		B042	B053	B054			

MIN-CUTSET	7					
	B030*	B029	B025			
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	8					
	B030*	B029	B026			
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	9					
	B030*	B029	B027			
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	10					
	B030*	B029	B028			
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	11					
	B031					
	B032					
		B029	B023	B042	B053	B054
MIN-CUTSET	12					
	B031*					
	B032					
		B029	B025	B042	B053	B054
MIN-CUTSET	13					
	B031*					
	B032					
		B029	B026	B042	B053	B054
MIN-CUTSET	14					
	B031*					
	B032					
		B029	B027	B042	B053	B054
MIN-CUTSET	15					
	B031*					
	B032					
		B029	B028	B042	B053	B054
MIN-CUTSET	16					
	B013	B018	B023	B009	B010	B011
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	17					
	B013*	B018	B025	B009	B010	B011
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	18					
	B013*	B018	B026	B009	B010	B011
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	19					
	B013*	B018	B027	B009	B010	B011
		B042	B053	B054		
MIN-CUTSET	20					
	B013*	B018	B028	B009	B010	B011
		B042	B053	B054		

**** FTL RESULT ***

< == = FTL による計算結果

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)
6	9.454E-16	8.282E-12
7	2.182E-16	1.911E-12
8	2.182E-16	1.911E-12
9	2.182E-16	1.911E-12
10	2.182E-16	1.911E-12
1	1.616E-16	1.416E-12
16	1.616E-16	1.416E-12
11	6.761E-17	5.922E-13
5	3.729E-17	3.267E-13
2	3.729E-17	3.267E-13
3	3.729E-17	3.267E-13
4	3.729E-17	3.267E-13
17	3.729E-17	3.267E-13
18	3.729E-17	3.267E-13
19	3.729E-17	3.267E-13
20	3.729E-17	3.267E-13
13	1.560E-17	1.367E-13
14	1.560E-17	1.367E-13
15	1.560E-17	1.367E-13
12	1.560E-17	1.367E-13
TOTAL	2.570E-15	2.251E-11

**** MONTECALRO RESULT ****

<===== モンテカルロ法による計算結果

NO.	(1/HOUR)	(1/YEAR)	PROB.	HIT-N	MEAN(Y)	S.D.(Y)	S. D./MEAN
6	9.509E-16	8.330E-12	3.688E-01	73750	4.427E+10	4.420E+10	9.985E-01
7	2.206E-16	1.932E-12	8.508E-02	17017	4.403E+10	4.379E+10	9.945E-01
9	2.198E-16	1.925E-12	8.532E-02	17064	4.432E+10	4.427E+10	9.989E-01
8	2.177E-16	1.907E-12	8.528E-02	17057	4.472E+10	4.493E+10	1.005E+00
10	2.164E-16	1.896E-12	8.440E-02	16881	4.453E+10	4.387E+10	9.852E-01
16	1.636E-16	1.433E-12	6.365E-02	12730	4.442E+10	4.396E+10	9.898E-01
1	1.603E-16	1.404E-12	6.218E-02	12437	4.429E+10	4.471E+10	1.009E+00
11	6.561E-17	5.748E-13	2.590E-02	5180	4.506E+10	4.478E+10	9.938E-01
20	3.900E-17	3.416E-13	1.455E-02	2910	4.259E+10	4.314E+10	1.013E+00
2	3.762E-17	3.295E-13	1.466E-02	2933	4.450E+10	4.462E+10	1.003E+00
3	3.733E-17	3.270E-13	1.431E-02	2863	4.377E+10	4.430E+10	1.012E+00
4	3.729E-17	3.267E-13	1.457E-02	2915	4.461E+10	4.413E+10	9.891E-01
18	3.697E-17	3.238E-13	1.443E-02	2887	4.457E+10	4.388E+10	9.843E-01
5	3.665E-17	3.211E-13	1.469E-02	2939	4.577E+10	4.668E+10	1.020E+00
19	3.661E-17	3.207E-13	1.477E-02	2954	4.606E+10	4.677E+10	1.016E+00
17	3.614E-17	3.166E-13	1.417E-02	2834	4.475E+10	4.485E+10	1.002E+00
12	1.597E-17	1.399E-13	6.030E-03	1206	4.311E+10	4.179E+10	9.693E-01
14	1.532E-17	1.342E-13	5.910E-03	1182	4.403E+10	4.414E+10	1.003E+00
13	1.440E-17	1.261E-13	5.630E-03	1126	4.465E+10	4.192E+10	9.390E-01
15	1.421E-17	1.245E-13	5.675E-03	1135	4.560E+10	4.596E+10	1.008E+00
TOTAL	2.572E-15	2.253E-11	1.000E+00	200000	4.438E+10	4.430E+10	9.981E-01

*** ELAPSE TIME INFORMATION

TOTAL E-TIME = 988.000000000000
 CAL. E-TIME = 988.000000000000

B.4 事故発生時間のヒストグラムファイル出力

B.2.3で示す例3では、入力データの1stレコード目の最後に、故障時間のヒストグラムファイル出力のためのデータが入力されている。このため、計算終了時にファイル fort.8 が作成される。

<fort.8の中身>

250000000000.00	86179	<0から 5×10^{11} 年に故障するものは 86179 ヒストリー>
750000000000.00	48859	5×10^{11} から 10×10^{11} 年に故障するものは 48859 ヒストリー
1250000000000.0	28070	
1750000000000.0	15933	
2250000000000.0	9051	
2750000000000.0	5150	
3250000000000.0	2898	
3750000000000.0	1725	
4250000000000.0	916	
4750000000000.0	502	
5250000000000.0	299	
5750000000000.0	193	
6250000000000.0	93	
6750000000000.0	62	
7250000000000.0	30	
7750000000000.0	17	
8250000000000.0	7	
8750000000000.0	7	
9250000000000.0	5	
9750000000000.0	3	95×10^{11} から 100×10^{11} 年に故障するものは 3 ヒストリー
10250000000000.0	1	100×10^{11} 年以上で故障するものは 1 ヒストリー

このファイルを使用して、EXCELでヒストグラム作図することができる。

B.5 実行方法

W i n d o u s P C で実行する方法を示す。

B.5.1 計算実行方法

この説明では、実行形式は C:\TITAN というディレクトリーにあって、その名称は Monte.exe であるものとする。

- ① 入力データを実行形式のあるディレクトリー C:\TITAN にテキスト形式で作成する。名称は何でもよい。説明のため 名称を Data.txt とする。
- ② M S D O S の画面で、次のコマンドを実行する。

<計算結果を画面に出力する場合>

Monte < Data.txt

<計算結果を新規ファイルに出力する場合>

Monte < Data.txt > 出力するファイル名

<計算結果を既存ファイルに追加出力する場合>

Monte < Data.txt >> 出力するファイル名

付録 C プログラム説明書

ここでは、TITAN コードのプログラム説明を、ルーチン一覧、プログラム構造、ルーチン詳細説明 の順で行う。

ルーチンの一覧を表 1 に示す。また、プログラムの呼び出し関係を図 1 に示す。

表 1 ルーチン一覧

No	Name	機能
1	Chkint	入力データのチェック。整数か否かを調べて、整数のときは整数タイプ変数に変数変換する。
2	Drerfc	エラーファンクション計算
3	Free6w	フリーフォーマットの解釈
4	Ftlcal	FTL で計算
5	Gropin	グループ形式で作成されたデータを入力する
6	Gropiw	グループ形式でデータ入力されたときに、ミニマルカットセットを作成する。
7	Inpchn	入力データで機器名称が与えられているとき、機器名称から機器番号に変更する。
8	Inpdat	入力データの読み込み
9	Inrand	乱数の初期値をセットする
10	Kikdch	あるミニマルカットセットのタイプ 1, 2 の機器がすべて同じ機器の時、そのタイプ 1, 2 機器に対して異なる機器番号を与える。
11	Monte	メインプログラム
12	Ramset	機器故障率を対数正規分布で与える
13	Randun	乱数を発生させる
14	Sortgl	配列 A の値が大きい順にアドレスを並び替える
15	Sortg2	配列 A と B の積の値が大きい順にアドレスを並び替える
16	Susumf	1 回試行をして機器の故障時刻を求める
17	T3calc	T3 を計算する。T3 とは、ミニマルカットセットに含まれるタイプ 3 機器全ての故障率の積である。
18	Tscal1	タイプ 1 機器の故障時間を求める
19	Tscal2	タイプ 2 機器の故障時間を求める
20	Tscalu	機器の修復時間を求める

プログラム構造

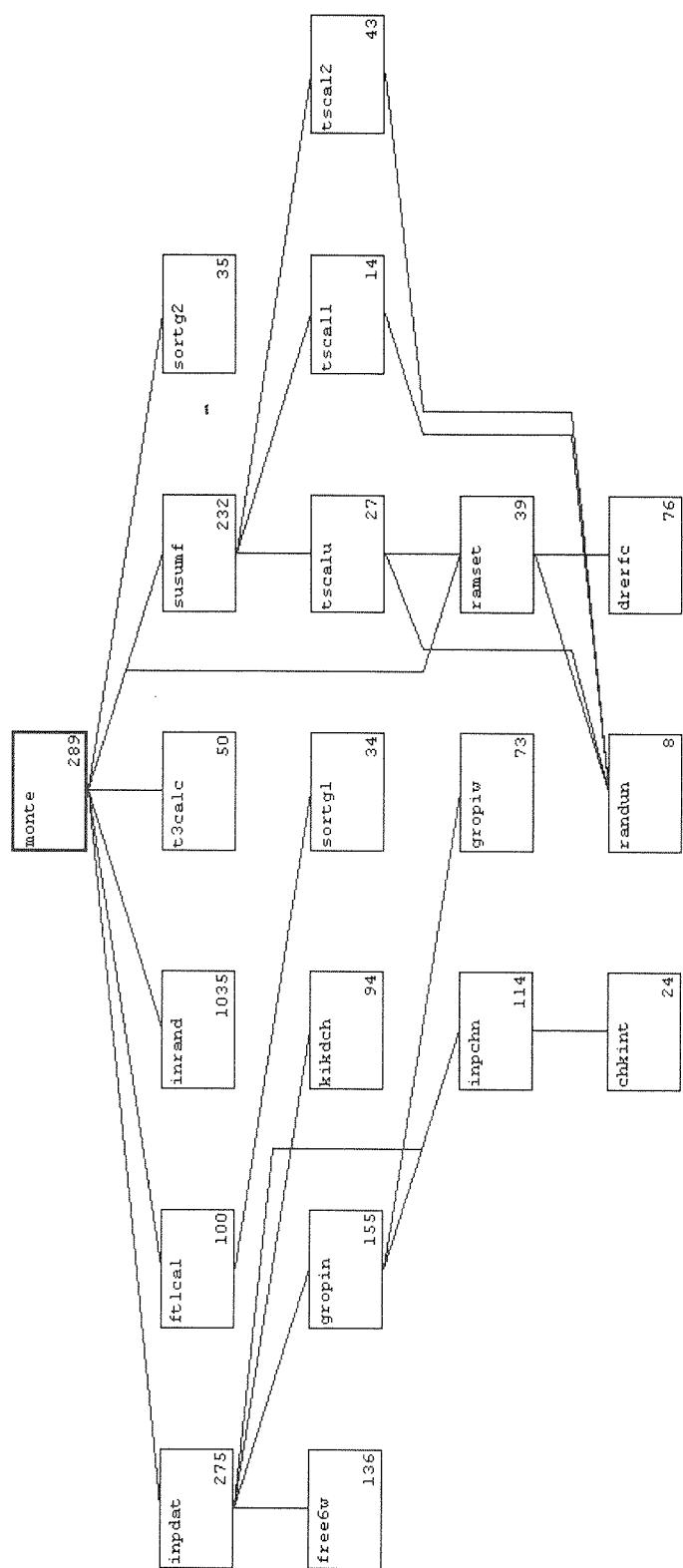


図1 プログラムの構造及びルーチンの呼び出し関係

次に、ルーチンの詳細を説明する。

メインルーチン説明

ルーチン名：MONTE

目的：全体のコントロール

パラメータ：メインルーチンで設定しているパラメータを表2に示す。

表2 パラメータ説明

変数名	内容
MNK0	機器の最大数
MMMOD	最大ミニマルカットセット数
MIMOD	1つのミニマルカットセットに含まれるタイプ1, 2機器の最大数
MLMOD	1つのタイプ1, 2機器あるいは1つのミニマル カットセットに付随するタイプ3機器の最大数

処理フローを次に図2に示す。

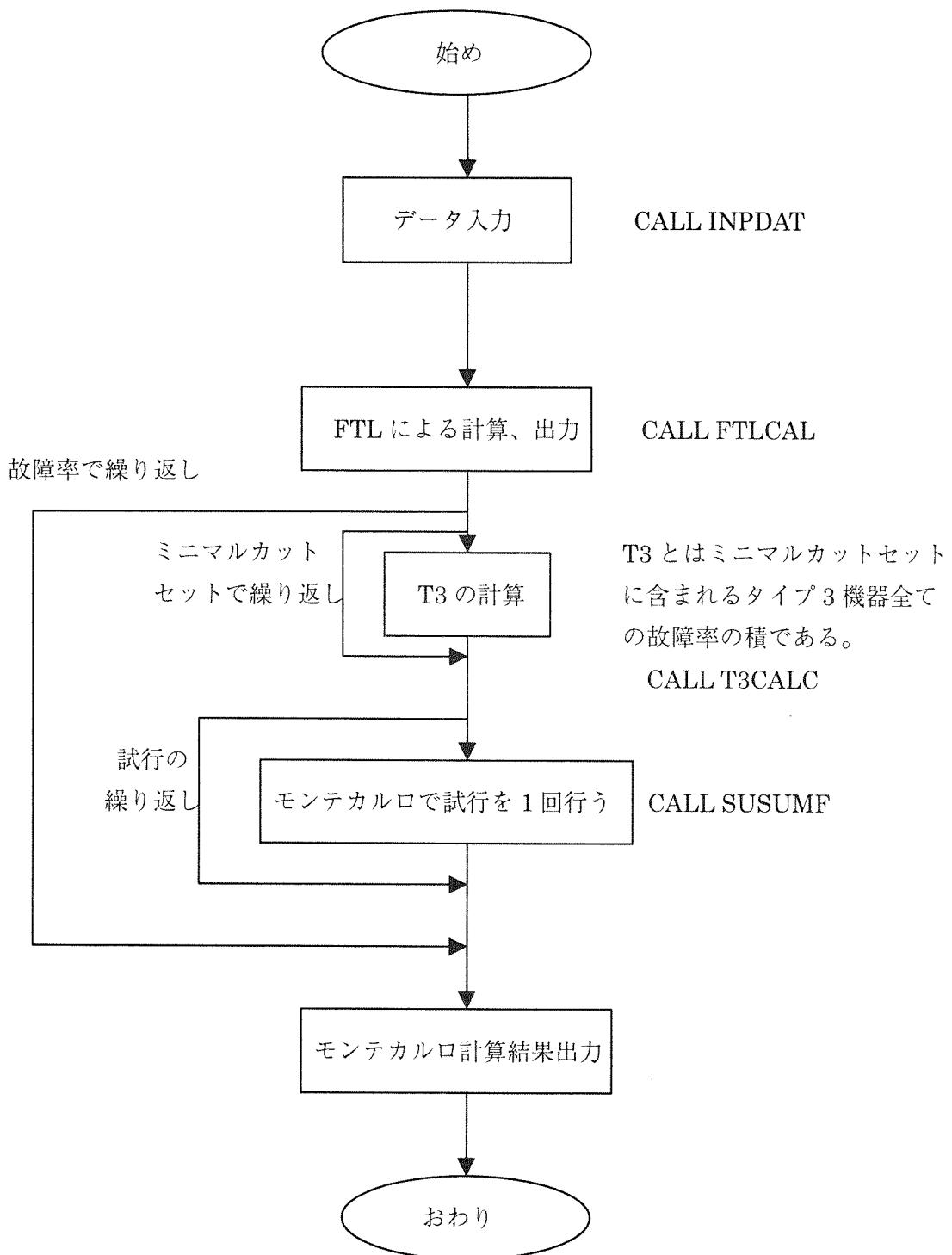


図 2 メインルーチンの処理フロー

サブルーチン INPDAT 説明

ルーチン名：INPDAT

目的：データ入力； 引数の説明を表3に処理フローを図3に示す。

表3 サブルーチン INPDAT の引数の説明

変数名	I/O	内容
MAXTT	0	試行最大回数
LOOP	0	λ のループ数
MMOD	0	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	0	ミニマルカットセット M 番のタイプ 1, 2 の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	0	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器の機器番号 (タイプ 1, 2 のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NUIU(I, M)	0	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の個数。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ 3 機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1$
NUIUM(L, I, M)	0	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の番号。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付隨するタイプ 3 機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
NKO	0	機器の個数 (タイプ 1, 2, 3)
KIKI(J)	0	機器タイプ番号 $1 \leq J \leq NKO$
CHECK(J)	0	タイプ 2 機器の時の故障チェック時間間隔 $1 \leq J \leq NKO$
RAM(N, J)	0	RAM(1, J) : λ (タイプ 1, 2 のとき) RAM(1, J) : 故障確率 (タイプ 3 のとき) RAM(2, J) : RAM(1, J) のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
UIU(N, J)	0	UIU(1, J) : μ UIU(2, J) : 分布 ($1 \leq UIU(2, J)$ の時は対数正規分布である) UIU(3, J) : UIU(1, J) のエラーファクター RAM(1, J) のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2, 3$
TAIR(J)	0	機器タイプ 3 のとき付隨しているタイプ 1 機器の滞留時間 $1 \leq J \leq NKO$
TMAXIN	0	計算最大時刻
YUYYO	0	猶予時間
NHIS	0	ヒストグラムランク数
THIS	0	ヒストグラム最大時間
ISORT	0	=0: 計算結果を並び替えない =1: 計算結果を事故発生頻度が大きい順に並び替える
TIMFAC	0	高速化処理の指定 TIMFAC<1.0 の時、高速化処理無し

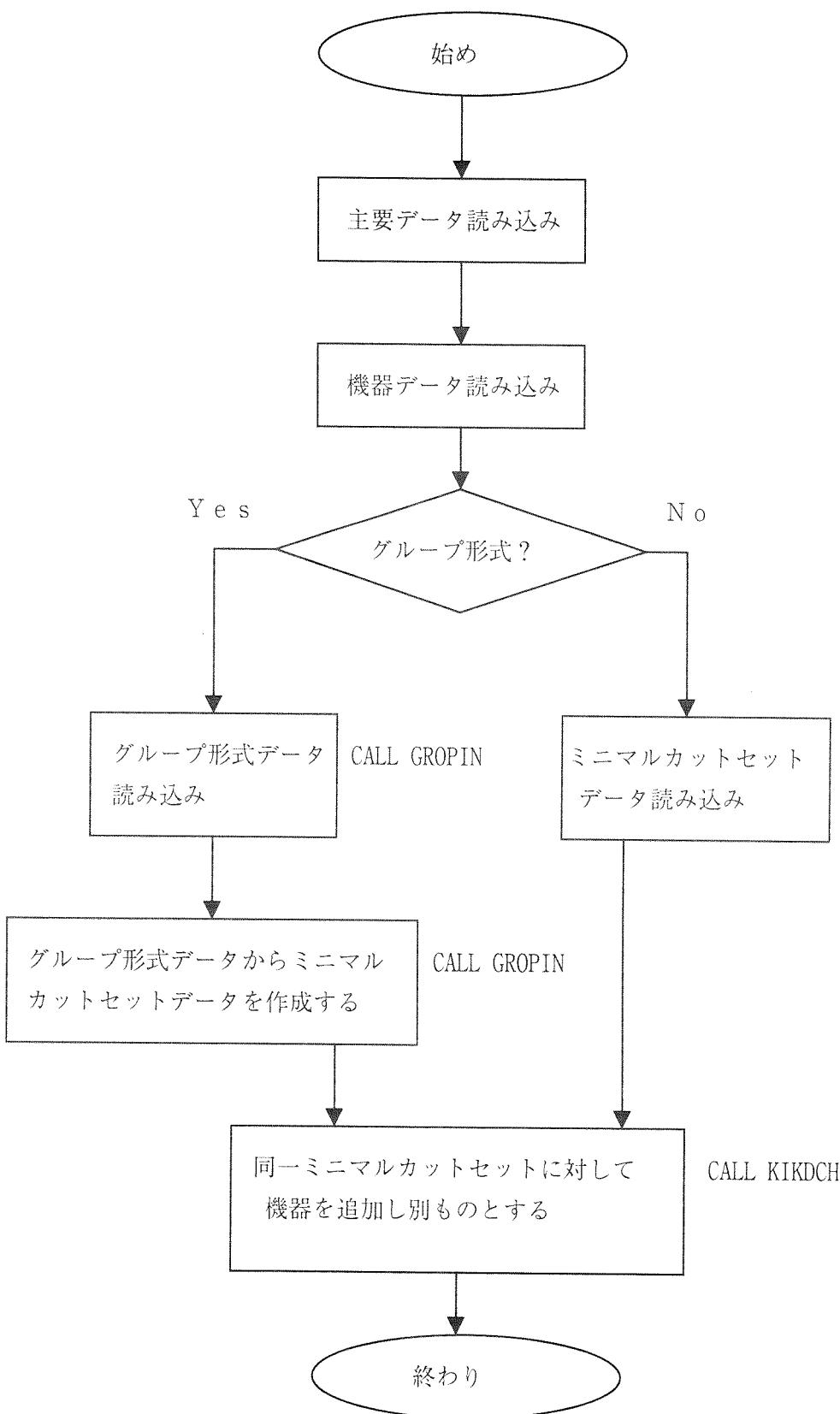


図3 サブルーチン INPDAT の処理フロー

サブルーチン CHKINT 説明

ルーチン名：CHKINT

目的：入力データのチェック。

整数か否かを調べて、整数のときは整数タイプ変数に変数変換する。

表4に引数の説明を示す。

表4 サブルーチン CHKINT の引数説明

変数名	I/O	内容
C8	I	文字タイプのデータ (CHARACTER*8)
NUMB	0	整数値 C8 が整数値のデータでないときは、NUMB=-9999 とする

サブルーチン FREE6W 説明

ルーチン名：FREE6W

目的：入力データ 1 レコードの解釈。

以下の形式のデータを解釈する。

‘文字データ 1’ ‘文字データ 2’ ‘文字データ 3’ ‘文字データ 4’

数値 1 数値 2 … 数値 n

表 5 に引数の説明を示す。

表 5 サブルーチン FREE6W の引数説明

変数名	I/O	内容
IAI	I	文字タイプのデータ (CHARACTER*1(80))
IALDC	0	文字データ 1 ~ 文字データ 4 をかえす。 CHARACTER*20 IALDC(4)である。 文字データが無いときは全て空白となる。 文字データが 1 つの時は、IALDC(2)以降が空白となる。
KTS	0	数値 1 数値 2 … 数値 n をかえす。 数値を整数としたときの値である。
TS	0	数値 1 数値 2 … 数値 n をかえす。 数値を実数としたときの値である。
ITS	0	数値の個数
INUM		使用しない

サブルーチン FTLCAL 説明

ルーチン名：FTLCAL

目的：F T Lでの計算及び出力

表6に引数の説明を示す。また、図4に処理フローを示す。

表6 サブルーチン FTLCAL 引数の 説明

変数名	I/O	内容
MMOD	I	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	I	ミニマルカットセットM番のタイプ1, 2の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	I	ミニマルカットセットM番のI番目機器の機器番号 (タイプ1, 2のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NUIU(I, M)	I	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付随するタイプ3機器の個数。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ3機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1$
NUIUM(L, I, M)	I	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付随するタイプ3機器の番号。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ3機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
NKO	I	機器の個数 (タイプ1, 2, 3)
KIKI(J)	I	機器タイプ番号、 $1 \leq J \leq NKO$
CHECK(J)	I	タイプ2機器の時の故障チェック時間間隔、 $1 \leq J \leq NKO$
RAM(N, J)	I	RAM(1, J): λ (タイプ1, 2のとき) RAM(1, J): 故障確率 (タイプ3のとき) RAM(2, J): RAM(1, J)のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
UIU(N, J)	I	UIU(1, J): μ UIU(2, J): 分布 ($1 \leq UIU(2, J)$ の時は対数正規分布である) UIU(3, J): UIU(1, J)のエラーファクター RAM(1, J)のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2, 3$
MNKO	I	機器の最大数
MMMOD	I	最大ミニマルカットセット数 (配列サイズである)
MIMOD	I	1つのミニマルカットセットに含まれるタイプ1, 2機器の最大数 (配列サイズである)
MLMOD	I	1つのタイプ1, 2機器に付随するタイプ3機器の最大数 (配列サイズである)
ISORT	I	=0: 計算結果を並び替えない =1: 計算結果を事故発生頻度が大きい順に並び替える

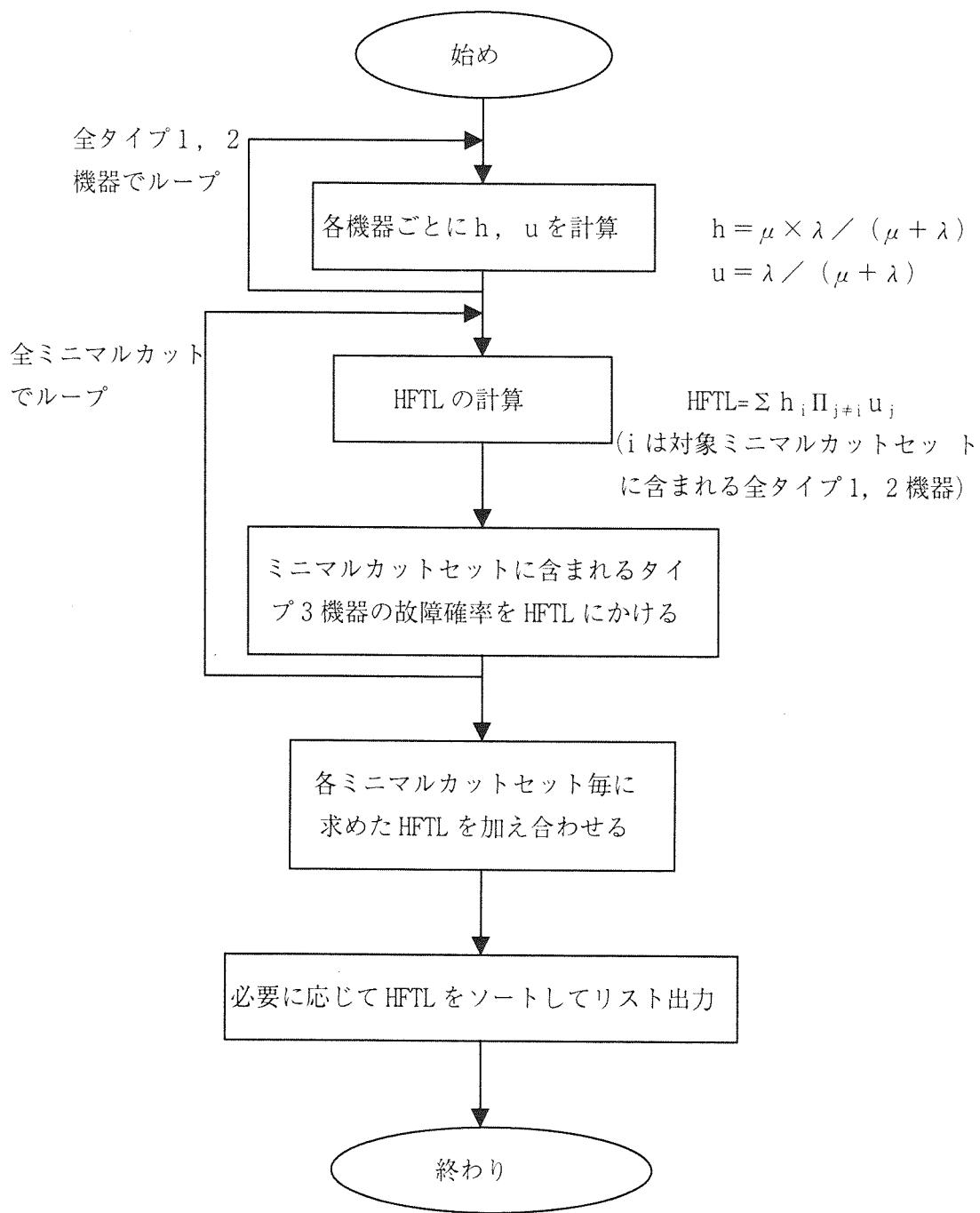


図4 サブルーチン FTLCAL の処理フロー

サブルーチン GROPIN 説明

ルーチン名：GROPIN

目的：グループ形式で作成されたデータを入力する

引数の説明を表7に示す。また、処理フローの説明を図5に示す。

表7 サブルーチン GROPIN 引数の説明

変数名	I/O	内容
NKO	I	機器の個数 (タイプ1, 2, 3)
KIKI(J)	I	機器タイプ番号、 $1 \leq J \leq NKO$
NAME	I	機器名称
MMMOD	I	最大ミニマルカットセット数 (配列サイズである)
MIMOD	0	1つのミニマルカットセットに含まれるタイプ1, 2機器の 最大数 (配列サイズである)
MLMOD	0	1つのタイプ1, 2機器に付随するタイプ3機器の最大数 (配列サイズである)
MMOD	0	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	0	ミニマルカットセットM番のタイプ1, 2の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器の機器番号 (タイプ1, 2のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NUIU(I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付随するタイプ3 機器の個数。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付隨する タイプ3機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1$
NUIUM(L, I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付隨するタイプ3 機器の番号。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付隨する タイプ3機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
		以下はローカル変数である
NUMSG		あるグループに属するサブグループの数 NUMSG(M) M: グループ番号、 $1 \leq M \leq NKGROP$
NUMSKI		あるサブグループに属する機器の数 NUMSKI(I, M) M: グループ番号、I : サブグループ番号 $1 \leq I \leq NUMSG(M)$
NAMKIK		あるサブグループに属する機器番号 NAMKIK(J, I, M) $1 \leq J \leq NUMSKI(I, M)$
MGROP		グループ数の最大
MSGROP		あるグループに属するサブグループ数の最大
MSKIK		あるサブグループに属する機器個数の最大
NGROP		グループ数 $NGROP \leq MGROP$
IGROP		あるミニマルカットセットを構成するサブグループ番号 IGROP(M, K) K: ミニマルカットセット番号

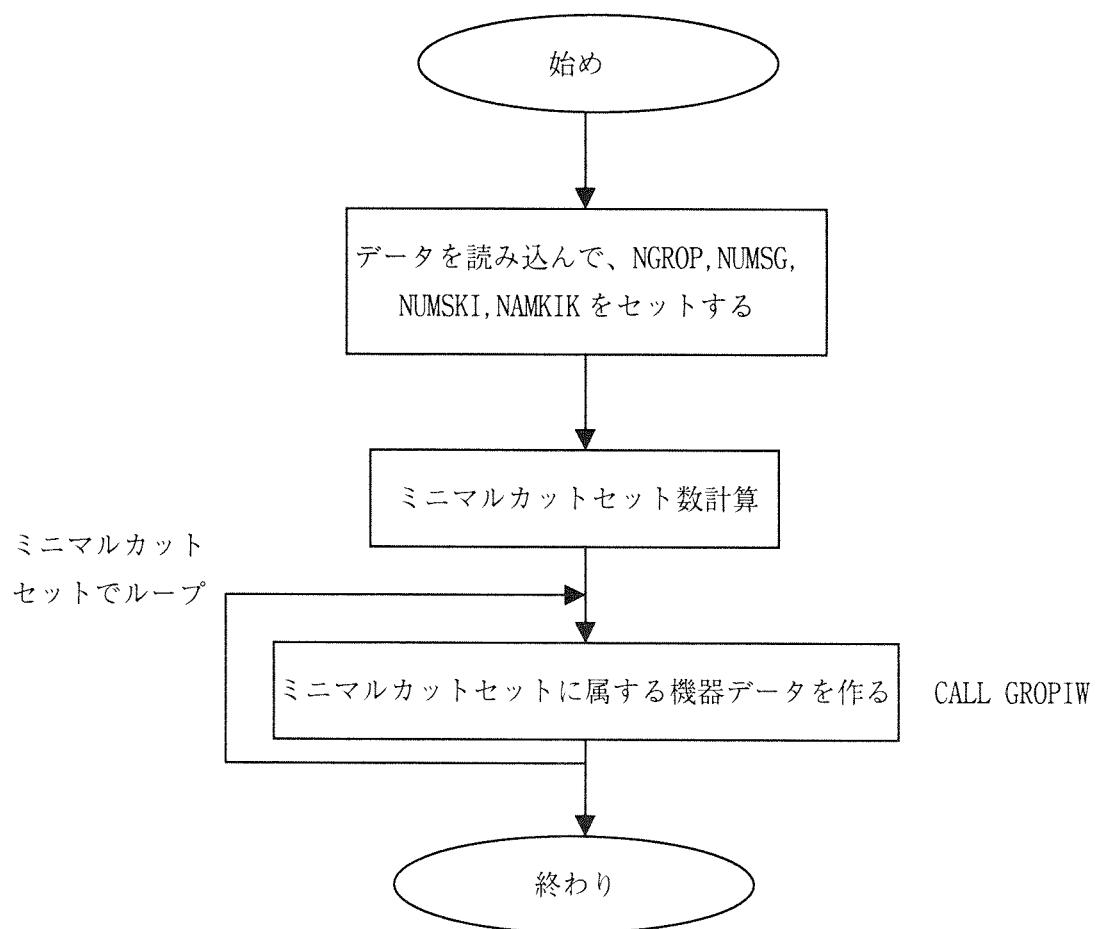


図5 サブルーチン GROPIN の処理フロー

サブルーチン GROPIW 説明

ルーチン名：GROPIW

目的：グループ形式でデータ入力されたときに、ミニマルカットセットを作成する。

このルーチンでは1つのミニマルカットセットを作成する。

引数の説明を表8に示す。また、処理フローを図6に示す。

表8 サブルーチン GROPIW 引数の説明

変数名	I/O	内容
NKO	I	機器の個数 (タイプ1, 2, 3)
KIKI(J)	I	機器タイプ番号、 $1 \leq J \leq NKO$
IGROP	I	あるミニマルカットセットを構成するサブグループ番号 IGROP(M) M: グループ番号 $1 \leq M \leq NGROP$
NGROP	I	グループ数
NUMSKI	I	あるサブグループに属する機器の数 NUMSKI(I, M) M: グループ番号、 I : サブグループ番号 $1 \leq I \leq NUMSG(M)$
NAMKIK	I	あるサブグループに属する機器番号 NAMKIK(J, I, M) $1 \leq J \leq NUMSKI(I, M)$
MSKIK	I	あるサブグループに属する機器個数の最大 (配列サイズ)
MSGROP	I	あるグループに属するサブグループ数の最大 (配列サイズ)
NKOM(M)	0	ミニマルカットセットM番のタイプ1, 2の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器の機器番号 (タイプ1, 2のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NUIU(I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付随するタイプ3 機器の個数。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付随する タイプ3機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1$
NUIUM(L, I, M)	0	ミニマルカットセットM番のI番目機器に付随するタイプ3 機器の番号。 $I=NKOM(M)+1$ のところは、ミニマルカットセットに付随する タイプ3機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M)+1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
MIMOD	I	配列サイズ
MLMOD	I	配列サイズ

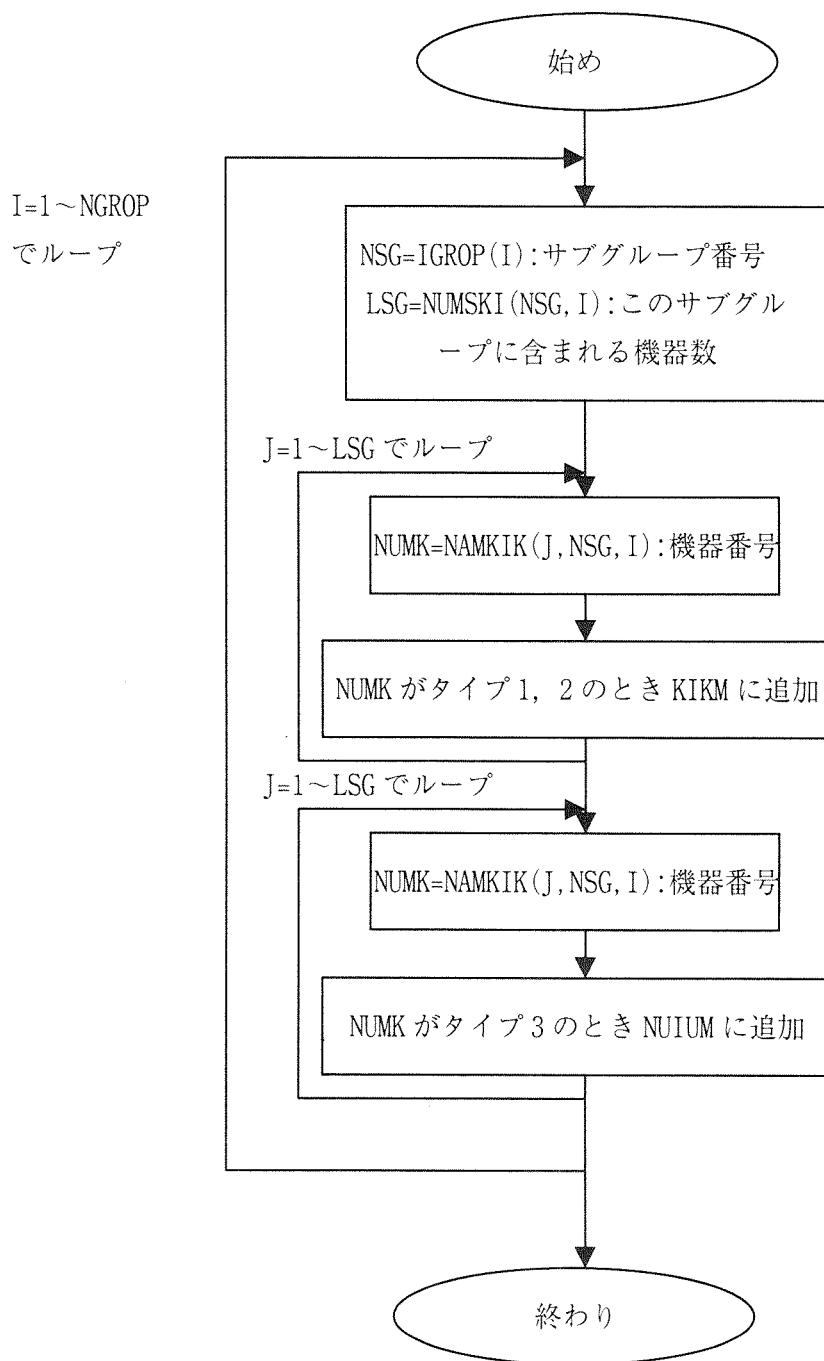


図 6 サブルーチン GROPIW の処理フロー

サブルーチン KIKDCH 説明

ルーチン名：KIKDCH

目的：あるミニマルカットセットのタイプ1, 2の機器がすべて同じ機器の時、そのタイプ1, 2機器に対して異なる機器番号を与える。

引数の説明を表9に示す。また、処理フローを図7に示す。

表9 サブルーチン KIKDCH 引数の 説明

変数名	I/O	内容
MMOD	I	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	I	ミニマルカットセットM番のタイプ1, 2の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	IO	ミニマルカットセットM番のI番目機器の機器番号 (タイプ1, 2のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NKO	IO	機器の個数 (タイプ1, 2, 3)
KIKI(J)	IA	機器タイプ番号、 $1 \leq J \leq NKO$
CHECK(J)	IA	タイプ2機器の時の故障チェック時間間隔 $1 \leq J \leq NKO$
RAM(N, J)	IA	RAM(1, J) : λ (タイプ1, 2のとき) RAM(1, J) : 故障確率 (タイプ3のとき) RAM(2, J) : RAM(1, J)のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
UIU(N, J)	IA	UIU(1, J) : μ UIU(2, J) : 分布を示す ($1 \leq UIU(2, J)$ の時は対数正規分布である) UIU(3, J) : UIU(1, J)のエラーファクター RAM(1, J)のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2, 3$
TAIR(J)	IA	機器タイプ3のとき付随しているタイプ1機器の滞留時間 $1 \leq J \leq NKO$
NAME	I	機器名称
MNKO	I	機器の最大数(配列サイズ)
MMMOD	I	最大ミニマルカットセット数(配列サイズ)
MIMOD	I	1つのミニマルカットセットに含まれるタイプ1, 2機器の最大数(配列サイズ)

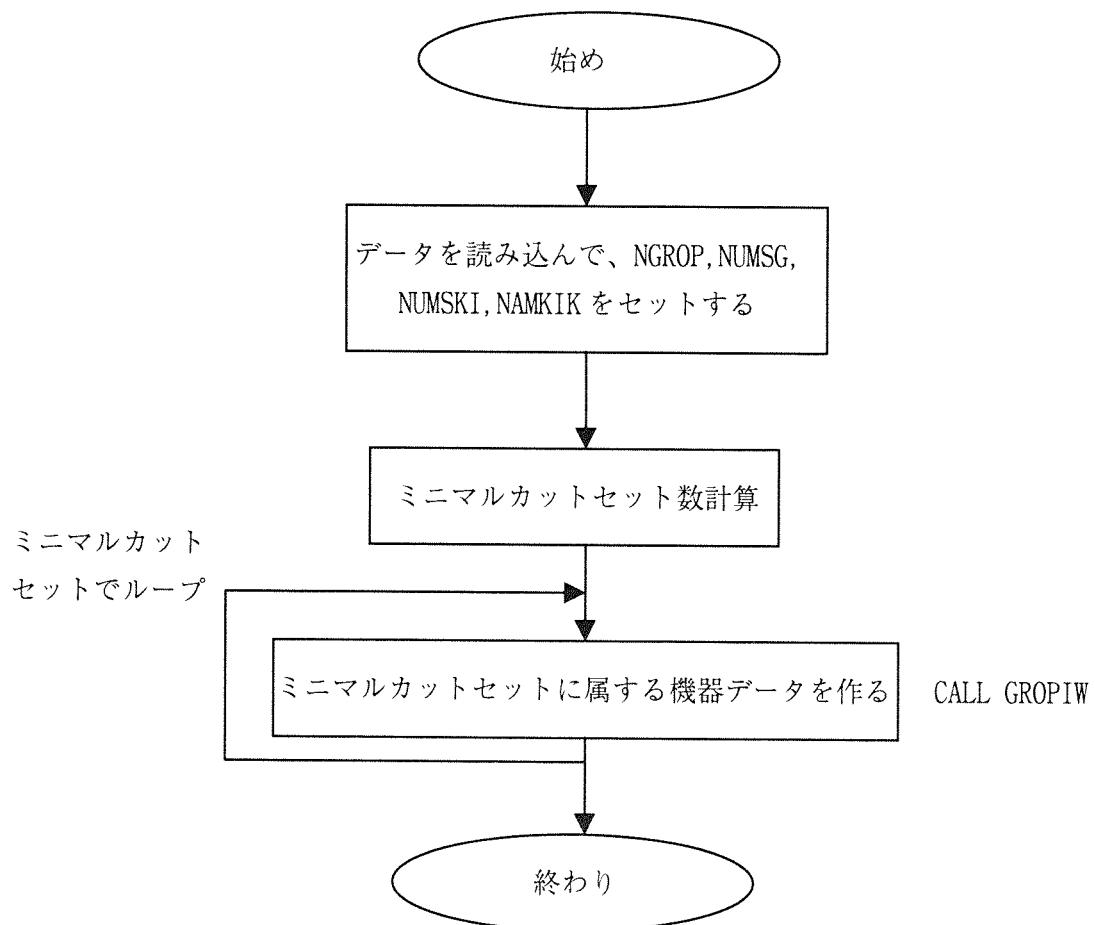


図7 サブルーチン GROPIN の処理フロー

サブルーチン RAMSET 説明

ルーチン名：RAMSET

目的：機器故障率を対数正規分布で与える

引数の説明を表 10 に示す。また、処理フローを図 8 に示す。

表 10 サブルーチン RAMSET 引数の 説明

変数名	I/O	内容
RAM	0	機器故障率
RAME	I	平均故障率
RAMK	I	エラーファクター

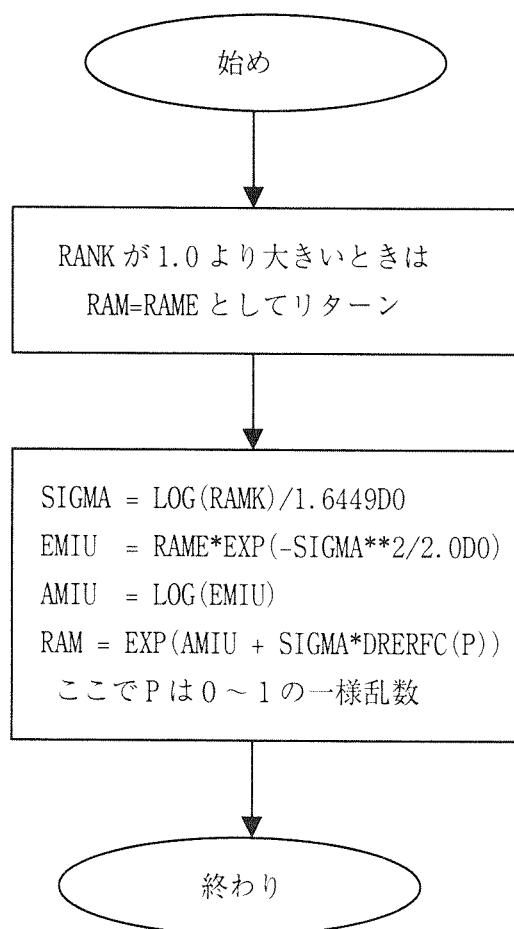


図 8 サブルーチン RAMSET の処理フロー

サブルーチン SUSUMF 説明

ルーチン名：SUSUMF

目的：1回試行をして機器の故障時刻を求める。

モンテカルロ計算の中心的ルーチンである。

引数の説明を表 11 に示す。 处理フローを図 9 に示す。

表 11 サブルーチン SUSUMF 引数の 説明

変数名	I/O	内容
MMOD	I	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	I	ミニマルカットセット M 番のタイプ 1, 2 の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
KIKIM(I, M)	I	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器の機器番号 (タイプ 1, 2 のみ) $1 \leq I \leq NKOM(M)$
NUIU(I, M)	I	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の個数。 $I = NKOM(M) + 1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ 3 機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M) + 1$
NUIUM(L, I, M)	I	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の番号。 $I = NKOM(M) + 1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ 3 機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M) + 1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
T3(M)		
NKO	I	機器の個数 (タイプ 1, 2, 3)
KIKI(J)	I	機器タイプ番号 $1 \leq J \leq NKO$
CHECK(J)	I	タイプ 2 機器の時の故障チェック時間間隔 $1 \leq J \leq NKO$
RAM(N, J)	I	RAM(1, J) : λ (タイプ 1, 2 のとき) RAM(1, J) : 故障確率 (タイプ 3 のとき) RAM(2, J) : RAM(1, J) のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
UIU(N, J)	I	UIU(1, J) : μ UIU(2, J) : 分布を示す (1 \leq UIU(2, J) の時は対数正規分布である) RAM(1, J) のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
TAIR(J)	I	滞留時間 $1 \leq J \leq NKO$
TTT	0	この試行における事故発生時間
MMM	0	この試行で故障したミニマルカットセット番号

TMAXIN	I	計算する最大時間
YUYYO	I	猶予時間
IR	IO	乱数の種
MNKO	I	機器の最大数
MMMOD	I	最大ミニマルカットセット数 (配列サイズである)
MIMOD	I	1つのミニマルカットセットに含まれるタイプ1, 2機器の 最大数 (配列サイズである)
MLMOD	I	1つのタイプ1, 2機器に付随するタイプ3機器の最大数 (配列サイズである)
		以下はローカル変数である
T(J)		タイプ1, 2機器で、機器毎の故障時刻 $1 \leq J \leq NK0$
S(J)		タイプ1, 2機器で、機器毎の修復時間 $1 \leq J \leq NK0$
SW(J)		タイプ2機器で故障してから故障を認識するまでの時間 $1 \leq J \leq NK0$
IFSUSU(J)		=1のとき T, S, SW を修正する =0のとき T, S, SW は更新しない =-1のとき この機器は計算の必要なし $1 \leq J \leq NK0$
IFKOSO(M)		ミニマルカットセット M が事故発生しているか否かのフラグ。 =0: 故障していない =1: 故障した =2: タイムオーバー $1 \leq M \leq MMOD$
TMKOSO(M)		ミニマルカットセット M が事故発生する時刻 $1 \leq M \leq MMOD$
TAMX(M)		ミニマルカットセット M に含まれるタイプ1, 2機器が故障する時刻のうち最大な値 $1 \leq M \leq MMOD$
SMIN(M)		ミニマルカットセット M に含まれるタイプ1, 2機器が修復する時刻のうち最小な値 $1 \leq M \leq MMOD$

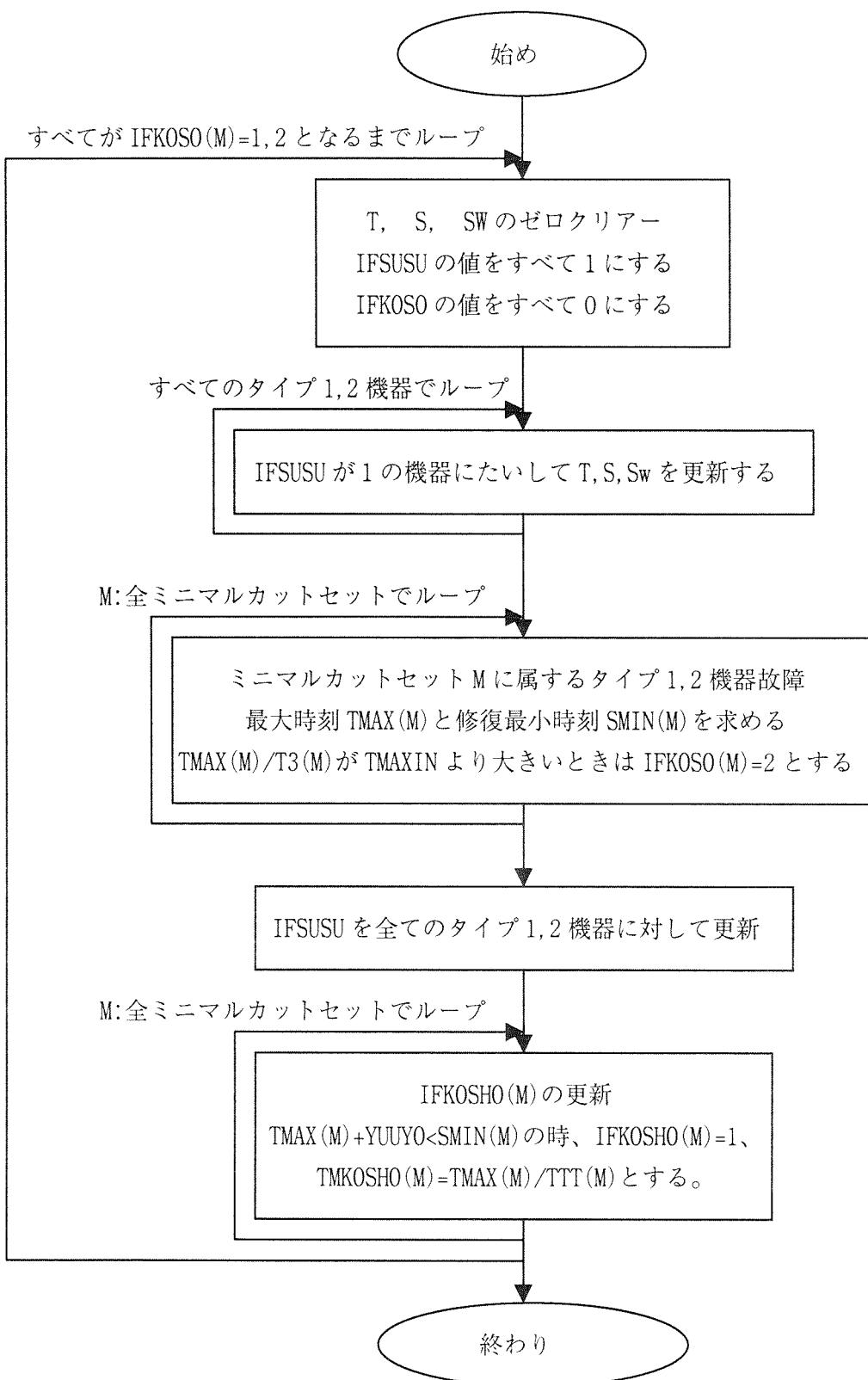


図9 サブルーチン SUSUMF の処理フロー

サブルーチン T3CALC 説明

ルーチン名：T3CALC

目的：T3 を計算する。

T3 とは、ミニマルカットセットに含まれるタイプ 3 機器全ての故障率の積である。

引数の説明を表 12 に示す。 また、処理フローを図 10 に示す。

表 12 サブルーチン T3CALC の引数の 説明

変数名	I/O	内容
MMOD	I	ミニマルカットセット数
NKOM(M)	I	ミニマルカットセット M 番のタイプ 1, 2 の機器数 $1 \leq M \leq MMOD$
NUIU(I, M)	I	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の個数。 $I = NKOM(M) + 1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ 3 機器の個数である。 $1 \leq I \leq NKOM(M) + 1$
NUIUM(L, I, M)	I	ミニマルカットセット M 番の I 番目機器に付随するタイプ 3 機器の番号。 $I = NKOM(M) + 1$ のところは、ミニマルカットセットに付随するタイプ 3 機器の番号である。 $1 \leq I \leq NKOM(M) + 1 \quad 1 \leq L \leq NUIU(I, M)$
T3	O	ミニマルカットセットに含まれるタイプ 3 機器全ての故障率の積
NKO	I	機器の個数 (タイプ 1, 2, 3)
RAM(N, J)	I	RAM(1, J) : λ (タイプ 1, 2 のとき) RAM(1, J) : 故障確率 (タイプ 3 のとき) RAM(2, J) : RAM(1, J) のエラーファクター $1 \leq J \leq NKO, N=1, 2$
MNKO	I	機器の最大数
MMMOD	I	最大ミニマルカットセット数 (配列サイズである)
MIMOD	I	1 つのミニマルカットセットに含まれるタイプ 1, 2 機器の 最大数 (配列サイズである)
MLMOD	I	1 つのタイプ 1, 2 機器に付随するタイプ 3 機器の最大数 (配列サイズである)

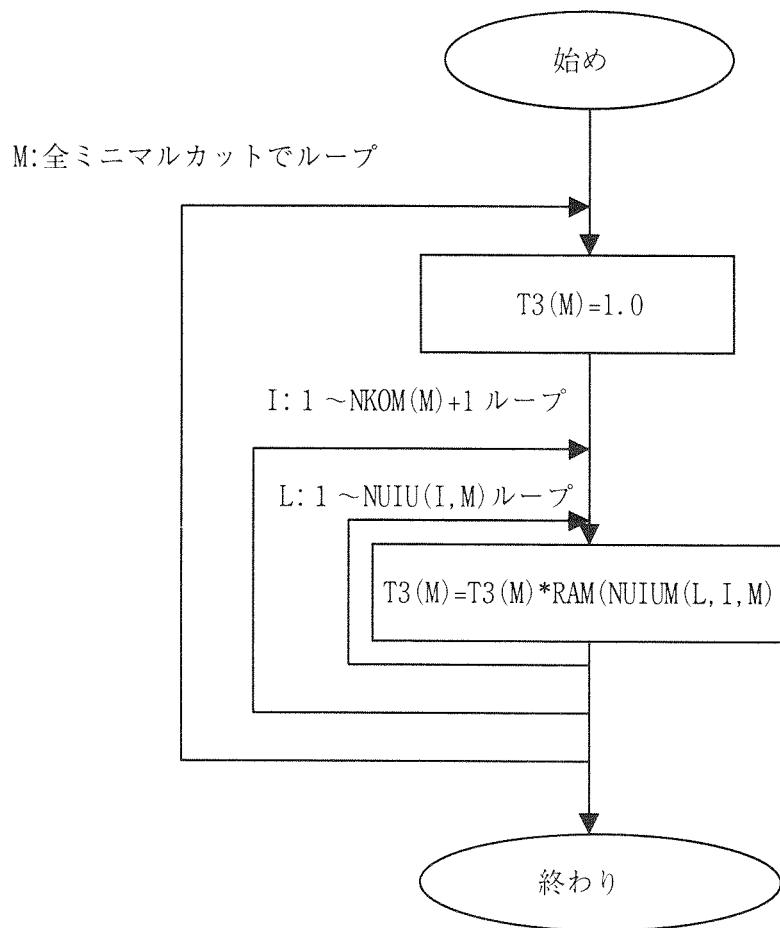


図 10 サブルーチン T3CALC の処理フロー

サブルーチン TSCAL1 説明

ルーチン名：TSCAL1

目的：タイプ1機器の故障時間を求める

引数の説明を表13に示す。処理は、 $T=-\log(P)$ とする。ただし $P: 0 \sim 1$ の一様乱数。

表13 サブルーチン TSCAL1 引数の説明

変数名	I/O	内容
RAM	I	λ ：機器故障率
T	0	故障時間
T1	0	Tと同じ
IR	I0	乱数の種

サブルーチン TSCAL2 説明

ルーチン名：TSCAL2

目的：タイプ2機器の故障時間を求める

引数の説明を表14に示す。処理は、 $T_0=-\log(P)$ とする。ただし $P: 0 \sim 1$ の一様乱数。T1は T_0 を超える CHECK の正数倍の値のうち最小な値。

表14 サブルーチン TSCAL2 の引数の説明

変数名	I/O	内容
RAM	I	λ ：機器故障率
T_0	0	故障時間（故障する時間）
T1	0	故障時間（故障を認識する時間）
IR	I0	乱数の種
CHECK	I	故障チェック時間

サブルーチン TSCALU 説明

ルーチン名：TSCALU

目的：機器の修復時間を求める

引数の説明を表15に示す。

表15 サブルーチン TSCALU 引数の説明

変数名	I/O	内容
UIU	I	平均修復時間の逆数
SIG	I	SIG=-2：指數分布である。 -1：一定値である。 >0：対数正規分布である。このとき SIG の値は分散。
S	0	故障時間（故障を認識する時間）
IR	I0	乱数の種

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg·s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C·V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A·V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{15}	エクサ	E
10^{10}	ペタ	P
10^9	テラ	T
10^6	ギガ	G
10^3	メガ	M
10^2	キロ	k
10^1	ヘクト	h
10^0	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力 N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462
4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2)=10 \text{ P(ボアズ)(g/(cm\cdot s))}$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s}=10^4 \text{ St(ストークス)(cm}^2/\text{s)}$$

压	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)	
					1	10.1972
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
	1.33322×10 ⁻³	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻⁴	
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻³	6.80460×10 ⁻³	51.7149	1	

エネ ル ギ ー ー 仕 事 ・ 熱 量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表)	
								仕事率 1 PS(仮馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499W	
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁷	2.34270	9.29487×10 ⁻⁴	7.23301	6.12082×10 ⁻⁸		
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁷	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ⁻⁵		
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ⁻⁹		
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58545×10 ⁻¹¹		
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ⁻¹⁸		
	1.60218×10 ¹⁰	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ²⁶	3.82743×10 ⁴⁰	1.51857×10 ⁴²	1.18171×10 ⁴⁰	1		

放 射 能	Bq	Ci	吸 取 線 量	Gy	rad	照 射 線 量	
						1	100
				0.01	1		

照 射 線 量	C/kg	R	線 量 量	
			1	3876
			2.58×10 ⁻³	1

線 量 量	Sv	rem
	1	100

