

JAERI-M

7627

フォールト・ツリによるシステム信頼度
解析 (II)

—システム信頼度解析コード“FALCOM”—

1978年5月

鈴木 勝男・小倉 健志*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

フォールト・ツリによるシステム信頼度解析(Ⅱ)
—システム信頼度解析コード“FALCOM”—

日本原子力研究所・動力炉開発・安全性研究管理部
鈴木 勝男・小倉 健志*

(1978年3月1日受理)

原子力発電所施設のプラント稼働率向上のためには、プラント設計の初期の段階から信頼性工学的アプローチをとることが重要であるとの認識のもとに開発したシステム信頼度解析コード“FALCOM”の概要を述べる。

本コードは解析対象とするシステムのフォールト・ツリに基づき、システムの保全効果、定期点検効果等を考慮したシステム・アベイラビリティあるいは信頼度の解析が可能である。

計算内容は以下の通りである。

- (1) 事後保全および予防保全を含むシステムのアベイラビリティ計算
- (2) 最小切断集合の重要度解析および信頼度計算等

尚、本計算コードを簡単な問題に適用し、その解析結果も示した。

* 富士電機製造株式会社

Systems Analysis by Fault Tree Method [II]

System reliability analysis code FALCOM

Katsuo SUZUKI and Kenji OGURA*

Division of Power Reactor Projects , JAERI.

(Received March 1 , 1978)

It is important to introduce reliability engineering to the design of a nuclear power plant in order to improve its availability.

The computer code FALCOM developed is described which is for analysing effects of preventive and corrective maintenances by FAULT TREE METHOD.

Calculated with the code are the following :

- (1) unavailability of a system with parts maintained correctively or preventively , and
- (2) classification of minimal-cut-sets and analysis of system reliability.

Results of two example calculations are also given.

Keywords: Fault Tree Method, Plant Availability, Minimal-Cut-Sets, Reliability Analysis, Preventive Maintenance, Corrective Maintenance, Markovian Process, FALCOM Code

* FUJI ELECTRIC CO., LTD..

目 次

1. はじめに	1
2. 基本的考え方	2
2.1 計算手順について	2
2.2 計算上の基本的仮定	2
2.3 プログラム作成上の基本的方針	4
2.4 計算コードの適用範囲	5
3. 解析方法	6
3.1 最小切断集合の解析	6
3.2 単一コンポーネントのアン・アベイラビリティの計算	6
3.3 部分システムのアン・アベイラビリティの計算	7
3.4 Top Event の発生確率の計算	9
4. 計算コードの説明	12
4.1 コードの構成	12
4.2 計算フロー	13
4.3 入・出力データ	13
4.4 使用上の制限	15
5. 計 算 例	16
5.1 保全実施範囲の確定問題－例題計算(1)－	16
5.2 定期点検周期の決定問題－例題計算(2)－	17
6. あとがき	26
謝 辞	26
参考文献	27
附録A；計算コード入力マニュアル	28
附録B；入力形式および出力形式	43

Contents

1.	Introduction	1
2.	Basic Ideas for the Program Design	2
2.1	Procedure of Calculation	2
2.2	Assumptions	2
2.3	Considerations in Programming	4
2.4	Limits of the Code Application	5
3.	Analytical Methods	6
3.1	Analysis of Minimal Cut Sets	6
3.2	Availability of Single-Components	6
3.3	Availability of Subsystems	7
3.4	Probability of Top Event in Fault Tree	9
4.	Description of the Code	12
4.1	Code Structure	12
4.2	Calculation Flow	13
4.3	Input and Output Data	13
4.4	Constraints for Use	15
5.	Sample Problem	16
5.1	Optimum Maintenance Policies (Example 1)	16
5.2	Optimum Periodic Maintenance (Example 2)	17
6.	Summary and Discussion	26
	References	26
	Appendix A (User's Input Manual)	28
	Appendix B (Example of Input and Output)	43

1. はじめに

機器あるいはシステムの稼働率 (availability) を改善増大させるにはまず第1に高信頼性を有するコンポーネントの開発を行うことである。第2の方法として、適度な信頼度を有する既存のコンポーネントからシステム工学的あるいは信頼性工学的アプローチによって高信頼度システムを設計することが上げられる。これらの2つの方法の組合せによって、高信頼性のシステム設計が可能となる。すなわち、前者の高信頼性コンポーネントの開発には一般に龐大な費用と期間が伴なうものであり、場合によってはプロジェクトのタイム・スケジュールに間に合わないという事態も生じうるものである。このような場合に、後者の第2の方法は、システム特性解析 (静特性、動特性)、システム信頼度解析等の計算・解析を伴うにして既存のコンポーネントから高信頼度システムを“どのようにして設計するか”の方法論を提供するであろう。しかし、このシステム工学的アプローチにおいても、必要最小限の信頼度を有するコンポーネントは必要であり、これはコンポーネント開発によって補償されなければならない。

信頼性解析においては信頼度ブロック・ダイアグラムがこれまでに用いられてきたが、⁽⁸⁾原子力施設のような大規模かつ複雑なシステムに対してこれを適用するには種々の困難が伴ない実用的でないように思われる。

1961年、Bell Telephone LaboratoriesのH.A.WatsonはMinuteman Launch Control Systemのシステム解析 (安全性解析、信頼性解析等) に初めてフォールト・ツリ的手法を導入して以来、その手法が大規模システムの解析に適していることが判明し広く利用されるようになった。特に、原子力の分野でも、原子力施設の潜在的事故が公衆に及ぼすであろうリスクを総合的に評価した、いわゆるラスムッセン報告書 (Reactor Safety study; An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, 1975) において、フォールト・ツリ手法はシステム故障確率計算に活用され、その有効性が示された。

近年、原子力発電所施設のプラント稼働率 (plant availability) 向上の必要性が叫ばれるようになった。これは原子力発電所施設の運転停止によって、大きな経済的損失をこうむることによるものであり、また、電力供給システムにおける原子力発電の電力供給に対する期待が急速に高まってきたことによるものであろう。

今や、大型電子計算機の発達と信頼性工学の成長とによりシステム稼働率向上のためのシステム信頼度解析を詳細に行ないうる状況が生じたと云えよう。

本報告書は上述のような背景のもとに開発した信頼度解析コード“FALCOM”の概要を述べるものである。本コードは解析対象とするシステムをフォールト・ツリで表現し、システム稼働期間中の保全効果あるいは定期的保全効果等を考慮してシステム・アベイラビリティあるいは信頼度の解析が可能ないように作成されている。

2. 基本的考え方

ここでは、システムのアン・アベラビリティの計算を行う計算コード“FALCOM”の開発にあたりとられた計算假定、計算手順および計算プログラム構成等の考え方について述べるものである。

2.1 基本的假定^(1,2,4,8)

主な計算假定は次の5項目にまとめられる。

- (i) フォールト・ツリは最終事象 (Top Event) から“OR-gate”と“AND-gate”の2つの論理ゲートのみを用いてシステム構成コンポーネント (適切に定義される) に到達するまで論理展開して、作成される。これら構成コンポーネントは基本事象と呼ばれる。
- (ii) これら基本事象は統計的に互に独立であると考えられるように適切に定義される。これら基本事象に対して故障率、修復率等の信頼性工学上のデータは利用可能な状態に整備されているものとする。
- (iii) すべての基本事象の故障間時間分布および修復所要時間分布等は指数分布に従うものとする。
- (iv) 部分システムとして扱うシステム部分の信頼性挙動はいわゆるマルコフ過程で記述できるものとする。

2.2 解析手順の基本方針

解析手順の概略を Fig. 2.1 に示す。①まず、対象とする実際のシステムの解析対象とするシステム事象 (Top Event ; システムの故障か、非故障かなど) を設定する。②次にシステムのモデル化、簡単化を行う。これは解析上、最も重要な事柄であり、システム解析者は自分自身の経験および他の関係者 (工学者、技術者、設計者等) の意見を参考に、解析上考慮しなければならない事象とその必要のないものとの分類を実施しなければならない。この段階では、部分システムと単一コンポーネントの分類も同時に行われる。この後、次の3つの作業が並行して行われる。③①で設定された Top Event に対するフォールト・ツリが作成される。Top Event は“OR-gate”および“AND-gate”の2つの論理ゲートを用いて下方に展開され、基本事象にまで到達したところでフォールト・ツリの作成は完了する。ここで基本事象とは、②で既に分類してある部分システムと単一コンポーネントに対応するものである。このフォールト・ツリの最小切断集合は Fussell's Algorithm によって求められる。④次は、単一コンポーネントのアンアベラビリティの計算が行われる。故障時間分布及び修復時間分布に指数分布を假定して計算する。⑤部分システムのアンアベラビリティはマルコフ過程を適用して解析する。このため、部分システムの Shannon - 線図 (状態図) を作成し、Top Event によ

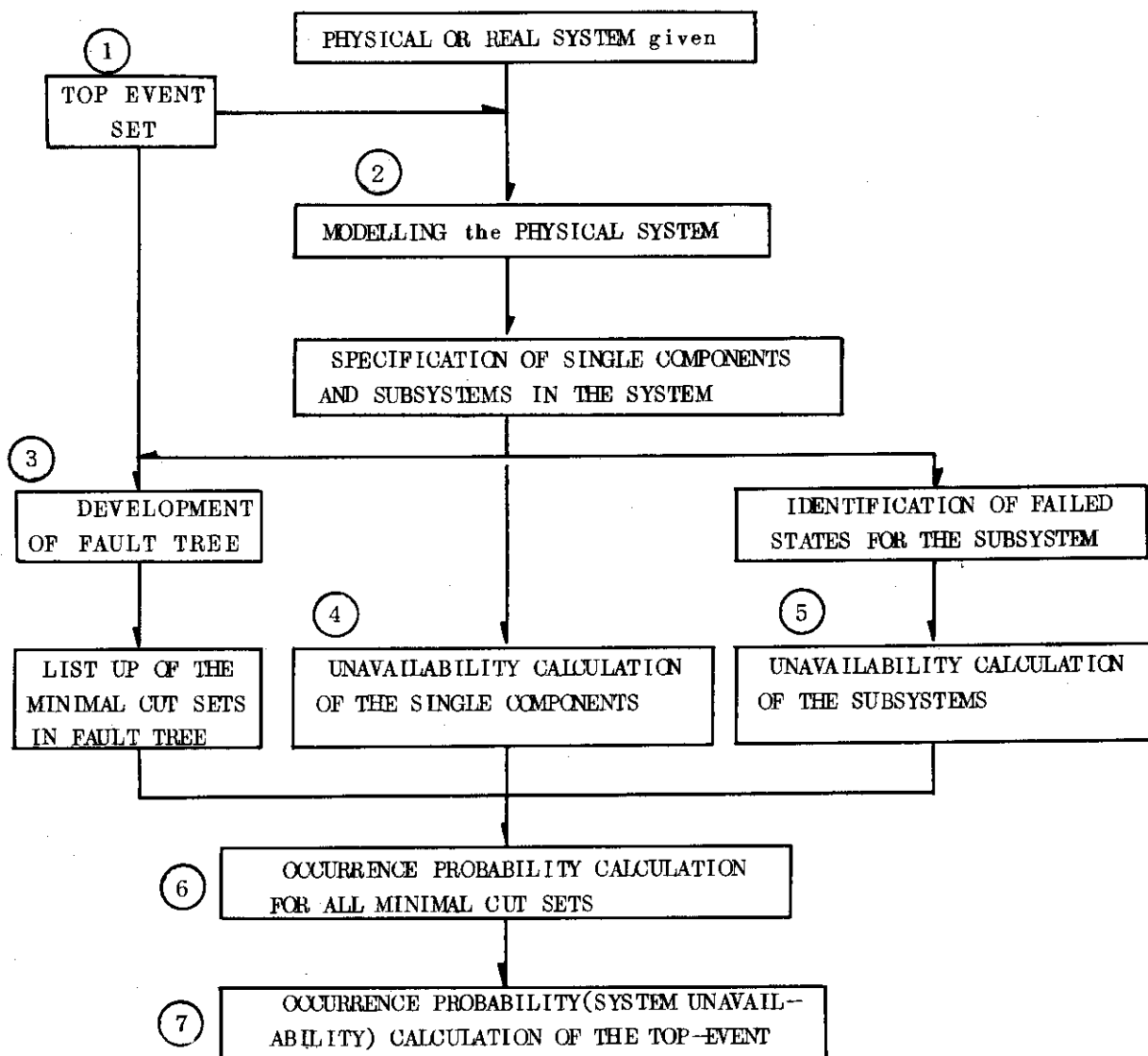


Fig.2.1 Calculational procedure of the code "FALCOM"

って規定される部分システムの故障状態を状態図上で明らかにして、それら状態確率の総和が部分システムのアンアベラビリティを与える。

以上によって、単一コンポーネントと部分システムとはフォールト・ツリ上で同一レベルで扱うことが出来ることになる。

⑥③で求めた最小切断集合の発生確率は単一コンポーネントと部分システムのアンアベラビリティから計算され、最後に⑦Top Eventの発生確率は最小切断集合の発生確率から計算される。

2.3 プログラム作成上の基本の方針

本コード作成上、基本の方針として留意した項目を上げ、その目的および内容を記す。

(1) プログラムのオーバレイ構造化

計算コードは①フォールト・ツリ解析の計算部、②部分システム信頼度計算部、③システム信頼度計算部の三つの主要計算部から構成されているが、それぞれモジュール化して、主記憶装置使用領域を少なくする為に、オーバレイ構造化とした。オーバレイ構造化とはプログラムを分割ローディングすることであり、本計算コードでは、上記の三つの主要計算部プログラムを同時にすべてローディングする必要はなく、主記憶装置領域をそれぞれ割当てられた計算時に同じ領域を交互に使用するようにしている。

(2) 補助記憶装置(ディスク)の使用

主記憶装置を節約する為にディスクを使用するようにしたが、その主要個所とその役割は以下の通りである。

(i) 最小切断集合に関して

フォールト・ツリ解析部から最小切断集合が得られるが、システム信頼度計算部でこれを使用するまで、ディスクに記憶させ保存する。

(ii) 部分システム信頼性に関して

部分システム信頼度計算部において、部分システム信頼度特性が連立微分方程式を Runge-Kutta-Gill法によって解いて得られる。部分システムが運転と保守を繰返し、信頼性特性に周期性があるならば、全運転期間に亘って、この特性を計算する必要はない。1サイクルの特性のみを計算し、それをディスクに記憶させておけば、任意の時刻の部分システムの信頼度特性を得ることが出来る。

(iii) 全システム信頼性計算に関して

後述するように、最小切断集合の積事象の基本コンポーネントを求めて、全システムの各時刻毎の信頼度計算を行う。この場合、最小切断集合の積事象の要素を予め求めて、その結果をディスクに保存する。

(3) 積分法

平均アベラビリティの計算に必要な積分は、汎用性があり、高い精度の得られる Simpson法を採用した。

(4) 出力形式の統一化

入力データおよび計算結果を最小切断集合の解析単一コンポーネント、部分システムおよび全システムのアベイラビリティ計算毎に出力するような形式で統一した。

2.4 計算コードの適用範囲

本計算コードは2.2節の基本的仮定によって、適用の範囲はおのずから制限されてくるが、ここではこのような理論的制約とは別に、システム信頼性操作 (Reliability Operation) の観点からのコードの適用性について述べる。

本計算コードの特徴として、システムに対する修復・保全活動 (maintenance) を考慮したシステムアンアベイラビリティを時間依存で計算できる点が上げられる。これはシステム運転管理の立場からシステム信頼性のある一定期間に亘って設定値以上に維持することが重要であるが、このような解析を実行できる性能を備えていると云える。その他以下のような各種の解析・計算に適用できる。

(i) システムの信頼度計算

修理・修復等の保全活動を許していないシステム、あるいは保全活動がシステムの限られた部分のみに施されて、かつその部分システムの信頼性特性の解析が現実的に可能であるようなシステムに対して、本計算コードはシステム信頼度の時間的挙動の解析を行うことができる。

(ii) 事後保全のシステムのアンアベイラビリティの計算

事後保全 (Corrective Maintenance) とはシステムあるいはコンポーネントが故障し、検知された後、修理・修復等の保全活動がとられることである。この場合、現実的には故障の検知、保全作業員の配置、部品在庫数、修理・修復の難易度等の種々の要因が保全時間に影響するが、ここでは、故障は即刻検出され、保全所要時間分布は指数分布であると仮定して、事後保全性を有するシステムのアンアベイラビリティを計算することが可能である。

(iii) 予防保全のシステムのアンアベイラビリティの計算

予防保全 (Preventive Maintenance) とはシステムあるいはコンポーネントが故障停止する以前に点検あるいは計画的取替によって、システムのアベイラビリティを常に高く維持するという積極的計画的な保全方式である。原子炉システムの定期点検は一種の予防保全である。予防保全の実施された部品装置は新品同様になるとの仮定のもとで、本計算コードは予防保全を有するシステムのアンアベイラビリティの時間的挙動の解析を実施することができる。

3. 解析方法

前章で、“FALCOM”における解析手順についての概略を説明したが、本章では、手順の主な段階でとられた解析方法について述べる。ここで述べられる解析方法は、最小切断集合の解析、単一コンポーネントのアンアベイラビリティの計算、部分システムのアンアベイラビリティの計算および全システムのアンアベイラビリティの計算である。

3.1 最小切断集合の解析

一般に、あるシステムのシステム事象 (Top Event) に対して作成されたフォールト・ツリは煩雑な形をしているものである。解析上の見通しを得るためには、出来る限り簡単なフォールト・ツリに変換し、Top Event とシステム構成基本コンポーネント (基本事象) との関連を把握することが重要である。このフォールト・ツリの等価変換において重要な役割を演ずるものが、最小切断集合 (あるいは、最小パス集合) の概念である。

2.1 節の基本的仮定に述べてあるように、対象とするフォールト・ツリは“AND-gate”と“OR-gate”とによって展開されているので、Fussell のアルゴリズムを適用して、最小切断集合をすべて求めることができる。このアルゴリズムによって、最小切断集合を求める方法の主要点は以下の通りである。^(*)

- ① フォールト・ツリにおける“AND-gate”は切断集合の大きさのみを増大させ、逆に、切断集合の大きさは“AND-gate”のみによって増加する。
- ② フォールト・ツリにおける“OR-gate”は切断集合の個数を増加させ、逆に、切断集合の個数は“OR-gate”のみによって増加する。

この2点に着目して、フォールト・ツリをTop-Downで分析してゆくことにより、BICS集合 (Boolean Indicated Cut Set) が得られ、このBICS集合の包含関係を調べて、最終的に最小切断集合に到達する。

3.2 単一コンポーネントのアン・アベイラビリティの計算

本計算コードでは、単一コンポーネントに次の2種類を考える。ひとつはシステムの運転開始後運転終了まで中断することなく稼動し続けるコンポーネントであり、これを第1種要素と呼ぶ。第1種要素のアンアベイラビリティは運転開始後時間とともに単調に増加する特性を有する。他のひとつは稼動が時間的断続運転されるようなコンポーネントである。これを第2種要素と呼ぶ。第2種要素のアンアベイラビリティは稼動状態にあるときのみ増加し、非稼動状態では不変であるような特性を有する。これはシステムのあるコンポーネントが修理・修復等の理由で停止させられるとき関連して非稼動状態におかれる非故障コンポーネントであり、故

* JAERI-memo 6691「フォールト・ツリによるシステム信頼度解析(I)」1976。

障コンポーネントの運転復帰と同時に運転再開されるようなコンポーネントである。このとき、第2種要素は非稼働状態におかれる直前のアンアベイラビリティを初期条件として運転状態に戻る。Fig.3.1は第1種及び第2種要素のアンアベイラビリティの時間的挙動の概念図を示したものである。

さて、単一コンポーネントの故障時間および修理時間がいずれも指数分布に従うと仮定して、それぞれ次式で計算する。

(i) 第1種要素のアンアベイラビリティの計算

要素のアンアベイラビリティはよく知られている次式から計算する。

$$q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - \exp\{- (\lambda + \mu) t\}] + q^0 \exp\{- (\lambda + \mu) t\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、

- q(t) : 時刻 t における要素のアンアベイラビリティ
- q⁰ : 時刻 t = 0 における要素のアンアベイラビリティ (初期値)
- λ : 要素の故障率 (/ 時間)
- μ : 要素の修復率 (/ 時間)

(ii) 第2種要素のアンアベイラビリティの計算

$$q(t) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - \exp\{- (\lambda + \mu) (t - mt'')\}] + q^0 \exp\{- (\lambda + \mu) (t - mt'')\} & ; m(t' + t'') \leq t \leq m(t' + t'') + t' \\ 1.0 & ; (m+1)t' + mt'' \leq t \leq (m+1)(t' + t'') \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ただし、

- q(t) : 時刻 t における要素のアンアベイラビリティ
 - q⁰ : 時刻 t = 0 における要素のアンアベイラビリティ (初期値)
 - λ : 要素の故障率 (/ 時間)
 - μ : 要素の修復率 (/ 時間)
 - t' : 要素の稼働時間 (時間)
 - t'' : 要素の停止時間 (時間)
 - m : 稼働・停止サイクルのカウンタ数
- } Fig.3.1参照のこと。

3.3 部分システムのアンアベイラビリティの計算

ここで扱う部分システムとはシステムを構成するコンポーネントの集合の任意の部分集合であり、この部分集合に属する要素の稼働・非稼働の各状態を既定することによって部分システムの稼働ならびに非稼働状態が決定できかつシステムの他の部分と独立であるように定められたシステムの一部であると定義されたものである。

このように定義するとき、部分システムのアベイラビリティの計算にマルコフ過程を適用す

ることが出来て、部分システムの状態を Shannon 一線図で表わし、システム全体がその部分システムに要求する機能をその線図上に指定することが出来る。

部分システムのとおり得る状態をその稼動状態にあるコンポーネントの組合せで対応づけると、明らかに部分システムの状態数は有限個である。2.1節の基本仮定と併わせて、部分システムの各状態に存在する確率(状態確率)の計算には有限マルコフ過程の適用できることになる。以下に、問題の定式化を述べる。

単一コンポーネントの故障時間および修復時間の分布が指数分布であると仮定(2.1節参照)することによって、部分システム状態は有限個(n個)の状態をもつ均等マルコフ過程によって述べられる。

もし、時点 t において、この過程が状態 k にあるとすれば、微少時間 Δt を経過したのちは、状態は

- ① 確率 $\lambda_k \Delta t + o(\Delta t)$ で (k+1) 状態に遷移し
- ② 確率 $\mu_k \Delta t + o(\Delta t)$ で (k-1) 状態に遷移し
- ③ 確率 $1 - (\lambda_k + \mu_k) \Delta t + o(\Delta t)$ で状態 k に留まる。

初期状態からは、

- ① 確率 $\lambda_0 \Delta t + o(\Delta t)$ で状態 1 に移り
- ② 確率 $1 - \lambda_0 \Delta t + o(\Delta t)$ で状態 0 に留まる。

また、状態 n からは、

- ① 確率 $\mu_n \Delta t + o(\Delta t)$ で状態 (n-1) に移り、
- ② 確率 $1 - \mu_n \Delta t + o(\Delta t)$ で状態 n に留まる。

ここで、 λ_k ($k=0, 1, \dots, n-1$), μ_k ($k=1, 2, \dots, n$) は、部分システムの状態が指定されれば、計算できる定数である。

今、その過程が時点 t において状態 k にある確率を $P_k(t)$ で表わすと、微少時間 Δt だけ離れた二つの時点 t と t + Δt における過程の状態を比較することによって全確率の公式から

$$P_k(t + \Delta t) = P_{k-1}(t) [\lambda_{k-1} \Delta t + o(\Delta t)] + P_k(t) [1 - (\lambda_k + \mu_k) \Delta t + o(\Delta t)] + P_{k+1}(t) [\mu_{k+1} \Delta t + o(\Delta t)] + o(\Delta t) \dots (3.3)$$

が得られる。従って、極限操作を行えば次式が結果する。

$$P_k'(t) = \lambda_{k-1} P_{k-1}(t) - (\lambda_k + \mu_k) P_k(t) + \mu_{k+1} P_{k+1}(t) \dots (3.4)$$

同様にして、 $k=0$, および $k=n$ のとき、それぞれ

$$P_0'(t) = -\lambda_0 P_0(t) + \mu_1 P_1(t) \dots (3.5)$$

$$P_n'(t) = \lambda_{n-1} P_{n-1}(t) - \mu_n P_n(t) \dots (3.6)$$

となる。

さて、 $\mu_0 = 0$, $\lambda_{-1} = 0$ および $\lambda_n = 0$ とおけば、このとき、任意の k に対して方程式は同じ形のものとなり、

$$P_k'(t) = \lambda_{k-1} P_{k-1}(t) - (\lambda_k + \mu_k) P_k(t) + \mu_{k+1} P_{k+1}(t) \dots (3.7)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, n$

と書くことができる。あるいは、

$$\frac{d}{dt} P(t) = A \cdot P(t) \dots\dots\dots (3.8)$$

と書ける。

但し、

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_1(t) \\ \vdots \\ p_n(t) \end{bmatrix} ; \text{状態ベクトル}$$

A : n × n 行列であり、部分システムのとりうる状態が定義されれば決定されるものである。

このように得られた微分方程式の系がわれわれの過程の性質を決定するのである。この方程式系が一意的解をもつためには、初期条件 $p_k(0)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, n$) を与えること、すなわち、その過程の初期状態の確率を与える必要がある。

行列Aが定数行列である場合には、(3.8)式は解析的に解を得ることもできるが、本計算コードではRunge-Kutta-Gill法によって微分方程式を解いている。この主な理由は係数行列が拡張され、時間依存変数となった場合にも大巾な修正をすることなく対処できるように配慮したためである。

次に、部分システムのアンアベイラビリティの計算であるが、これは部分システムの故障状態に対応する状態確率をすべて総和して、その時刻における部分システムのアンアベイラビリティを計算する。すなわち、

$$q_{SB}(t) = \sum_{i \in D} p_i(t) \dots\dots\dots (3.9)$$

ただし、

- $p_i(t)$: 部分システムの故障状態 i の存在確率
- D : 部分システムの故障状態のすべての番号の集合
- $q_{SB}(t)$: 時刻 t における部分システムのアンアベイラビリティ

3.4 Top Event の発生確率の計算

Top Event の発生確率は最小切断集合の解析、単一コンポーネントおよび部分システムそれぞれのアンアベイラビリティを用いて、時刻 t において計算される。その具体的な方法は以下の通りである (Bound法)⁽³⁾。

まず、Top Event は最小切断集合の和事象として次のように書くことができる。

$$\{ \text{Top Event} \} = \bigcup_{i=1}^N \text{MCS}(i) \dots\dots\dots (3.10)$$

但し

- MCS(i) : i 番目の最小切断集合
- N : 最小切断集合の個数

従って、Top Event の確率は次式となる。

$$P_r \{ \text{Top Event} \} = P_r \left\{ \bigcup_{i=1}^N \text{MCS}(i) \right\} \\ = \sum_{i < k < \dots < k} \epsilon \cdot P_r \{ \text{MCS}(i) \text{ MCS}(j) \text{ MCS}(k) \} \dots \dots \dots (3.11)$$

但し、

$$\epsilon = \begin{cases} +1 & : \text{奇数個の最小切断集合の積事象} \\ -1 & : \text{偶数個の最小切断集合の積事象} \end{cases}$$

さて、最小切断集合MCS(i)は単一コンポーネント群と部分システム群とから構成されている。すなわち、

$$\text{MCS}(i) = \{ c_j, \dots, c_e ; s_p, \dots, s_r \} \dots \dots \dots (3.12)$$

ここで、

- c ; 単一コンポーネントの番号
- s ; 部分システムの番号

従って、最小切断集合の時刻 t における発生確率は単一コンポーネントおよび部分システムの独立性の仮定から次の如く計算される。

$$P_r \{ \text{MCS}(i) \} = \{ q_{c_j}(t) \dots q_{c_e}(t) \} \cdot \{ q_{s_p}(t) \dots q_{s_r}(t) \} \dots \dots \dots (3.13)$$

但し、q(t)は、時刻 t における単一コンポーネントおよび部分システムのアンアベイラビリティである。

同様にして、任意個の最小切断集合の積事象についても次のように計算できる。

$$\text{MCS}(i) \cap \text{MCS}(j) \cap \dots \cap \text{MCS}(l) \\ = \{ c_n, \dots, c_m ; s_t, \dots, s_u \} \dots \dots \dots (3.14)$$

と書く。このとき、単一コンポーネント群 (c_n, ..., c_m) と部分システム群 (s_t, ..., s_u) は、最小切断集合の積事象が発生するように、重複されずに選択された単一コンポーネントであり、部分システムである。ゆえに、積事象の発生確率は次式となる。

$$P_r \{ \text{MCS}(i) \cap \text{MCS}(j) \cap \dots \cap \text{MCS}(k) \} \\ = \{ q_{c_n}(t) \dots q_{c_m}(t) \} \cdot \{ q_{s_t}(t) \dots q_{s_u}(t) \} \dots \dots \dots (3.15)$$

従って、(3.15)式を(3.11)式に代入すれば、Top Event の発生確率を計算することができる。

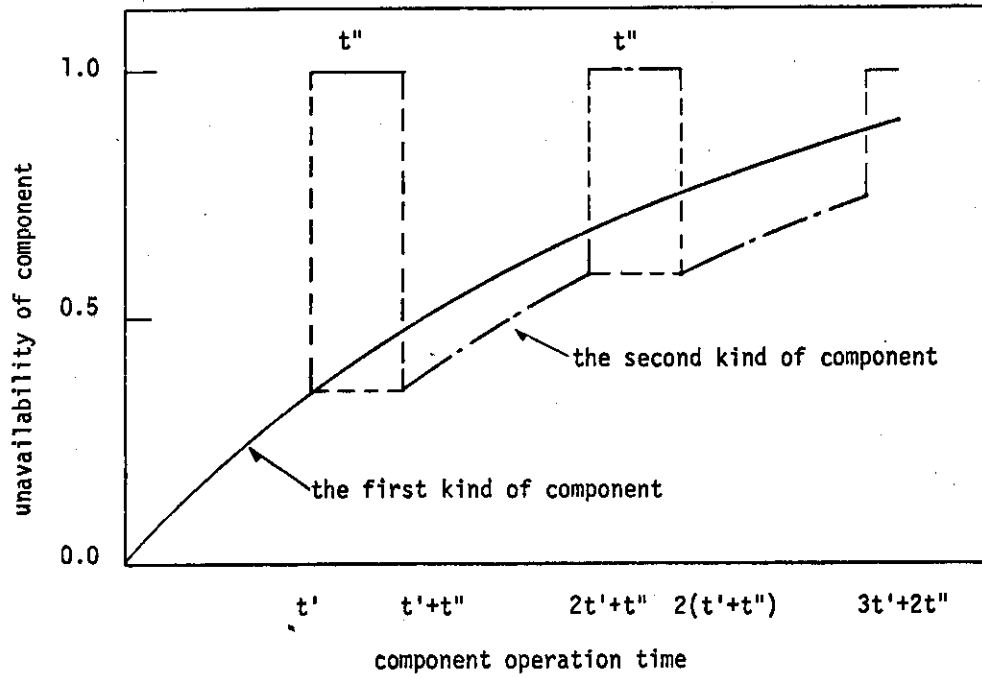


Fig. 3.1 Conceptual figure of the availability performances of the first and the second kinds of components.

4. 計算コードの説明

前章までに計算モデルをはじめ数値解法上の主要な部分について述べてきた。ここでは計算コードFALCOMについてさらに詳細な説明を行う。なお本計算コードはFORTRAN-IV言語で書かれており、使用機種はFACOM230-75を基盤としている。また現状での所要記憶容量は、約150 kWである。

4.1 コードの構成

本計算コードFALCOMは、以下に示すような7つの主要ルーチンから構成される。これらのルーチンはさらにサブプログラム化されており、全体としてはメインプログラムのほかに43ケのサブルーチンを有している。

以下、FALCOMの主要7ルーチンの名称、およびその内容を説明する。

(1) FALCOM

全体の計算の流れを制御するメインルーチン。

(2) INPUT

コード制御用データのよみ込みルーチン。

(3) MINC

本ルーチンは15ケのサブルーチンから構成され、フォールトツリの入力、第2章で述べたFusselのアルゴリズムによる最小切断集合の計算、および結果の出力を行うものである。

なお本ルーチンは制御パラメータにより2種類の選択が可能であり、通常、最小切断集合を計算するほか、それをさらに相互排反な切断集合として出力することも可能である。

(4) COMP

本ルーチンは3ケのサブルーチンから構成され、フォールトツリを構成する各単一コンポネントに関するデータの入力、第3章で述べた解法によるアベイラビリティ計算、および結果の出力を行うものである。

(5) MARKOV

本ルーチンは12ケのサブルーチンから構成され、フォールトツリを構成する各待機冗長サブシステムに関するデータの入力、第3章で述べた解法によるアベイラビリティ計算、および結果の出力を行うものである。数値解法としてはRunge-Kutta-Gill法を使用し、精度保証はプログラム内で任意に設定できるようにしている。

(6) MCS

本ルーチンは3ケのサブルーチンから構成され、MINCで計算された各最小切断集合に対するアベイラビリティを、COMP、およびMARKOVの結果をもとに計算するものである。また結果の出力も行う。

(7) TSYS

本ルーチンは7ヶのサブルーチンから構成され、MCSでの計算結果をもとに、システム全体としてのアベイラビリティ計算、およびその時間平均値を計算するものである。

MINC で計算した最小切断集合が、それぞれ排反でない場合のシステムアベイラビリティ計算は、第3章で述べた解法によっており、その精度は入力データで適宜設定することが可能である。

またアベイラビリティの時間平均値を求める際の積分計算は Simpson の公式を使用している。

4.2 計算フロー

Fig.4.1にFALCOM各主要ルーチンの機能的関連を模式的に示す。

入力形式はカードであり、制御パラメータ、フォールト・ツリデータ、コンポネントデータ、サブシステムデータがそれぞれINPUT, MINC, COMP, MARKOVから入力される。

MINC, COMP, MARKOVはそれらの入力データによって、それぞれ最小切断集合、コンポネントアベイラビリティ、およびサブシステムアベイラビリティの計算を行い、その結果をディスク、およびプリンターに出力する。

次にMCSにおいてディスクデータを入力とした各最小切断集合に関するアベイラビリティの計算が行われ、引き続いてTSYSにおいてシステム全体としてのアベイラビリティ、およびその時間平均値計算が行われる。

4.3 入・出力データ

1) 入力データ

FALCOMの入力データは大きく4項目に分けられる。すなわち、(1)プログラム制御パラメータ、(2)フォールト・ツリデータ、(3)単一コンポネントデータ、(4)待機冗長サブシステムデータである。

以下各項目についてその概要を簡単に説明する。なお入力データの詳細については、附録を参照されたい。

(1) プログラム制御パラメータ

- ① タイトルカード
- ② 積分用時間間隔
- ③ システム運転時間
- ④ Bound 法での許容相対誤差
- ⑤ Bound 法での最大打ち切り項数
- ⑥ 結果のプリント間隔

(2) フォールト・ツリデータ

- ① フォールト・ツリ中ゲート数

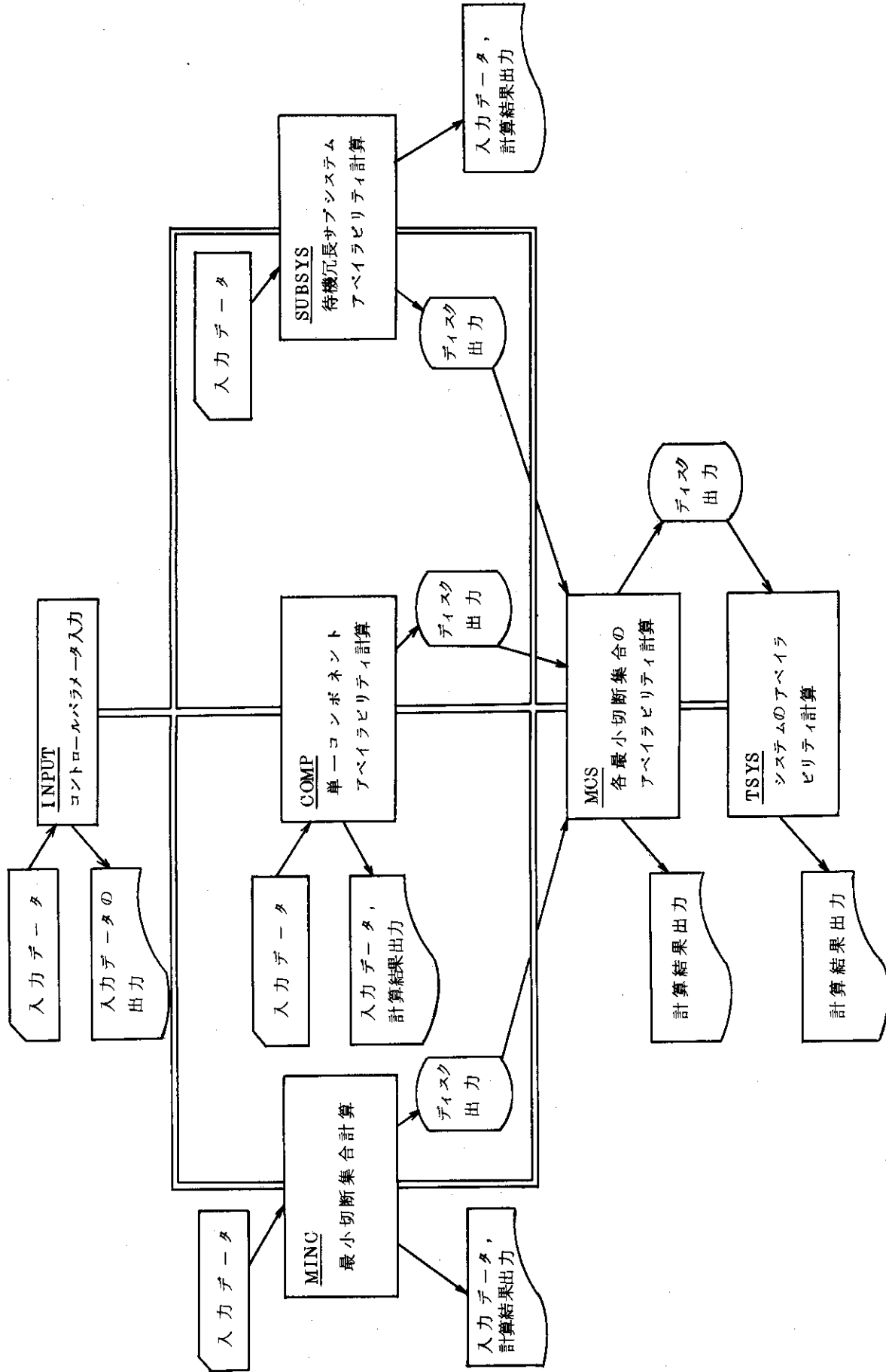


Fig.4.1 Functional Flow Diagram. (FALCOM)

- ② 各ゲートの番号
- ③ 各ゲートに連なるコンポネントとゲートの個数
- ④ 各ゲートに連なるコンポネント, およびゲートの番号
- (3) 単一コンポネントデータ
 - ① コンポネント番号
 - ② 運転時間 (保全のない場合は不要)
 - ③ 保全時間 (")
 - ④ 故障率
 - ⑤ 修復率
 - ⑥ 初期故障率
- (4) 待機冗長サブシステムデータ
 - ① サブシステム番号
 - ② オプション
 - ③ 状態数
 - ④ 各状態間遷移率
 - ⑤ 運転時間 (保全のない場合は不要)
 - ⑥ 保全時間 (")
 - ⑦ 初期状態確率

2) 出力データ

本コードの出力データは下記のとおりである。

なお下記③～⑥の項目については, 各設定時刻における出力, ⑦～⑨の項目についてはシステム運転時間中の平均値として出力が行われる。

- ① 入力データ
- ② 最小切断集合
- ③ コンポネントのアベイラビリティおよびアン・アベイラビリティ
- ④ サブシステムのアベイラビリティおよびアン・アベイラビリティ
- ⑤ 最小切断集合のアベイラビリティおよびアン・アベイラビリティ
- ⑥ 全システムのアベイラビリティおよびアン・アベイラビリティ
- ⑦ 最小切断集合平均アン・アベイラビリティ
- ⑧ サブシステム平均アン・アベイラビリティ
- ⑨ 全システム平均アンアベイラビリティ
- ⑩ 最小切断集合の重要度計算

4.4 使用上の制限

FALCOM使用上の制限事項は下記のとおりである。

- (1) コア容量 150 kW以上 (FALCOM 230-75)
- (2) コンポネント数 100 以下

(3) 最小切断集合数	100 以下
(4) サブシステム数	10 以下
(5) サブシステムの状態数	100 以下

5. 計 算 例

本章ではこれまで述べてきた計算コード“FALCOM”を2, 3の問題に適用し、その結果について述べる。これは本計算コードの機能あるいは特徴を簡単なシステムの信頼性解析を行って述べようとするものである。

5.1 保全実施範囲の確定問題—例題計算(1)—

(1) システム記述と問題設定

解析対象とするシステムはFig. 5.1に示されている。このシステムでは、コンポーネント1～4は予防保全可能であり、他の残りのコンポーネント5～6は運転期間中、いかなる保全活動も実施されない。すなわち、保全活動が全システムの一部にのみ実施されるシステムである。

点検周期は3.0任意時間単位であり、運転期間は20.0任意時間単位である。

Table 5.1 は計算に用いた各コンポーネントの故障率データと所要保全時間を示したものである。

さて、このシステムに対して、運転期間中の平均アンアベイラビリティを最小にするような保全実施範囲はどのようなものかという問題設定を行う。

(2) 解析モデルと解析結果

保全実施範囲の異なるパターンはFig. 5.2に示すように8種類のものがある。図中、下線を施されたコンポーネントのみがシステム運転中保全計画に従って予防保全を受ける。保全コンポーネントの適当な組合せは部分システムとして定義され取扱われる。一例として、保全範囲パターン⑧の解析モデルと結果をFig. 5.3およびFig. 5.4に示す。Fig. 5.3(a)は保全範囲パターン⑧に対するフォールト・ツリである。フォールト・ツリ中、SBと書れているのは、コンポーネント1～4で構成される部分システムである。この部分はFig. 5.3(b)に図示されるShannon一線図で表わし信頼度解析が行われる。図中の L_1 はコンポーネント1～3の故障率であり、 L_2 はコンポーネント4の故障率である。この結果をFig. 5.4に示す。最上段の図が全システムアンアベイラビリティの時間変化であり、順に下方へ、コンポーネント6, 5, および部分システム(SB)のアンアベイラビリティである。

Fig. 5.5は、保全実施範囲を変化させたとき、システムの平均アンアベイラビリティの変化を図示したものである。これによれば保全を適当な範囲に亘って実施すればシステムアンアベイラビリティを減少させることができる。また、ある範囲内での保全の拡大は必ずし

もアンアベイラビリティを増大させることにはつながらないことも明らかとなり、最適な保全実施範囲の存在する。この例題では保全範囲パターン⑦すなわち、1、2および4番のコンポーネントに保全を実施するのが最も効果的であると云える。

5.2 定期点検周期の決定問題—例題計算(2)—

(1) システム記述と問題設定

解析対象とするシステムは Fig. 5.6(a) に図示されている。これは 2-out-of-3 (SB-1) と 2-out-of-4 (SB-2) の部分システムが直列に配置されたシステムである。このシステムは、ある一定期間 (T_0) の運転後、定められた期間 (T_m) で保全され、再び稼動する。保全は完全保全である。

部分システム SB-1 を構成するコンポーネントは同一ロットから取出されたもので、故障率は L_1 である。同様に SB-2 に対しても、コンポーネントは故障率 L_2 を有する。

さて、このシステムに対して、問題を次のように設定する。すなわち、定期点検の周期を T_0 、保全期間を T_m 、保全を完全保全とすると、 $(T_0 + T_m)$ 期間中のシステムの平均アンアベイラビリティを最小とするには、 T_0 と T_m の間にどのような関連があるか。言い換えれば、保全所要期間を指定したとき、点検周期をどのように定めれば、システムの平均アンアベイラビリティを最小化できるかという問題である。Fig. 5.7 は、この問題の概念的説明である。

(2) 解析方法と結果

Fig. 5.6(b) は部分システム SB-1 および SB-2 の状態遷移図である。図中、破線が施された状態は各々の部分システムの故障状態である。他の状態はシステム機能からみて、非故障状態である。同図の下段は、各コンポーネントの故障率を解析ケース毎にまとめた表である。すなわち、解析ケース I は SB-1 のコンポーネントの故障率 (L_1) および、SB-2 のコンポーネントの故障率 (L_2) に対して、それぞれ 0.1、および 0.2 のデータを与えた場合の解析であり、解析ケース II は各々のデータを 4 倍した場合の解析である。

Fig. 5.8 は解析ケース I の場合の点検周期あるいは運転期間 (T_0) と平均アンアベイラビリティとの関係を保全期間 (T_m) をパラメータとして図示したものである。Fig. 5.9 は同様な関係を解析ケース II に対して図示したものである。これらの図から、各々のケースに対してある一定の保全期間に対して、システムアンアベイラビリティを最小とする点検周期、あるいは運転期間を求めることができる。

このようにして求めた保全期間と点検周期 (運転期間) との関係を図示したものが Fig. 5.10 である。この図は、各コンポーネントの故障率が増大すると一定の保全期間に対しては点検間隔を小さくしなければならない。これは直感的予想とも一致するところである。

Table 5.1 Failure-rate and maintenance-duration for each component

No. of components	failure rate (-)	repair rate (-)	necessary time for maintenance (-)
1	0.1	—	0.2
2	0.1	—	0.2
3	0.1	—	0.2
4	0.3	—	0.8
5	0.3	—	—
6	0.01	—	—

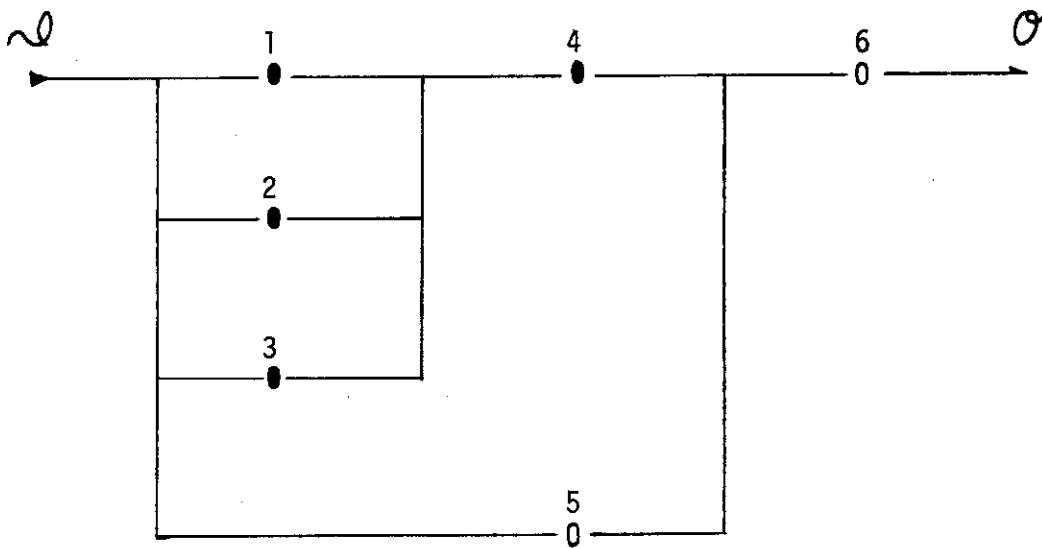


Fig. 5.1 System diagram for Sample Calculation No.1
 Components 1 to 4 are to be maintained previously. Components 5 to 6 are not.

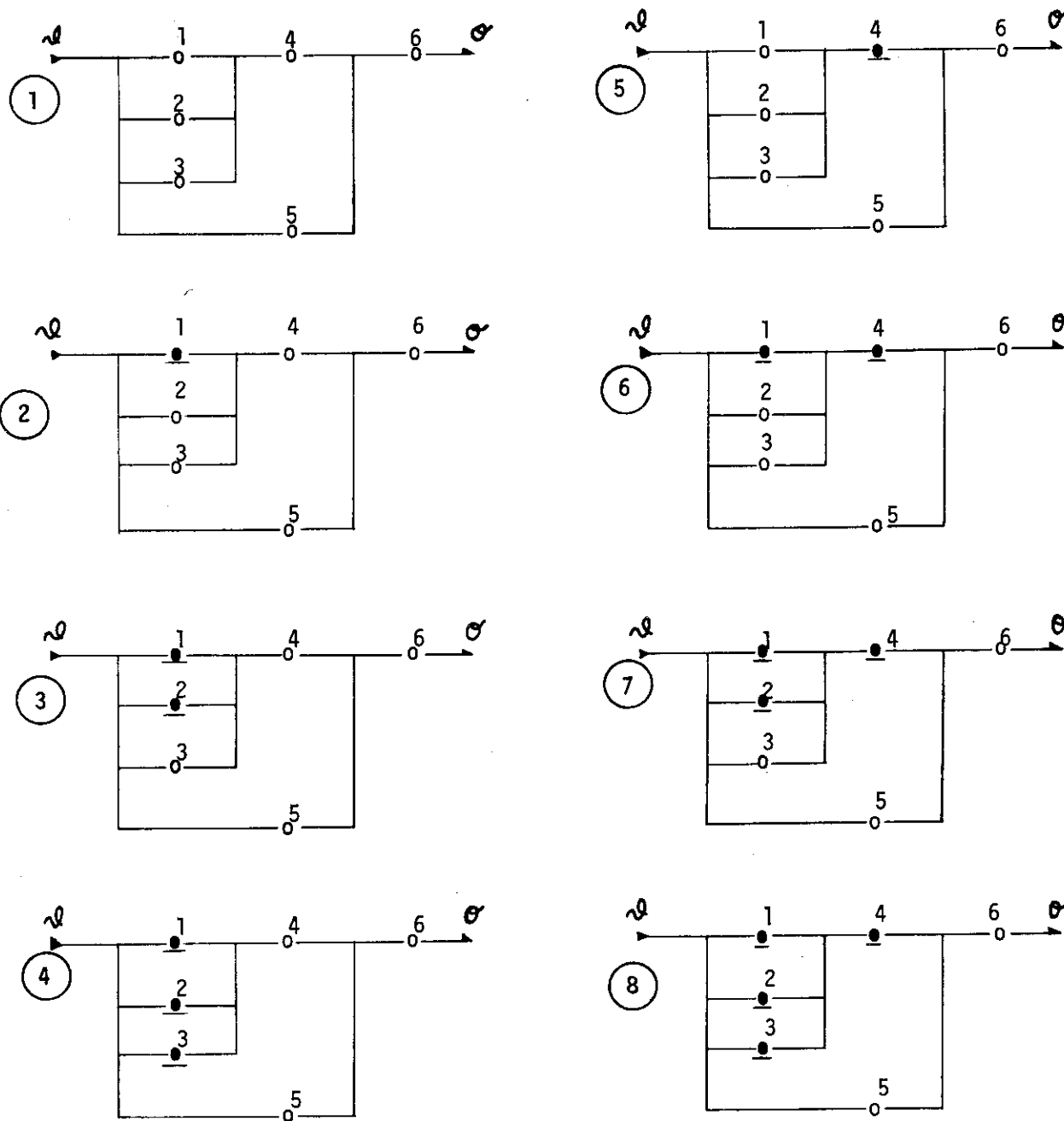


Fig. 5.2 All of the different patterns which can be distinguished under the conditions that component 1 to 3 has all the same failure rate(L_1). Components underlined are maintained on operation.

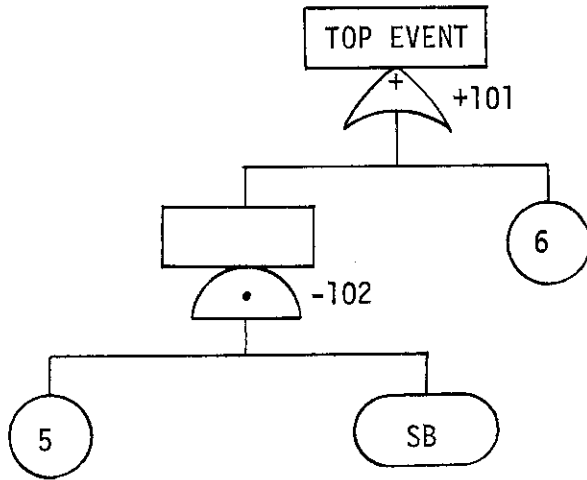


Fig. 5.3 (a) Fault Tree of the maintenance pattern No.8 showed in the Fig. 5.2

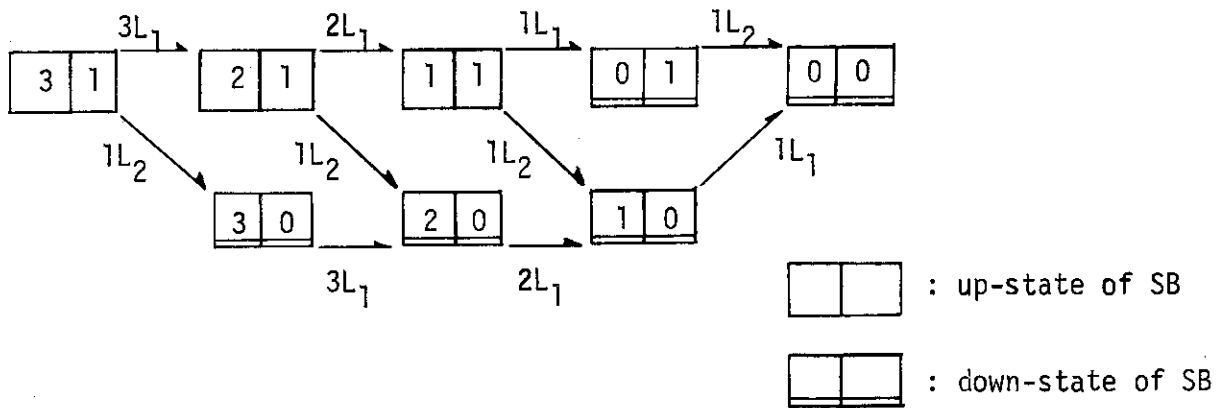


Fig.5.3 (b) State transition diagram which is used to calculate the unavailability of subsystem SB. L_1 denotes the failure rate of components 1,2 and 3. L_2 denotes that of component 4.

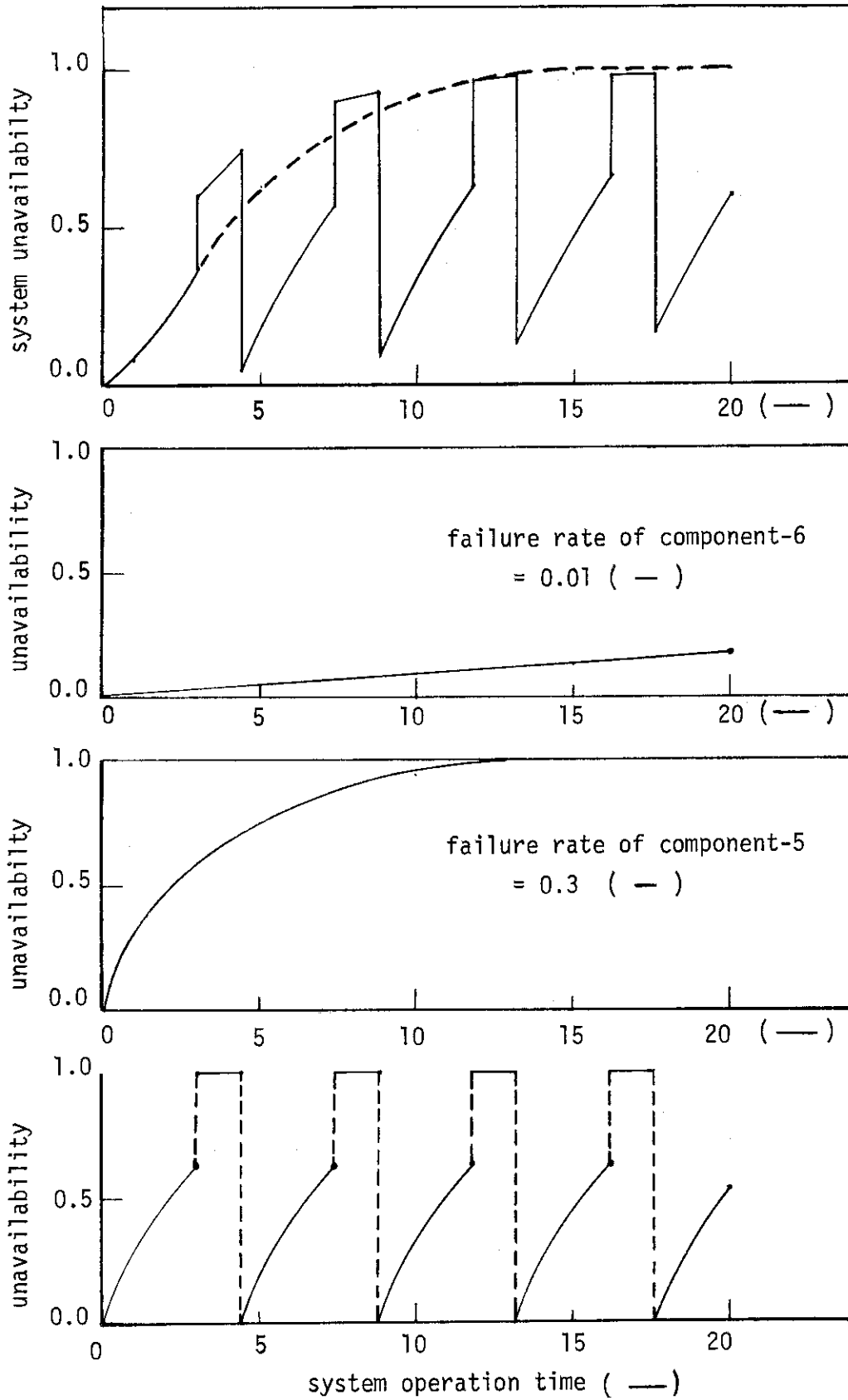


Fig.5.4 Unavailabilities of total system, components and subsystem(SB) as functions of system operation time

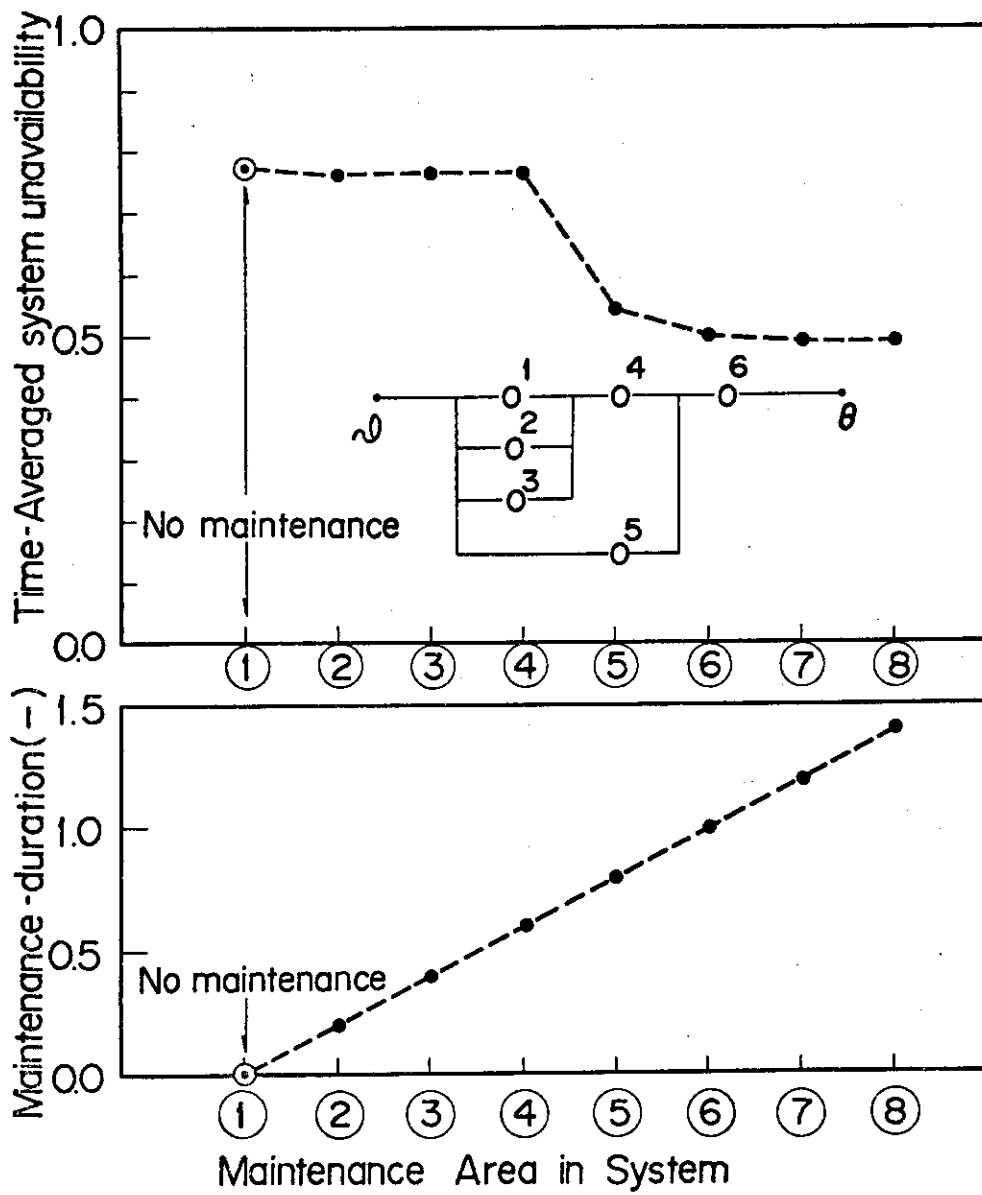


Fig. 5.5 Time-averaged system unavailability for the maintained area (1) to (8).

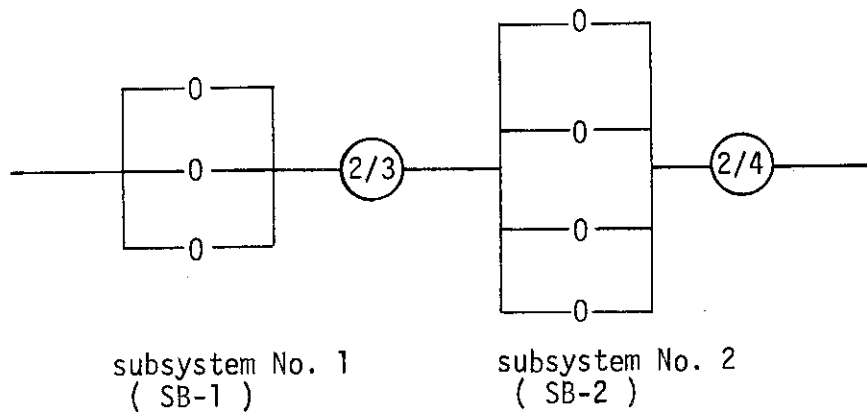
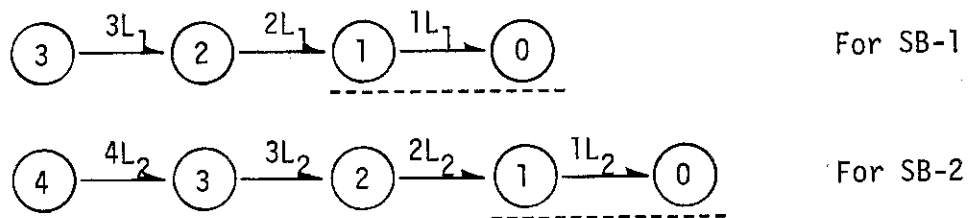


Fig. 5.6 (a) System diagram for the Sample Calculation No.2.



		Failure Data	
		L_1 subsystem No.1	L_2 subsystem No.2
Case-I		0.1	0.2
Case-II		0.4	0.8

Fig. 5.6 (b) State-transition-diagram for each subsystem(SB-1,SB-2).

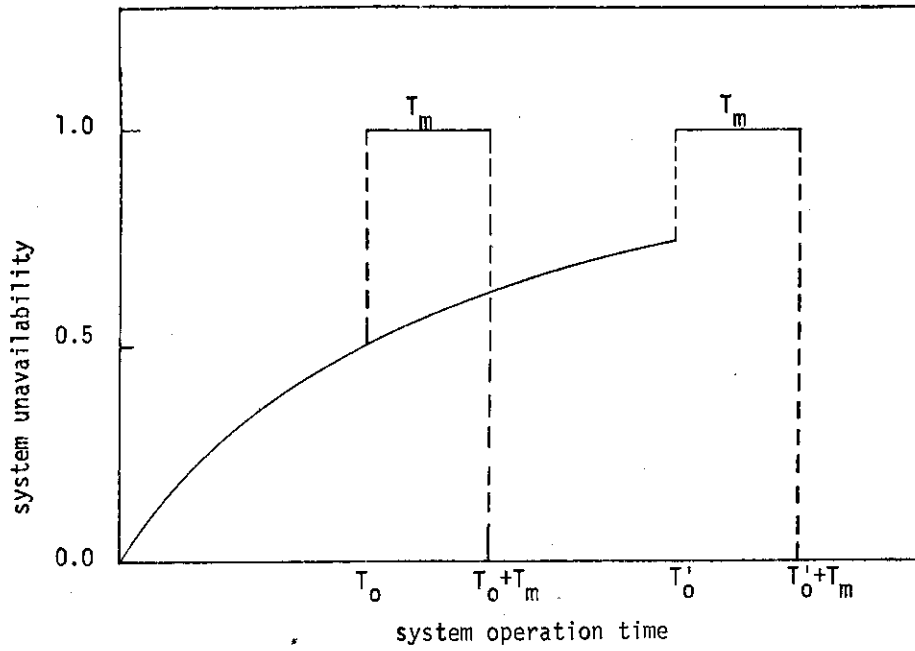


Fig. 5.7 Conceptual figure illustrative of Sample Calculation No.2

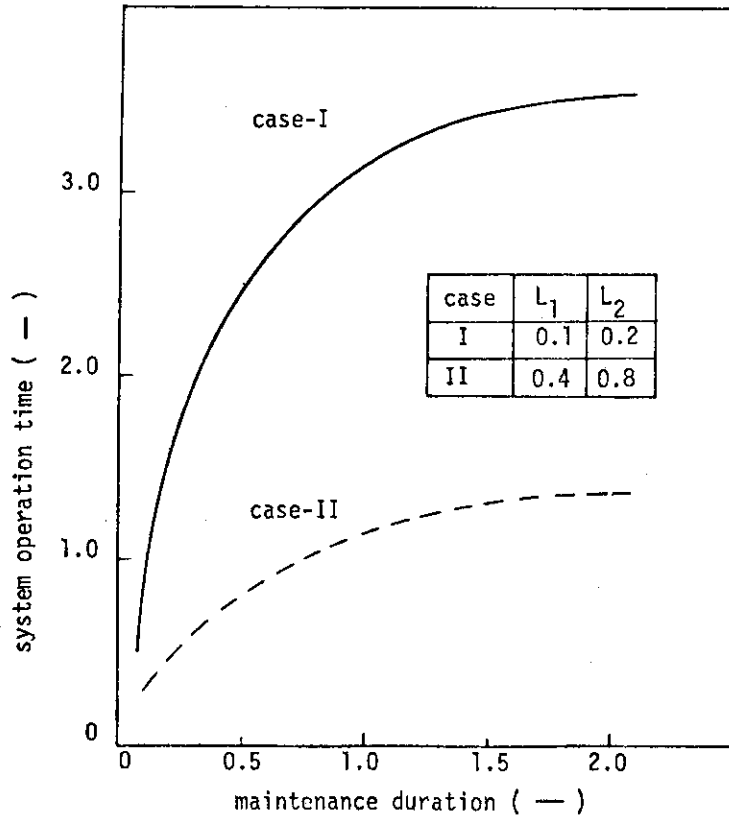


Fig. 5.10 Relation between maintenance-time-duration and system-operation-time in order to minimize the time-averaged system unavailability.

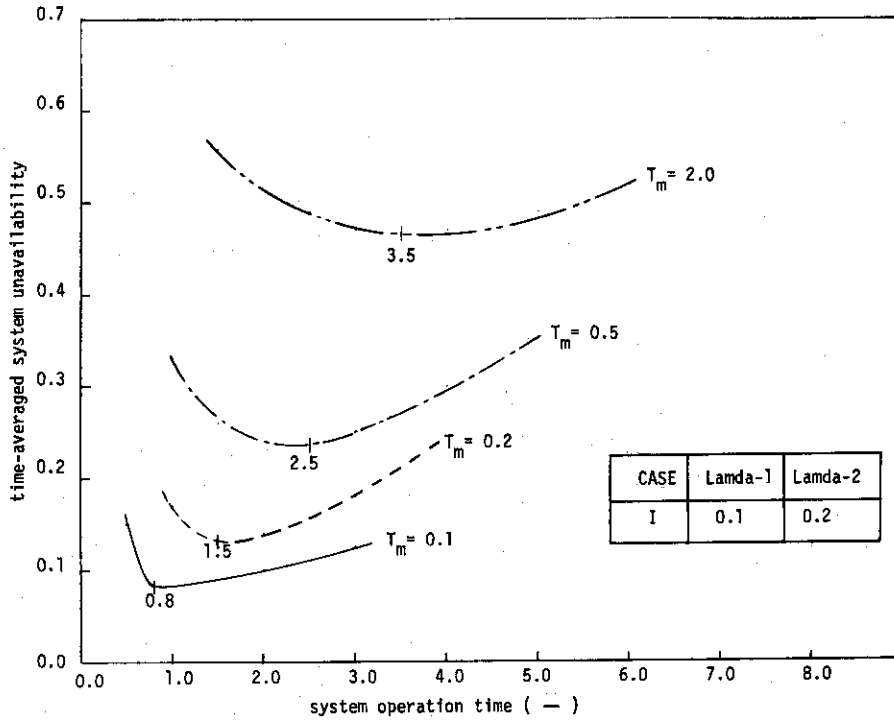


Fig. 5.8 Time-averaged system unavailabilities as functions of system operation time for CASE-I. T_m 's are given maintenance-time duration for subsystems SB-1 and SB-2.

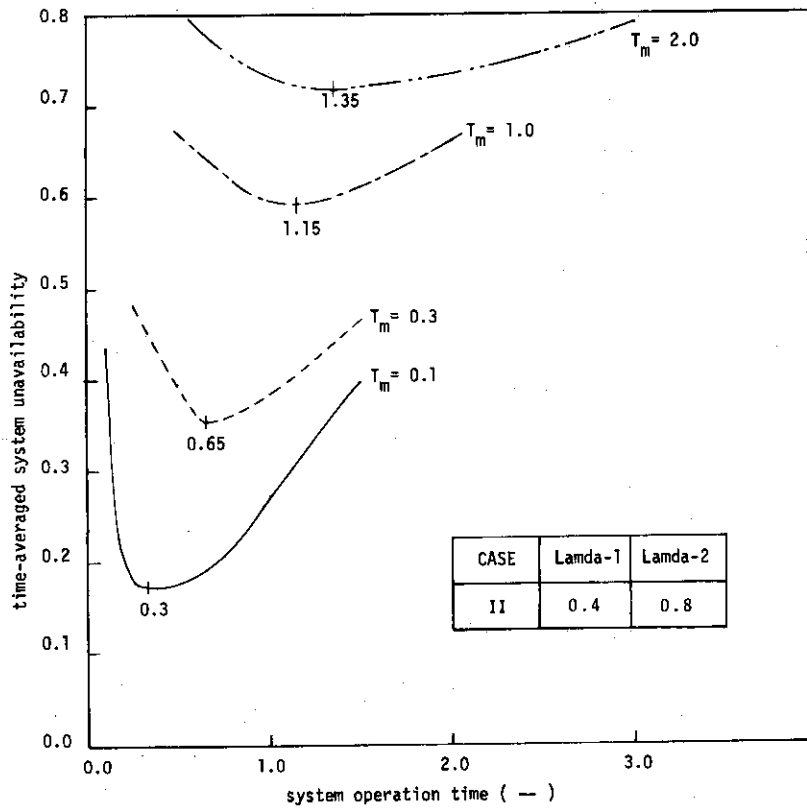


Fig. 5.9 Time-averaged system unavailabilities as functions of system operation time for CASE-II. T_m 's are maintenance-time-durations for subsystems SB-1 and SB-2.

6. あとがき

5章までに、フォールト・ツリに基づくシステム信頼度解析コード“FALCOM”の概要および計算例を述べてきたが、本章では、信頼度解析にあたって今後に残された点の主要なものを2, 3述べる。

(1) フォールト・ツリの標準的作成法の確立の必要性

大規模・複雑なシステムのフォールト・ツリを作成しようとするれば、一般に膨大な人と時間が必要となる。更にツリ作成者の主観に左右されうる部分もツリ作成上存在する。従って、フォールト・ツリの標準的作成法の確立を図り、計算機処理によるフォールト・ツリの自動作成法の開発が必要である。

(2) 信頼性データベースと計算精度の検討

システム信頼性解析においては、信頼性データ不足がしばしば指摘される。このような状況のもとでは、解析モデルあるいはフォールト・ツリ表現をいかに厳密に作成しても計算結果の精度にはおのずから不確定さが存在する。従って、信頼性データベースの評価を行い、フォールト・ツリあるいは解析モデルの詳細化との調和を図ることが大切である。これはデータ収集分野と理論解析分野との緊密な協力のもとに解決していかねばならない。

(3) 状態遷移図の作成方法の検討

システム信頼度解析に本計算コードを適用するとき、待期系あるいは冗長系を有する部分システムに対してはマルコフ過程を適用することになる。このとき部分システムが大きくなると状態図(Shannon-線図)作成が極めて困難となる。この解決のためには、計算機による状態図自動作成コードの開発が是非必要である。

(4) データの分布形とコンポーネント間独立性

本計算コードでは故障および修復の時間分布は指数分布である仮定しているがより一般的なデータを扱うためにはコードの改良が必要である。また基本コンポーネント間の独立性を仮定しているが、今後は、common mode failureのような非独立性の検討が重要となる。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、動力炉開発・安全性研究管理部多目的炉設計研究室の方々に種々のご援助をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

6. あとがき

5章までに、フォールト・ツリに基づくシステム信頼度解析コード“FALCOM”の概要および計算例を述べてきたが、本章では、信頼度解析にあたって今後に残された点の主要なものを2, 3述べる。

(1) フォールト・ツリの標準的作成法の確立の必要性

大規模・複雑なシステムのフォールト・ツリを作成しようとするれば、一般に膨大な人と時間が必要となる。更にツリ作成者の主観に左右されうる部分もツリ作成上存在する。従って、フォールト・ツリの標準的作成法の確立を図り、計算機処理によるフォールト・ツリの自動作成法の開発が必要である。

(2) 信頼性データベースと計算精度の検討

システム信頼性解析においては、信頼性データ不足がしばしば指摘される。このような状況のもとでは、解析モデルあるいはフォールト・ツリ表現をいかに厳密に作成しても計算結果の精度にはおのずから不確定さが存在する。従って、信頼性データベースの評価を行い、フォールト・ツリあるいは解析モデルの詳細化との調和を図ることが大切である。これはデータ収集分野と理論解析分野との緊密な協力のもとに解決していかなければならない。

(3) 状態遷移図の作成方法の検討

システム信頼度解析に本計算コードを適用するとき、待期系あるいは冗長系を有する部分システムに対してはマルコフ過程を適用することになる。このとき部分システムが大きくなると状態図(Shannon-線図)作成が極めて困難となる。この解決のためには、計算機による状態図自動作成コードの開発が是非必要である。

(4) データの分布形とコンポーネント間独立性

本計算コードでは故障および修復の時間分布は指数分布である仮定しているがより一般的なデータを扱うためにはコードの改良が必要である。また基本コンポーネント間の独立性を仮定しているが、今後は、common mode failureのような非独立性の検討が重要となる。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、動力炉開発・安全性研究管理部多目的炉設計研究室の方々に種々のご援助をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

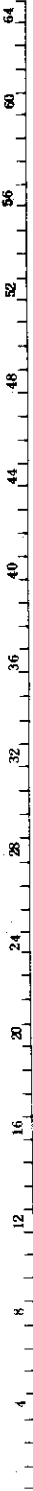
- (1) 鈴木, 小倉他「フォールト・ツリによるシステム信頼度解析(I)」(1976)
- (2) W.E.Vesely et al. "PREP and KITT", IN-1392 (1970)
- (3) "Reactor Safety Study ; An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, App.I ~ V", WASH-1400 (1975)
- (4) 塩見 弘著"信頼性工学入門"丸善(1967)
- (5) B.V. グネジェンコ他「信頼性理論II」塩谷, 林共訳共立(1972)
- (6) 国沢, 宇田川編「オペレーションズ・リサーチ入門」広川書店(1962)
- (7) J.B.Fussell, "A new methodology for obtaining cut sets for fault trees", Trans. ANS 15 (1) 1972.
- (8) Barlow et al., "Statistical Theory of Reliability and Life Testing"
Holt, Rinehart and Winston, Inc.1976.

附録A 計算コード入力マニユアル

INTERPRETER SPACING	
4	64
8	60
12	56
16	52
20	48
24	44
28	40
32	36
36	32
40	28
44	24
48	20
52	16
56	12
60	8
64	4
タ イ ト ル	
T I T L E	
2 0 A 4	
コラム	80
5	75
10	70
15	65
20	60
25	55
30	50
35	45
40	40
45	35
50	30
55	25
60	20
65	15
70	10
75	5
80	

(1) 任意の文字で指定する。

INTERPRETER SPACING



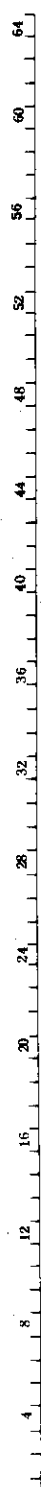
対象システム	
FIELD NAME	IRU
	I 5
コラム	



(1) 対象システム
 IRU = $\begin{cases} 0; & \text{待期冗長系単一コンポーネントを含む全システム} \\ 1; & \text{待期冗長系(部分システム)のみ} \end{cases}$

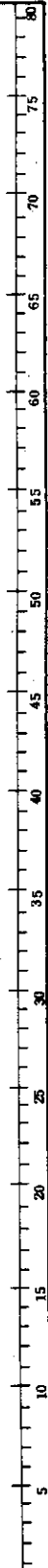


INTERPRETER SPACING



FIELD NAME	DELT I	TMAX	EPSB	NBMAX	NPR
	E 10.0	E 10.0	E 100	I 5	I 5

- (1) 積分時間間隔 (年)
- (2) システム運転時間 (年)
- (3) 許容誤差
- (4) 最大打切項数 (3章(3.1.1)式参照)
- (5) 計算結果のプリント間隔 (NPR * DELT I 毎にプリントする)



INTERPRETER SPACING		
ゲート数	計算過程	計算手段
NMAX	JOPT	JOPT
15	15	15
<p> (1) フォールト・ツリ中のゲート個数 (2) Minimal Cut Setの計算過程のプリント $JOPT(1) = \begin{cases} 0; & \text{プリントなし} \\ 1; & \text{プリントする} \end{cases}$ (3) アベイラビリティの計算手段 $JOPT(2) = \begin{cases} 0; & \text{排反なminimal cut setsによる計算 (JAERI memo 6691 参照)} \\ 1; & \text{Bound法による計算 (3章参照)} \end{cases}$ </p>		
FIELD NAME		
コラム		

INTERPRETER SPACING

ゲート番号	データ数	コンポーネント番号, ゲート番号														
FIELD NAME	GA TD	COMP	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT	CONT			
	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5	I 5			
コラム	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

(1) ゲート番号

{ 100~999の任意の整数

+; OR-gate

-; AND-gate

(2) データ数

各ゲートに連結するコンポーネントおよびゲートの総個数。

(3) コンポーネント番号

1~99の任意の整数

(注)

(i) I R U = 1 の場合はこのカードは不要。

(ii) このカードはNMAX 回繰返す。

INTERPRETER SPACING

コンポ ネン 番号	結果プリント	運転時間	保全時間	故障率
FIELD NAME	IPRC	TCO	TCM	RAMDA
	I 5	E 100	E 100	E 100
コラム				

(1) コンポネント番号(1~99)

(2) アンペアバイオリタイ計算結果のプリント

$$IPRC = \begin{cases} 0; & \text{プリントなし} \\ 1; & \text{プリントする} \end{cases}$$

(3) 運転時間(年)

(4) 保全時間(年)

(5) 故障率(/年)

(6) 修復率(/年)

(7) 初期故障率(-)

註

(i) I RU=1の場合, このカード不要。

(ii) このカードは単一コンポネントの数だけ繰返し, 最後にブランク・カード一枚を挿入する。

INTERPRETER SPACING	
システム番号	
FIELD NAME	
NOU	
I 5	
コラム	

(1) システム番号

註

(i) このカード以下のデータはサブシステムの個数だけ入力する。

(ii) すべての入力終了後、ブランクカード一枚挿入する。

INTERPRETER SPACING

フィールド名	オプション	オプション	オプション
FIELD NAME	IOPT	IOPT	IOPT
	I 5	I 5	I 5
コラム	5	10	15
(1) オプション(1)	サブシステムの状態変化		
	IOPT(1) = { 0 ; なし 1 ; あり		
(2) オプション(2)	系統保全		
	IOPT(2) = { 0 ; なし 1 ; あり		
(3) オプション(3)	遷移率入力形態		
	IOPT(3) = { 0 ; m * λ の形式 1 ; m * λ * α の形式		

INTERPRETER SPACING

4		8		12		16		20		24		28		32		36		40		44		48		52		56		60		64	
状態数	データ数	正常状態																													
NZ	NDZ	NSBZ																													
I 5	I 5	I 5																													
5	10	15																													
コラム																															
<p>(1) Shannon 線図上の状態数</p> <p>(2) 遷移率データ数</p> <p>(3) 正常状態の最後の状態番号</p> <p>正常状態は 1, 2, ..., NSBZ の規定する。</p>																															
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80												85	90			
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80												85	90			

INTERPRETER SPACING	
遷移率の 種 類	
ICON	
I 5	
コラム	
<p>(1) 遷移率のセット数</p> <p>遷移率データセットが</p> <p style="margin-left: 40px;"> $(\lambda_1, \mu_1, \gamma_1)$ $(\lambda_2, \mu_2, \gamma_2)$ \vdots $(\lambda_{100N}, \mu_{100N}, \gamma_{100N})$ </p> <p>となる場合の ICON を入力する。</p>	

INTERPRETER SPACING

		第1群の遷移率セット				第2群の遷移率セット			
FIELD NAME	故障率	修復率	据付率	故障率	修復率	据付率			
	XX(1)	YY(1)	ZZ(1)	XX(2)	YY(2)	ZZ(2)			
コラム	E10.0	E10.0	E10.0	E10.0	F10.0	E10.0			

- (1) 故障率(／年)
- (2) 修復率(／年)
- (3) 据付率(／年)

(注) このカードは、カード1枚に2群のICONまで繰返す。

INTERPRETER SPACING

FIELD NAME	遷移データ A (1)				遷移データ A (2)				遷移データ A (3)				遷移データ A (4)						
	遷移前	遷移後	乗数	種類番号	遷移前	遷移後	乗数	種類番号	遷移前	遷移後	乗数	種類番号	遷移前	遷移後	乗数	種類番号			
IFROM	ITO	IRATEZ	ISZISRT		IFROM	ITO	IRATEZ	ISZISRT		IFROM	ITO	IRATEZ	ISZISRT		IFROM	ITO	IRATEZ	ISZISRT	

(1) 遷移前状態番号

(2) 遷移後状態番号

(3) 遷移率 (λ, μ, γ) の乗数

例えば $(m\lambda, n\mu, L\gamma)$ の m, n, L 等

(4) 遷移率の種類

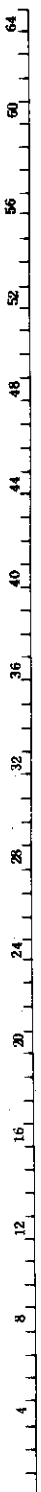
$$ISZ = \begin{cases} 1; \lambda \\ 2; \mu \\ 3; \gamma \end{cases}$$

(5) 遷移率データセット番号

$(\lambda_i, \mu_i, \gamma_i)$ の i

(注) このカードは1枚につき4個のNDZまで繰返す。

INTERPRETER SPACING



FIELD NAME	遷移データ B (1)			遷移データ B (2)			遷移データ B (3)			遷移データ B (4)		
	遷移前	遷移後	α の値	遷移前	遷移後	α の値	遷移前	遷移後	α の値	遷移前	遷移後	α の値
JFROM	JTO	ALPHA		JFROM	JTO	ALPHA	JFROM	JTO	ALPHA	JFROM	JTO	ALPHA
I 5	I 5	E 10.0		I 5	I 5	E 10.0	I 5	I 5	E 10.0	I 5	I 5	E 10.0

- (1) 遷移前状態番号
- (2) 遷移後状態番号
- (3) α の値

Transition rate = $m \cdot \lambda \cdot \alpha$ (オプショ α (3)=1の場合)

註

(1) オプショ α (3)=0 の場合はこのカードは不要である。

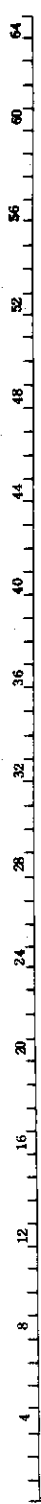
(2) 1枚のカードに4つのデータセットを入力する。

但し、一番最後のデータカードが(61~80)カラムで終わった場合には、ブランクカード1枚を挿入する。

INTERPRETER SPACING

<p>4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60 64</p>	
<p>5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80</p>	<p>5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80</p>
<p>FIELD NAME</p>	<p>運転期間 保全期間</p>
<p>TO</p>	<p>TMAINT</p>
<p>E 100</p>	<p>E 100</p>
<p>コラム</p>	<p>(1) 運転期間(年) 1 サイクル当りの期間 (2) 保全期間(年) 1 サイクル当りの期間 (注) オブション(2)=0の場合はこのカードは不要である。</p>

INTERPRETER SPACING



FIELD NAME	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率	初期状態確率
	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO
	E100	E100	E100	E100	E100	E100	E100	E100	E100
コラム									

(注) 1枚のカードに8個のデータを入力し、NZまで繰返す。



附録B 入力形式および出力形式

FALCOM SAMPLE CALCULATION

0	1.00	E-01	1.00	E+00	1.00	E-03	2	1		
4	0	1								
101	2	102	103							
102	2	104	3							
-103	3	4	5	6						
-104	2	1	2							
1	1	1.00	E+00				8.76	E-02	1.00	E+01
2	1	1.00	E+00				8.76	E-02	1.00	E+01
4	1	1.00	E+00				4.38	E-02		
5	1	1.00	E+00				4.38	E-02		
6	1	1.00	E+00				4.38	E-02		
3										
6	9	3								
1										
6.00	E-01	3.50	E+01	2.92	E+02					
1	2	4	1	1	2	3	1	2	1	2
4	5	2	2	1	3	1	1	3	1	1
6	3	2	3	1			3	1	1	1
1.00	E+00						5	6	3	1
							6	5	1	2
							3	5	3	1
							1	3	1	1
							2	2	5	2
							1	1	3	1
							3	1	1	1

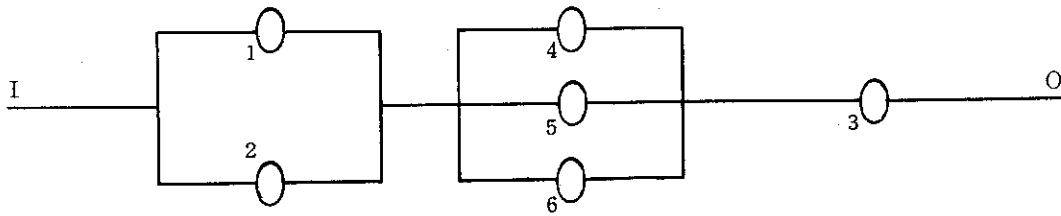


Fig.B.1 System Block Diagram for Sample Calculation.

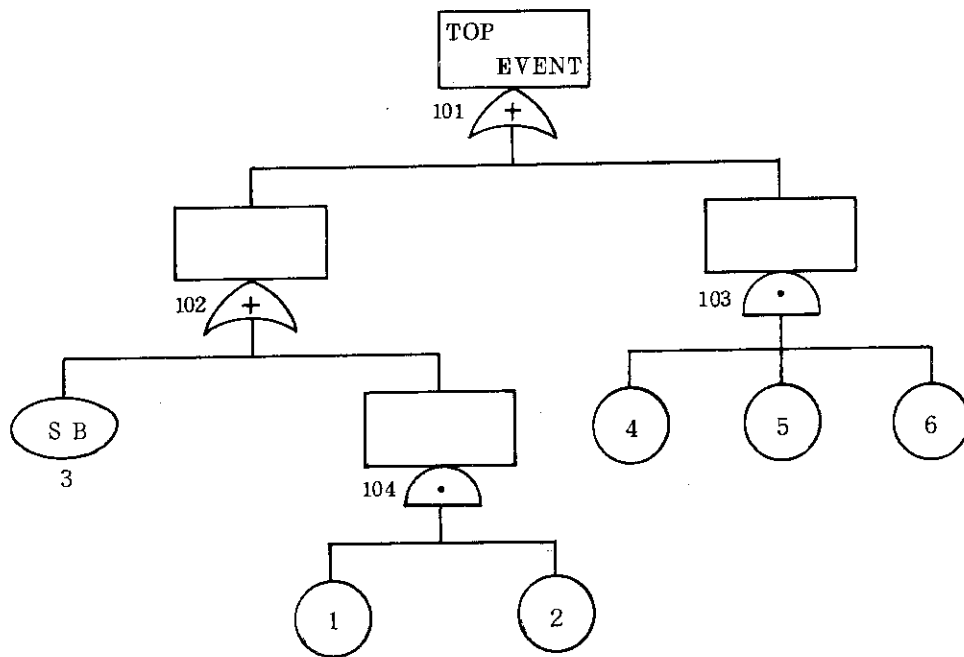


Fig.B.2 Fault Tree of the above System. Component-3 is regarded as a Subsystem which is maintained.

 *** FAULT TREE INPUT ***

GATE NUMBER	NO. OF COMP,	COMPONENTS AND GATE NUMBER			
101 OR	2	102	103		
102 OR	2	104	3		
103 AND	3	4	5	6	
104 AND	2	1	2		

INPUT DATA OF FALCOM - COMPUTER CODE

 *** CONTROL PARAMETER INPUT ***

TITLE.....FALCOM SAMPLE CALCULATION

TOTAL SYSTEM CALCULATION

TIME INTERVAL FOR PRINT (YR)..... 1.0000E-01
 TIME INTERVAL FOR INTEGRATION (YR), 1.0000E-01
 ERROR CRITERIA FOR BOUND 1.0000E-03
 MAXIMUM NO. OF BRACKETS 2
 MAXIMUM TIME OF SYSTEM 1.0000E+00

 *** COMPONENT INPUT ***

CHARACTERISTICS FOR COMPONENT NO. = 1

OPERATING TIME (YR)	.....	1.0000E+00
MAINTENANCE TIME (YR)	.....	0.0
FAILURE INTENSITY (1/YR)	.....	8.7600E-02
REPAIR INTENSITY (1/YR)	.....	1.0000E+01
INITIAL UNAVAILABILITY	.....	0.0

CHARACTERISTICS FOR COMPONENT NO. = 2

OPERATING TIME (YR)	.....	1.0000E+00
MAINTENANCE TIME (YR)	.....	0.0
FAILURE INTENSITY (1/YR)	.....	8.7600E-02
REPAIR INTENSITY (1/YR)	.....	1.0000E+01
INITIAL UNAVAILABILITY	.....	0.0

CHARACTERISTICS FOR COMPONENT NO. = 4

OPERATING TIME (YR)	.....	1.0000E+00
MAINTENANCE TIME (YR)	.....	0.0
FAILURE INTENSITY (1/YR)	.....	4.3800E-02
REPAIR INTENSITY (1/YR)	.....	0.0
INITIAL UNAVAILABILITY	.....	0.0

CHARACTERISTICS FOR COMPONENT NO. = 5

OPERATING TIME (YR)	.....	1.0000E+00
MAINTENANCE TIME (YR)	.....	0.0
FAILURE INTENSITY (1/YR)	.....	4.3800E-02
REPAIR INTENSITY (1/YR)	.....	0.0
INITIAL UNAVAILABILITY	.....	0.0

CHARACTERISTICS FOR COMPONENT NO. = 6

OPERATING TIME (YR)	.....	1.0000E+00
MAINTENANCE TIME (YR)	.....	0.0
FAILURE INTENSITY (1/YR)	.....	4.3800E-02
REPAIR INTENSITY (1/YR)	.....	0.0
INITIAL UNAVAILABILITY	.....	0.0

 *** SUB-SYSTEM INPUT ***

SUB-SYSTEM NO. = 3

NUMBER OF STATES 6

NUMBER OF STAGES 2

FAULTED STATES 4 5 6

RELIABILITY PARAMETERS(/YEAR)

LAMBDA(1) = 6.000D-01 MEU(1) = 3.504D+01 GAMMA(1) = 2.920D+02

TRANSITION RATES

FROM	TO	RATE	FROM	TO	RATE	FROM	TO	RATE
1	2	4 L1	2	3	1 M1	3	4	3 L1
4	5	2 M1	3	1	1 G1	5	2	1 G1
6	3	2 G1						

OPERATING TIME 1.000D+00 (YEAR)

MAINTENANCE TIME 0.0 (YEAR)

INITIAL PROBABILITY

PO(1) = 1.000D+00 PO(2) = 0.0 PO(3) = 0.0 PO(4) = 0.0
 PO(5) = 0.0 PO(6) = 0.0

 *** CALCULATED RESULTS ***

 *** BOOLEAN CUT SET ***

NO. 1 1 2
 NO. 3 4 5 6

NO. 2 3

 *** MINIMAL CUT SET ***

NO. 1 3 NO. 2 1 2
 NO. 3 4 5 6

 *** COMPONENT AVAILABILITY ***

COMPONENT AVAILABILITY OF NO. = 1

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.000000E+00	1.000000E-01	5.5171470E-03	9.9448290E-01
2.000000E-01	7.5290950E-03	9.9247090E-01	3.0000010E-01	8.2627940E-03	9.9173720E-01
4.000010E-01	8.5303520E-03	9.9146970E-01	5.000010E-01	8.6279210E-03	9.9137210E-01
6.0000010E-01	8.6635020E-03	9.9133650E-01	7.0000020E-01	8.6764770E-03	9.9132350E-01
8.000020E-01	8.6812080E-03	9.9131880E-01	9.0000020E-01	8.6829360E-03	9.9131710E-01
1.0000000E+00	8.6835660E-03	9.9131640E-01			

COMPONENT AVAILABILITY OF NO. = 2

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.000000E+00	1.000000E-01	5.5171470E-03	9.9448290E-01
2.000000E-01	7.5290950E-03	9.9247090E-01	3.0000010E-01	8.2627940E-03	9.9173720E-01
4.000010E-01	8.5303520E-03	9.9146970E-01	5.000010E-01	8.6279210E-03	9.9137210E-01
6.0000010E-01	8.6635020E-03	9.9133650E-01	7.0000020E-01	8.6764770E-03	9.9132350E-01
8.000020E-01	8.6812080E-03	9.9131880E-01	9.0000020E-01	8.6829360E-03	9.9131710E-01
1.0000000E+00	8.6835660E-03	9.9131640E-01			

COMPONENT AVAILABILITY OF NO. = 5

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	1.0000000E-01	4.3703910E-03	9.9562960E-01
2.0000000E-01	8.7217090E-03	9.9127830E-01	3.0000010E-01	1.3054010E-02	9.8694600E-01
4.0000010E-01	1.7367360E-02	9.8263260E-01	5.0000010E-01	2.1661880E-02	9.7833810E-01
6.0000010E-01	2.5937680E-02	9.7406230E-01	7.0000020E-01	3.0194700E-02	9.6980530E-01
8.0000020E-01	3.4433190E-02	9.6556680E-01	9.0000020E-01	3.8653140E-02	9.6134690E-01
1.0000000E+00	4.2854610E-02	9.5714540E-01			

COMPONENT AVAILABILITY OF NO. = 4

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	1.0000000E-01	4.3703910E-03	9.9562960E-01
2.0000000E-01	8.7217090E-03	9.9127830E-01	3.0000010E-01	1.3054010E-02	9.8694600E-01
4.0000010E-01	1.7367360E-02	9.8263260E-01	5.0000010E-01	2.1661880E-02	9.7833810E-01
6.0000010E-01	2.5937680E-02	9.7406230E-01	7.0000020E-01	3.0194700E-02	9.6980530E-01
8.0000020E-01	3.4433190E-02	9.6556680E-01	9.0000020E-01	3.8653140E-02	9.6134690E-01
1.0000000E+00	4.2854610E-02	9.5714540E-01			

COMPONENT AVAILABILITY OF NO. = 6

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	1.0000000E-01	4.3703910E-03	9.9562960E-01
2.0000000E-01	8.7217090E-03	9.9127830E-01	3.0000010E-01	1.3054010E-02	9.8694600E-01
4.0000010E-01	1.7367360E-02	9.8263260E-01	5.0000010E-01	2.1661880E-02	9.7833810E-01
6.0000010E-01	2.5937680E-02	9.7406230E-01	7.0000020E-01	3.0194700E-02	9.6980530E-01
8.0000020E-01	3.4433190E-02	9.6556680E-01	9.0000020E-01	3.8653140E-02	9.6134690E-01
1.0000000E+00	4.2854610E-02	9.5714540E-01			

 *** SUB-SYSTEM AVAILABILITY ***

CHARACTERISTICS FOR SUB-SYSTEM NO. = 3

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E-01	1.9345440E-03
2.0000000E-01	2.0429100E-03	3.0000010E-01	2.0452870E-03
4.0000010E-01	2.0453710E-03	5.0000010E-01	2.0453740E-03
6.0000010E-01	2.0453740E-03	7.0000020E-01	2.0453740E-03
8.0000020E-01	2.0453740E-03	9.0000020E-01	2.0453740E-03
1.0000000E+00	2.0453740E-03	9.9999990E-01	2.0453740E-03

 *** MCS AVAILABILITY ***

CHARACTERISTICS FOR MCS NO. = 1

COMPONENTS 3

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	0.0	1.9345440E-03	9.9806550E-01
1.0000000E-01	2.0429100E-03	9.9795710E-01	2.0000000E-01	2.0452870E-03	9.9795470E-01
3.0000010E-01	2.0453710E-03	9.9795470E-01	4.0000010E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01
5.0000010E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01	6.0000010E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01
7.0000020E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01	8.0000020E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01
9.0000020E-01	2.0453740E-03	9.9795470E-01	1.0000000E+00	2.0453740E-03	9.9795470E-01

CHARACTERISTICS FOR MCS NO. = 2

COMPONENTS 1 2

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	1.0000000E-01	3.0438910E-05	9.9996960E-01
2.0000000E-01	5.6687260E-05	9.9999330E-01	3.0000010E-01	6.8273760E-05	9.9993180E-01
4.0000010E-01	7.2766900E-05	9.9992730E-01	5.0000010E-01	7.4410200E-05	9.9992360E-01
6.0000010E-01	7.5056250E-05	9.9992500E-01	7.0000020E-01	7.5281250E-05	9.9992470E-01
8.0000020E-01	7.5363360E-05	9.9992470E-01	9.0000020E-01	7.5393370E-05	9.9992470E-01
1.0000000E+00	7.5404310E-05	9.9992460E-01			

AVERAGE 6.4348830E-05

CHARACTERISTICS FOR MCS NO. = 3

COMPONENTS 4 5 6

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	1.0000000E-01	8.3475870E-08	9.9999990E-01
2.0000000E-01	6.6344470E-07	9.9999300E-01	3.0000010E-01	2.2244980E-06	9.999780E-01
4.0000010E-01	5.2384320E-06	9.9994800E-01	5.0000010E-01	1.0164550E-05	9.998990E-01
6.0000010E-01	1.7449900E-05	9.9982600E-01	7.0000020E-01	2.7529090E-05	9.9997250E-01
8.0000020E-01	4.0825500E-05	9.9995920E-01	9.0000020E-01	5.7750280E-05	9.9994230E-01
1.0000000E+00	7.8703220E-05	9.9992130E-01			

AVERAGE 1.99935500E-05

 *** MCS RANKING ***

TIME = 1.0999990E+00.

RANKING NO.	UNAVAILABILITY	COMPONENTS
1	2.0453740E-03	3
2	7.8703220E-05	4 5 6
3	7.5404310E-05	1 2

 *** TOTAL SYSTEM AVAILABILITY ***

TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY	TIME(YR)	UNAVAILABILITY	AVAILABILITY
0.0	0.0	1.0000000E+00	0.0	1.9345440E-03	9.9806550E-01
1.0000000E-01	2.0733700E-03	9.9792670E-01	2.0000000E-01	2.1025200E-03	9.9789750E-01
3.0000100E-01	2.1157250E-03	9.9788430E-01	4.0000100E-01	2.1232190E-03	9.9787680E-01
5.0000100E-01	2.1298050E-03	9.9787020E-01	6.0000100E-01	2.1376890E-03	9.9786230E-01
7.0000200E-01	2.1479710E-03	9.9785210E-01	8.0000200E-01	2.1613220E-03	9.9783870E-01
9.0000200E-01	2.1782410E-03	9.9782180E-01	1.0000000E+00	2.1991600E-03	9.9780090E-01

AVERAGE 2.0609700E-03

MINIMAL CUT SETS AVERAGE UNAVAILABILITY

- 1) 1.9768590E-03
- 2) 6.4348830E-05
- 3) 1.9935500E-05

SUB-SYSTEM AVERAGE UNAVAILABILITY

- 3) 1.7838560E-03