

確率論的安全評価のためのシステム信頼性解析方法の研究

松岡 猛*

Study on the System Reliability Analysis Methodology for the Probabilistic Safety Assessment

By

Takeshi MATSUOKA

Abstract

The Probabilistic Safety Assessment (PSA) is widely used for the safety assessment of nuclear power plants. The first major application of PSA technique was the Reactor Safety Study, which demonstrated that a nuclear power plant could be systematically analyzed by the PSA technique. Since the Reactor Safety Study, the need for more advanced methods of system reliability analysis has grown with the increased need for more accurate and detailed analysis.

The present study is devoted to develop and improve system reliability analysis methodologies for the PSA.

In chapter 2, a reliability analysis is given for the emergency decay heat removal system of the nuclear ship "Mutsu" and the emergency sea water cooling system of nuclear ship "Savannah", under ten typical nuclear ship accident conditions. It was pointed out that, for the evaluation of the effectiveness of safety system of a nuclear ship, it is necessary to evaluate its reliability under various accident conditions.

In chapter 3, a failure probability model is proposed. In this model, a failure rate is considered as a conditional failure rate, which is a function of cause for a failure, of severity of cause, of cause acting duration, and of failure mode. This model was constructed in order to treat the effects of an extreme environmental condition and the common mode failure on system reliability. Causes were classified into two types and failure modes in three types. The expressions of failure probabilities were obtained for combinations of these causes and failure mode types. This model was compared with failure data. The time dependence was well expressed by the α th power of time. The values of α were obtained in the range from 0 to 8.

In chapter 4, a computer program "FFTA" (a Fast Fault Tree Analysis program) is developed. The FFTA can obtain the point probability of the top event and the minimal cut sets for a fault tree with little expenditure of computer time. The algorithm is a bottom-up algorithm. The analyses are

* 原子力技術部

Performed for six sample fault trees and the results are compared with those obtained by the BAM and CUT codes. This program has a ten to thousand times faster calculation speed compared with the BAM and CUT codes.

In chapter 5, a new reliability analysis methodology GO-FLOW is presented. The GO-FLOW is a success-oriented system analysis technique. The modeling technique produces the GO-FLOW chart, which is composed of operators and signal lines and represents a function of the system. The analyses are performed for four systems : the emergency decay heat removal system of nuclear ship "Mutsu", the emergency core cooling system of a boiling water reactor, the emergency electric power supply for the emergency core injection system of marine reactor, and the auxially feedwater system of pressurized water reactor. The GO-FLOW has proved to be a valuable and useful tool for system reliability analysis.

目 次

1. 序 論	3	3.8.3 系の信頼性に重大な影響を及ぼす 環境条件の探索	25
1.1 歴史的背景	3	3.8.4 プログラム構成	26
1.2 システム信頼性解析における問題点	4	3.9 信頼性解析プログラムによる解析実施例	26
1.3 研究の概要	6	3.9.1 入力データ	26
2. 船用非常用崩壊熱除去系の信頼性解析	6	3.9.2 解析手順及び結果	27
2.1 緒 言	6	3.10 考 察	32
2.2 非常用崩壊熱除去系の機能及び構成	8	3.11 結 論	33
2.3 解析方法	9	4. 高速フォールト・ツリー解析プログラム	33
2.3.1 解析手順	9	4.1 緒 言	33
2.3.2 解析実施においての仮定	9	4.2 フォールト・ツリー及び構成要素	33
2.3.3 頂上事象	9	4.3 解析の基本的な方法	33
2.3.4 事故条件	10	4.4 各ゲートにおける手続き	34
2.4 故障データ	10	4.5 頂上事象発生確率の計算方法	34
2.5 解析結果	14	4.6 プログラムの説明	35
2.6 考 察	17	4.6.1 プログラム概説	35
2.7 結 論	17	4.6.2 解析実施時の具体的手順	35
3. 故障原因, 時間依存を考慮した 機器故障モデル	18	4.7 解析実施例, WAM-BAM, WAM-CUTコード との比較	39
3.1 緒 言	18	4.7.1 解析対象	39
3.2 基本的考え方	18	4.7.2 解析条件及び結果	39
3.3 故障原因の分類	18	4.8 頂上事象発生確率計算方法の精度	41
3.4 原因の程度	19	4.9 考 察	44
3.5 故障モードと故障原因	19	4.10 結 論	45
3.6 故障確率	19	5. GO-FLOW 手法	46
3.7 故障データとの比較	23	5.1 緒 言	46
3.8 信頼性解析プログラム	24	5.2 GO-FLOW 手法開発の経緯	46
3.8.1 各種故障条件下における頂上事象 発生確率の計算	24	5.3 GO 手法の特徴及び限界	47
3.8.2 二次的効果の計算	24	5.4 GO-FLOW 手法の概略	48
		5.4.1 信号の意味	48
		5.4.2 タイム・ポイント	48

5.4.3 オペレータ機能概略	48	5.9 考 察	89
5.4.4 信号の強度	49	5.10 結 論	91
5.4.5 解析手順	49	6. 結 論	91
5.5 標準オペレータ	49	6.1 総括的結論	91
5.5.1 オペレータ・タイプ21	49	6.2 今後の課題	94
5.5.2 オペレータ・タイプ22	50	7. 参考文献	95
5.5.3 オペレータ・タイプ23	50	8. 謝 辞	97
5.5.4 オペレータ・タイプ24	52	付録1 GO手法における標準オペレータ	97
5.5.5 オペレータ・タイプ25	52	付1.1 オペレータ・タイプ1	97
5.5.6 オペレータ・タイプ26	52	付1.2 オペレータ・タイプ2	97
5.5.7 オペレータ・タイプ27	53	付1.3 オペレータ・タイプ3	99
5.5.8 オペレータ・タイプ30	53	付1.4 オペレータ・タイプ5	99
5.5.9 オペレータ・タイプ35	53	付1.5 オペレータ・タイプ6	99
5.5.10 オペレータ・タイプ37	54	付1.6 オペレータ・タイプ7	99
5.5.11 オペレータ・タイプ38	54	付1.7 オペレータ・タイプ8	100
5.5.12 オペレータ・タイプ39	55	付1.8 オペレータ・タイプ9	100
5.6 解析手順の説明	55	付1.9 オペレータ・タイプ10	100
5.6.1 サンプル問題(1)	55	付1.10 オペレータ・タイプ11	100
(1) GO-FLOW チャートによる表現	55	付1.11 オペレータ・タイプ12	100
(2) 計算手順	56	付1.12 オペレータ・タイプ13	100
(3) GO手法による結果との比較	59	付1.13 オペレータ・タイプ14	101
5.6.2 サンプル問題(2)	59	付1.14 オペレータ・タイプ15	101
(1) GO-FLOW チャートによる表現	59	付1.15 オペレータ・タイプ16	101
(2) 計算手順	60	付1.16 オペレータ・タイプ17	102
5.6.3 計算方法まとめ	63	付録2 GO手法による解析例	102
5.7 解析実施例	63	付2.1 サンプル問題	102
5.7.1 原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系	64	付2.1.1 GOチャートによる表現	102
(1) 系の説明	64	付2.1.2 GO1ステップ	104
(2) GO-FLOW チャートによる表現	64	付2.1.3 GO2ステップ	104
(3) 解析結果	64	付2.1.4 GO3ステップ	104
5.7.2 沸騰水型原子炉非常用炉心冷却系	64	付2.1.5 解析結果	104
(1) 系の説明	64	付2.2 原子力船“むつ”非常用崩壊熱除去系	111
(2) GO-FLOW チャートによる表現	69	付2.2.1 GOチャートによる表現	111
(3) 解析結果	70	付2.2.2 解析結果	111
5.7.3 船用炉非常炉心注入系非常用電源系	73		
(1) 系の説明	73		
(2) 冗長系, ケース(1)	75		
(3) 待機冗長系, ケース(2)	76		
(4) 解析的な解法, ケース(2)	80		
5.7.4 加圧水型原子炉補助給水系	82		
(1) 系の説明	82		
(2) GO-FLOW チャートによる表現	84		
(3) 解析結果	87		
5.8 GO-FLOW 手法まとめ	87		

1. 序 論

1.1 歴史的背景

科学技術の進歩、産業の発展により、人類の生産活動が大幅に増大すると共に、人間の生活は各種の新規技術、大規模システムと深く関り合うようになってきた。

新規技術が受け入れられるためには、その有用性と共に安全性が確認される必要があるが、新規技術の影

響力がそれほど大きくない場合は、安全性に関する事前の考慮は厳密にはなされず、まず人間生活の一部に取り入れられ、その後の使用経験により安全性が判断され、新規技術の改良改善がなされてきた。その安全性の評価も主観的、決定論的な方法が主となっている。

しかし、原子力プラント、化学プラントに代表される様な大規模プラントにおいては、事故時の影響の大きさから、万が一にも、大事故を発生させるわけにはいかない状況にある。この様な大規模プラントの安全評価に対して、従来の方法にかわる、確率論的安全評価方法が注目され、有益な方法として広く応用されるようになってきている。

商用原子力プラントが稼働を開始して以来、原子炉の万一の事故の場合、どの様な事故展開があり得るかが問題となり、米国においてこの研究が実施され、WASH-740⁽¹⁾レポートとして刊行された。WASH-740レポートは、プラント事故の確率を解析的に考慮した最初の試みと言えるが、現実の原子炉の設置場所、周囲の人口密度等をどのように考慮するかの明確な考え方がなかった。

1960年代になり、F.R.Farmer⁽²⁾により、公衆のリスクを定量的に研究すべきだという指摘がなされた。彼は、事故の発生確率と事故過程及び影響を組み合わせる原子力プラントの安全性を評価すべきだと述べた。Farmer以後、信頼性解析手法が原子力プラントの安全性評価にとり有用であるかどうかの検討がなされ、フォールト・ツリーが定量的解析において必要であるとの認識が確立されてきた。

1972年に、M.I.T.ラスムッセン教授をチーフとしてReactor Safety Study (RSS)⁽³⁾の研究が開始され、1974年に草稿が、1975年に最終報告書が公表された。RSSは、原子力プラントの安全性を考える上での転換点であり、確率論的リスク評価の考え方を確立した研究であると言える。この報告書は、最初の実規模原子力プラントの本格的な安全性研究であり、そこでは、多数の安全解析手法が生み出され使用されている。

1979年になり、スリー・マイル島で原子炉事故が発生し、当初は、RSSの方法及び結論に疑念が抱かれた。しかし、後になり、RSSは小リーク事故の結果を予測していることが判明し、逆に確率論的リスク評価の有用性が以前以上に認識されるようになった。特に、Kemenyレポート⁽⁴⁾、Rogovinレポート⁽⁵⁾が確率論的解析方法の使用を推奨して以来、この方法は急速

に世界中へ広まっていった。⁽⁶⁾⁽⁷⁾1983年の時点で、米国において、既に22の原子力プラントの確率論的リスク評価が完了⁽⁸⁾しており、現在、我国においても、この方法の重要性が認識されてきている。

現在、従来からの確率論的リスク評価という名称に替り、単に最終事故リスクだけでなく、安全性を幅広く検討するという意味合いから、確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment)と呼ばれるようになってきている。

1.2 システム信頼性解析における問題点

一般に、工学的システムが大型化するに伴い、システム全体の信頼度は低下すると共に、万一の事故の時の人的損失、経済的損失は増大してくる。その損失を最小限とし、可能な限り安全なシステムを作るために系の安全評価が必要となってくる。

安全評価法としては、決定論的方法と確率論的方法がある。決定論的方法においては、事故時の安全防護系の応答を調べ安全確保がどの様に達成されているかを解析する。しかし、対象とする事故の選定においては、暗黙のうちに、その重要度(=発生確率×影響の大きさ)が考慮されている。一方、完璧な工学的システムというものは主張できないとの観点に立つと、確率論的安全評価の方法がとられる。

確率論的安全評価法は、有意なすべての事故を対象とし、その発生頻度、過程、影響を分析評価する方法である。

事故過程の評価とは、例えば、炉心溶融事故時の物理的過程の解析、放射性物質の移動、環境中への放出量の評価となる。

影響の評価とは、環境中へ放出された放射性物質が、人的、経済的に及ぼす影響を立地条件、気象条件等を考慮し評価することである。

事故の発生頻度の評価は、起因事象の発生頻度の評価と安全防護系の信頼度の評価から成り立っている。起因事象、例えば一次系配管の破裂、だけでは原子炉は危険な状態には至らない。通常は、起因事象が発生した場合、安全防護系が作動し、原子炉は冷態停止状態となるように設計されている。安全防護系が正常に作動しない場合に、原子炉が危険な状態となり、事故が発生する。この安全防護系の信頼度の解析にシステム信頼性解析が用いられる。

システム信頼性解析の実施手順⁽¹⁰⁾の概略は次の通りである。(1)系の定義、(2)系の論理モデル構築、(3)定

量的評価、(4)不確実さ解析。

「系の定義」とは、解析対象とする系を十分理解することである。

「論理モデルの構築」とは、解析対象の系を、解析可能なモデルに表現することで、信頼性解析の中で最も重要かつ解析者の資質に依存する度合いの高い部分である。それ故、この作業のために十分に標準化された手順マニュアルが整備されていることが望ましい。

このモデル化のために、RSSはイベント・ツリー、フォールト・ツリーを用いた。他にGO手法、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)、ブロック・ダイアグラム等の種々の手法⁽¹⁰⁾がある。

論理モデルの構築は重要な部分であるだけに、なお、以下に述べるような多くの問題点が存在する。

系に故障が発生した場合、現実の系では一般に機器の修理が実施される。この保修の考慮の有無により信頼性解析結果には大きな違いが出てくる。しかし、複雑な系における保修の効果の理論的取り扱いはあまりなされていない。また、機器の保修率は一定で、保修の実施も機器故障発生に依存し、保修相互では統計的に独立であると仮定されている。

機器の故障モード、状態については、正常であるか、故障状態であるかの二値として取り扱い、中間の状態は考慮していない。

大規模、複雑な系では、多数のサブ・システムについての解析を組み合わせる必要が出て来、各サブ・システムが同時には作動しない Phased Mission Problem⁽¹²⁾となる場合があらわれる。この時間依存性の取り扱いにおいては、通常、系の状態の変化の論理は既知である(決定論的に定まっている。)とし、機器の修理は実施されないと仮定して解析されている。

共通原因故障はシステム信頼性解析実施の際、考慮する必要のある重要な要因であるが、確立された解析方法が開発されているとは言い難い。直接的な取り扱い方法としては、RSSで実施されたように、フォールト・ツリー中に基本事象として記述する方法がある。しかし、共通原因故障は、その同定と発生確率の評価こそが問題となっている。

人的要因は信頼性解析結果に大きな影響を及ぼす要因と言える。人的過誤は運転中のみならず、設計、設置、保守、試験、製造段階において発生する可能性があり、非常に広い範囲にわたっている。また、個人の過誤でなく、組織全体、集団の過誤による誤った方針、指令も起り得る。このような人的過誤を適切に取

り入れたシステム信頼性解析方法の開発が望まれる。

更に、過誤ではなく意図的と言える人的要因にも注意を払う必要がある。例えば、サボタージュ、失敗の隠蔽、賄賂等による最善とは言えない人間の応答が考えられる。従来、このような人的要因は解析から除外されていた。

「定量的評価」においては、解析モデルに対応する定量的評価のための計算プログラムが必要である。現在まで、フォールト・ツリー解析を中心とする各種プログラム⁽¹¹⁾が開発利用されてきた。これらは、個々の目的にはすぐれた点があるが、必ずしも使い易いとは言えず、特に大規模システムを取り扱う場合は、大型計算機による膨大な計算を必要とする。

定量的評価のための別の問題点として、故障率データの欠除が指摘される。一般に、故障率は、平均的、一定値として扱われ、時間依存性は考慮されていない。更に、機器を取り巻く環境条件の影響についても十分には考慮されていない。共通原因故障の定量的データにも十分なものが存在せず、 β -factor法等の定量的評価法が理論的補強として開発されている。また、故障率についての十分なデータが収集される以前に機器の改良、設計変更が行われてしまうという問題も存在している。

「不確実さ解析」における不確実さは、データの不確実さと解析モデル・解析方法の不確実さに起因するものがある。

データの不確実さは、(1)故障率、保修率には完全なデータというものは存在しない、(2)解析対象の系特有の条件による故障率の値の偏り、(3)データ・ベースに存在しないような故障モードを取り扱う場合等から生じてくる。

解析モデルの不確実さは、(1)モデル自体の不十分さ、(2)解析における仮定が不適當である、(3)理論の適用の妥当性、等に起因するが、これらの要因による不確実さを定量的に評価する方法は存在しない。

不確実さ解析は、「モデルの構築」、「定量的評価」で上げた問題点とも密接に関連している。

今後、確率論的安全評価のより一層の普及のためには、上述のシステム信頼性解析における種々の問題点の解決が望まれる。それ故、システム信頼性解析法の機能向上、体系化、簡素化を目指した、既存解析方法の改良あるいは新しい解析方法の開発が要求されている状況にあると言える。

1.3 研究の概要

前節において述べた、システム信頼性解析における問題点の解決を目的として本研究は実施された。以下本論文各章の概要を述べることにする。

2. 船用非常用崩壊熱除去系の信頼性解析

原子力船“むつ”と原子力船“サバンナ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を実施し、相互の比較を行う。非常用崩壊熱除去系は、通信の崩壊熱除去方法が機能しなくなった場合に作動が要求される。そのため、多くの場合、原子力船に何らかの事故が発生した条件下における系の作動になると考えられる。それ故、通常状態下だけでなく、各種事故状態下における系の信頼度を求めることが重要となる。

本章においては、10種の船体事故を取り上げその各々についての信頼性解析を実施し、集中配置方式である“サバンナ”と分散配置方式である“むつ”の非常用崩壊熱除去系の優劣について論じる。

3. 故障原因、時間依存を考慮した機器故障モデル

各種事故状態下における系の信頼度を求めるためには、事故状態下における構成機器の故障確率の値が必要となってくる。第2章の解析においては、この値は工学的判断により推定したが、より系統的な値を得る方法が要求される。

本章において、機器の故障には必ず原因が存在するという考えを基とした機器故障モデルを提案する。また、この故障モデルを用いた、事故状態下における信頼性解析プログラムの説明及び解析実施例の紹介を行う。このプログラムにより、逆に、系の信頼度に重要な影響を及ぼす事故条件、つまり、系の弱点を見出すことができる。

4. 高速フォールト・ツリー解析プログラム

第2章、第3章の解析においては、いずれもフォールト・ツリー解析が解析の中心を占めている。フォールト・ツリーが比較的小型であればフォールト・ツリー解析は簡単であるが、対象とする系が実規模プラントとなり、フォールト・ツリーが大型になると解析は膨大なものとなる。特に不確実な解析や、第3章で示した解析プログラムで実施されている多数回のフォールト・ツリー解析の繰り返しが必要となる場合は、計算時間は急速に増大してしまう。

本章では、フォールト・ツリー解析を高速で実施するプログラムを開発した結果について、その計算原理、具体的計算方法、解析実施例について説明する。この計算プログラムにより、大型、高速計算機を用い

なくとも、フォールト・ツリー解析が手軽に実施できるようにになった。

5. GO-FLOW 手法

システム信頼性解析においては種としてフォールト・ツリーが用いられているが、頂上事象として系の特定の一つの事象しか選定できない等、解析において不都合な点がある。これを補う方法としてGO手法があり、原子力の分野への適用がなされるようになってきた。著者もGO手法に着目し、GO手法を用いた解析を実施してきたが、なお問題点の残る点が判明した。そこでGO手法を基本とし、その特徴を生かしたままGO手法における限界を克服するためGO-FLOW手法を開発した。

本章において、GO-FLOW手法の説明及び解析実施例を示し、GO-FLOW手法が原子力分野において有用な解析方法であることを示す。

6. 結 論

以上のシステム信頼性解析方法の有効性、問題点などを総括的に述べ、本研究の結論とする。

2. 船用非常用崩壊熱除去系の信頼性解析

2.1 緒 言

陸上原子力プラントと比較し、原子力船の設計においては、その安全防護系に特別の考慮を払う必要がある。なぜならば、原子力船は、陸上を遙か離れた海上を航行することがあり、その場合には外部からの支援がほとんど期待できない上、時により、荒天候に出合い厳しい環境条件に曝されることがあるからである。

万が一、原子力船に何らかの事故が発生した場合、原子炉のスクラムと、その後の崩壊熱の除去が原子炉事故を防ぐ必須の条件となる。原子力船サバンナ号には、非常用海水冷却系 (Emergency Sea Water Cooling System) が備えられており、他のすべての崩壊熱除去の手段が機能しなくなった場合に作動させるようになっている。

著者は、この系の信頼性解析を通常環境条件下において実施⁽¹³⁾したが、よく考えると、この系の動作が要求される場合、系は、ある種の厳しい環境条件下に置かれていると考えられる。例えば、高温、高湿度、衝撃力、振動、応力、等が考えられる。これらの環境条件下における系の信頼度は、通常環境条件下におけるよりも低下すると考えられる。それ故、種々の厳しい環境条件下における安全防護系の信頼性を解析する

ことが重要となってくる。

確率論的信頼性解析の実規模原子力プラントへの適用は、第一章にも述べたように、RSS⁽³⁾に始まる。RSS以後、多くの解析が原子力プラントに対し実施⁽⁶⁾、⁽⁷⁾、⁽⁸⁾されてきているが、これらの解析においては、厳しい環境条件の影響はあらわには取り扱われていない。船用原子炉の信頼性解析としては立川等⁽¹⁴⁾の研究があるが、原子力船の事故時の条件は解析において

考慮されていない。

本章における解析においては、原子力船“むつ”と原子力船“サバシナ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を、種々の厳しい環境条件下において実施する。解析方法の基本となる手法はフォールト・ツリー解析であり、各種環境条件下における機器の故障発生確率は文献データを基に工学的判断により推定した。

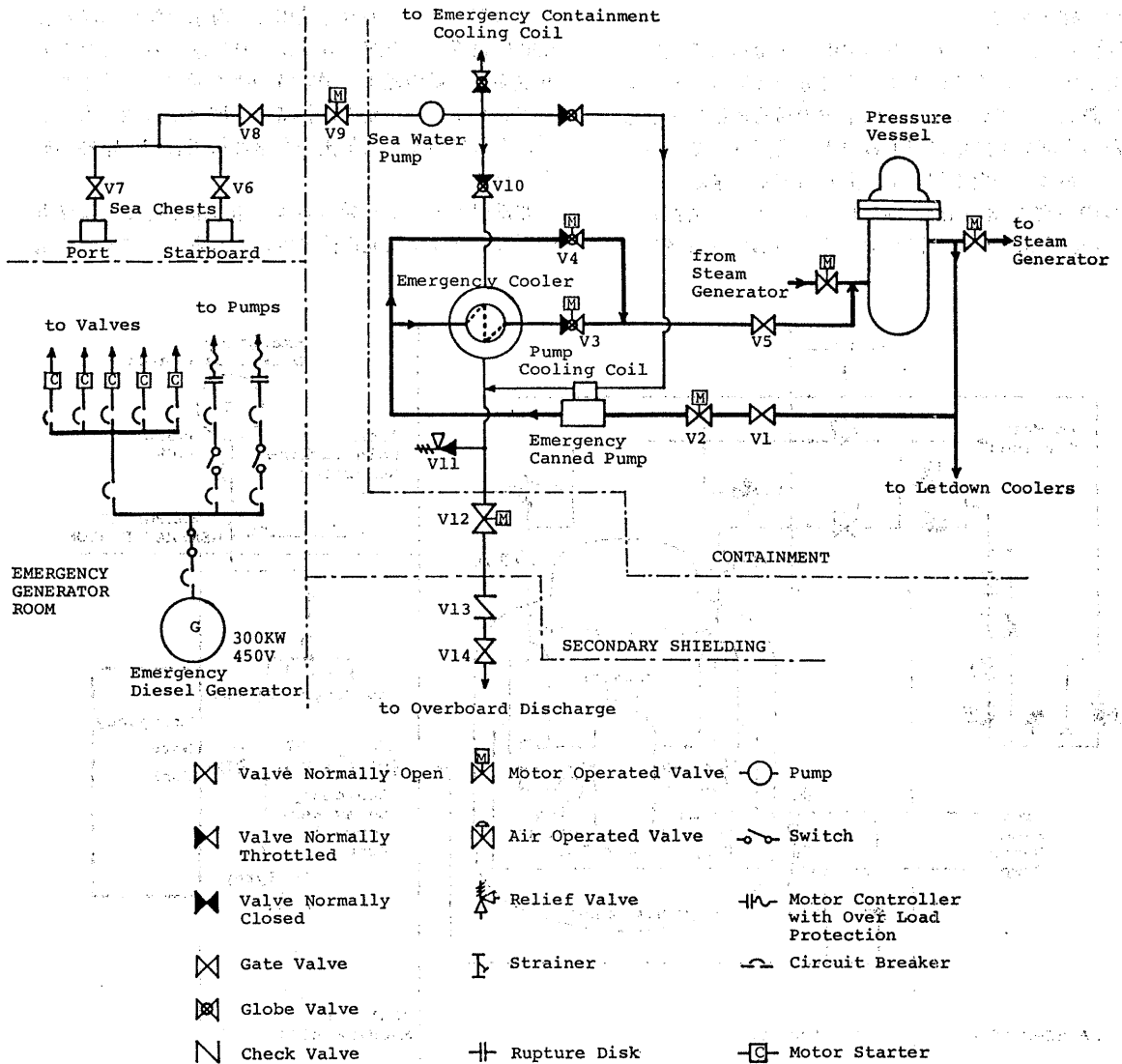


図2-1 原子力船サバシナ非常用海水冷却系

2.2 非常用崩壊熱除去系の機能及び構成

原子力船サバナ号には非常用海水冷却系 (Emergency Sea Water Cooling System) ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ が、原子力船“むつ”には非常用崩壊熱除去系 ⁽¹⁷⁾ が、非常の際の安全防護系の一つとして備えられている。これらの系の主要な機能は、通常の電源系が喪失し、崩壊熱を除去する他のすべての手段が機能しなくなった場合に炉心から崩壊熱を除去することにある。これにより、燃料及び燃料被覆管の過度な温度上昇を防ぎ、炉心の損傷、破壊を防ぐ。

図2-1に、サバナ号の非常用海水冷却系の主要部分を示す。この系を構成する大部分の機器は格納容器内に設置されている。また原子炉の通常運転に必要な機器の大部分も同様に格納容器内に設置されている。

この系は、一次冷却水系、海水冷却系、補給水系の三つの主要な循環系より成り立っている。図2-1では、補給水系、格納容器冷却コイルの部分は省略して

ある。

一次冷却水は、一次冷却材浄化系の冷却器上流から取り出され、非常用キャンド・ポンプによりポンプ・アップされ、非常用冷却器、制御弁類を通過後、原子炉圧力容器内へもどされる。海水冷却系は、海水あるいは純水を非常用海水ポンプにより循環させることができるようになっている。冷却水は、並列に設置された、非常用冷却器、格納容器冷却コイル、非常用キャンド・ポンプの冷却コイルへと供給される。非常の場合には冷却水として海水を使用し、海水は船の右舷及び左舷に設置された海水取水箱より取水する。これらの取水箱は、船の軽重量積載時の喫水船より十分下側に設置されており、船の傾斜時にも取水が可能であるようになっている。冷却後の海水は放出管から船外へ放出される。

非常用ディーゼル発電機は、船の最上部である操縦甲板にある非常用発電機室内に設置されている。主電

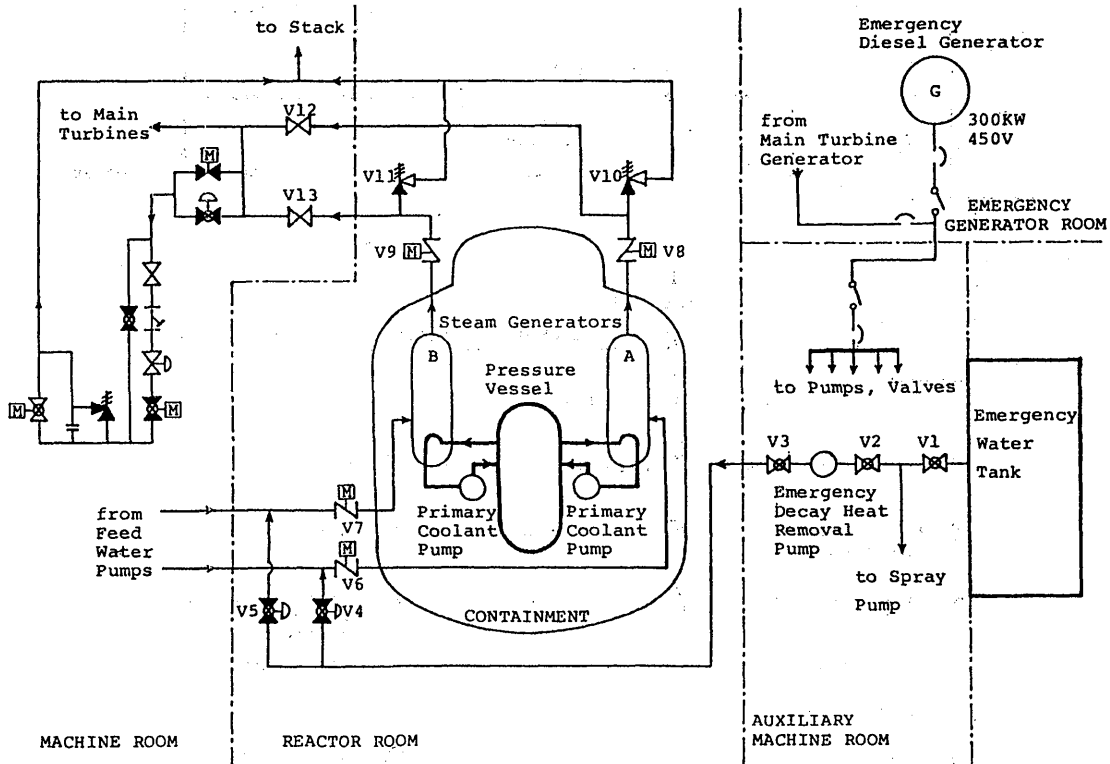


図2-2 原子力船むつ非常用崩壊熱除去系

源の電圧が380V以下に低下した場合に、自動制御により非常用発電機が起動させられる。それと共に、主制御盤あるいは非常用発電機室内の非常用スイッチ盤から手動により起動させることも可能である。ポンプ、弁類も非常用スイッチ盤から制御することが可能である。

図2-2に原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系を示す。サバンナ号の場合と異なり、構成機器は、格納容器、補機室、機械室、原子炉室、非常用発電機室等の複数の部屋に分散されて配置されている。

この系は、一次冷却水系と二次冷却水系の2つの主要な循環系より構成されている。一次冷却水系は、通常運転時に使用されている一次冷却水循環系をそのまま用いる。また、通常運転時の蒸気発生器を非常時の熱交換器として使用している。二次冷却水は、非常用水タンクの水を用いる。非常用水タンクからの水は、非常用崩壊熱除去ポンプを通して、蒸気発生器A、Bへ供給される。崩壊熱は単一の蒸気発生器だけでも有効に炉心から除去できる。蒸気発生器において、冷却水は、炉心からの熱により加熱され飽和蒸気となり放塔から船外へ放出される。

非常用ディーゼル発電機は船の最上部にある非常用発電機室に設置されている。主タービン及び補助発電機のどちらも機能しなくなった場合に、非常用発電機が自動的に起動される。それと共に、主制御盤あるいは非常用発電機室から手動により起動することも可能となっている。

2.3 解析方法

2.3.1 解析手順

本解析は以下の手順に従って実施した。

(1) Failure Mode and Effects Analysis 法 (FMEA)⁽¹⁸⁾により構成機器の考え得るあらゆる故障モードを列挙する。

(2) 系の望ましからぬ事象を定義する。これがフォールト・ツリーの頂上事象となる。

(3) FMEAで列挙した故障モードを基本事象として、フォールト・ツリーを作成する。このフォールト・ツリーにより、個々の機器の故障と系の機能との関係が明確となる。

(4) 通常運転条件下における基本事象発生確率を定める。

(5) 基本事象の中で低い発生確率を持つものを除外した単純化したフォールト・ツリーを作成する。

(6) RSSにおいて使用された計算プログラム SAMPLE⁽¹⁹⁾を用いて、頂上事象発生確率の分布を求める。この分布から、中央値、上限値、下限値を定める。

(7) 非常用崩壊熱除去系にとり影響の大きいと思われる事故条件を選定する。

(8) 上記各種条件下における基本事象の発生確率を推定する。

(9) 各種事故条件下における頂上事象発生確率分布を求め、中央値、上限値、下限値を定める。

(10) 解析結果を相互に比較、検討する。

2.3.2 解析実施における仮定

解析の実施にあたり、いくつかの仮定を置いた。扱う対象、解析条件が比較的複雑であるため、以下の仮定を導入し、解析の見通しを良くした。

(1) 同一室内に設置された機器は同一の環境条件に曝される。

(2) フォールト・ツリーの構造は、通常条件下においても、事故時の条件下においても変わらないものとする。事故の影響は基本事象の発生確率のみに及ぶものとする。

(3) 主循環系の自然循環により、崩壊熱は除去できるものとする。図2-1の非常用キャンド・ポンプ、図2-2の主冷却ポンプが停止しても崩壊熱除去は可能であることとなる。

(4) 保守間隔は100日とし、保守毎にすべての機器は検査され、正常状態に復帰させられる。

以上の仮定は、当然のことながら、“サバンナ”、“むつ”両方の解析において同等に適用する。

2.3.3 頂上事象

頂上事象を定義する際、明確に定義され、曖昧さ、多義性を持たない様になくなくてはならない。そうでないと、フォールト・ツリー作成の途中において頂上事象の解釈が変化し、統一のとれたフォールト・ツリーが作成ができなくなってしまう。

本解析においては、“サバンナ”、“むつ”両方に対して、頂上事象を次のように定義した。

頂上事象「起動指令があった後、10時間以内での崩壊熱除去の失敗。」

原子炉停止の10時間後には崩壊熱は通常運転時の出力の0.7%以下となる。それ故、この時点で全ての崩壊熱除去系が機能しなくなったとしても、圧力容器内及び蒸気発生器内の冷却水の熱容量だけで、かなりの長時間にわたり、炉心損傷を防ぐことができる。この期間に、系の修理その他の対策を実施することが可能

となる。万一、最悪の場合でも、格納容器内浸水弁を通して海水を格納容器内に導入し、崩壊熱のヒート・シンクとすることができる。以上の理由で、最低限必要な崩壊熱除去系の運転継続時間を10時間とした。

2.3.4 事故条件

原子力船は、非常に多様な事故に遭遇する可能性がある。たとえば、火災、爆発、衝突、浸水、座礁、転覆、等々、数えあげればきりが無いように思われる。更に、ある種の事故は、他の事故を引き起すことも考えられる。それ故、原子力船の事故シークエンスは大変複雑なものとなる。

本解析では、これら複雑な事故シークエンスを直接取り扱うことはせず、基本的、代表的と考えられる典型的な事故のみを取上げ、事故の伝播は考えないこととした。

表2-1には、本解析で取り上げた事故条件10種を示す。これらの事故は、すべて、安全防護系の機能がまったく役に立たなくなる程厳しい事故ではないものとする。

表2-1 原子力船船体事故条件

1	Explosion in Containment
2	Fire in Containment
3	Explosion in Emergency Generator Room
4	Fire in Emergency Generator Room
5	Explosion in Reactor Room
6	Fire in Reactor Room
7	Explosion in Auxiliary Machine Room
8	Fire in Auxiliary Machine Room
9	Impact
10	Flooding

火災、爆発事故は単一の部屋に限られたもののみとした。船舶の衝突事故には色々考えられるが、本解析においては、解析対象の安全防護系の機器には直接の被害は無いとした。そのかわり、全ての機器が同様の衝撃（加速度）を受けるとする。表2-1における事故条件9のImpactが衝突事故をあらわしている。浸水事故にも、事故原因とその進展の仕方により多くの場合が考えられるが、本解析においては、具体的には次の条件を持つ浸水事故を取り上げた。つまり、機械室は完全に浸水し、他の格納容器以外の部屋は部分的に浸水するとした。格納容器は通常の部屋に比較し十分強固に作られているため、浸水の影響はないものとし

た。

サブナ号には原子炉室、補機室が存在しないため、表2-1の事故条件5～8は、解析において、“サブナ”の場合は適用しなかった。

2.4 故障データ

フォールト・ツリーを定量的に解析するためには、基本事象の発生確率値を与えなくてはならない。RSSの附録Ⅲ“故障データ”⁽²⁰⁾には原子力プラント機器に対する幅広い故障データが収録されている。

ここでは、故障率は、一定の確定値ではなく、ランダムな変数として与えられており、故障率の確率分布を、対数正規分布で与えている。

$$f(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (2.1)$$

中央値 x_M とは、分布の中で中央に位置する値で次式で定義される。

$$\int_0^{x_M} f(x)dx = 0.5 \quad (2.2)$$

(2.1)式を(2.2)式に代入すると、 $x_M = x_\mu$ の関係が得られる。上限値(x_U)、下限値(x_L)は、それぞれ、95%限界値、5%限界値で定義されている。

$$\int_0^{x_U} f(x)dx = 0.95 \quad (2.3)$$

$$\int_0^{x_L} f(x)dx = 0.05 \quad (2.4)$$

(2.1)式を(2.3)、(2.4)式に代入し解くと、

$$\ln x_{U,L} = \ln x_\mu \pm 1.64\sigma \quad (2.5)$$

の関係が得られる。また、 x_U, x_L の広がりをエラー・ファクターによって表示する場合もある。エラー・ファクター(ϵ)は、 x_U, x_L の x_μ との比である。

$$\epsilon = \frac{x_U}{x_\mu} = \frac{x_\mu}{x_L} \quad (2.6)$$

通常運転条件下における基本事象の発生確率は、RSSの値をそのまま使用した。RSSに記載のない機器については、類似機器の故障率データを参考とした。表2-2に各基本事象に対して割り当てた故障率、故障確率の値を示す。それぞれ中央値、エラー・ファクターの値が与えてある。

各種事故条件下における系の作動失敗確率を求めるためには、事故時の環境下におかれた機器の故障確率の値が必要となってくる。現在の段階では、このよう

表2-2(a) 基本事象の故障率、故障確率 (サバンナ)

Basic Events		Number of Component	Mission Type	Failure Rates (Error Factor)	Failure Probabilities (Error Factor)
S1	Diesel Generator Fails to Start	1	Q_d	3×10^{-2} (3)	3×10^{-2} (3)
S2	Diesel Generator Fails to Run	1	λ_o	3×10^{-3} (10)	3×10^{-2} (10)
S3	Switch Fails to Operate	1	Q_d	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)
S4	Breakers Fail to Close	6	Q_d	1×10^{-3} (3)	6×10^{-3} (3)
S5	Electric Circuit Open	1	λ_o	3×10^{-6} (3)	3×10^{-5} (3)
S6	Manual Valves V1, V5 Fail to Remain Open	2	Q_d	1×10^{-4} (3)	2×10^{-4} (3)
S7	Motor Operated Valve V3 Fails to Operate	1	Q_d	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)
S8	Motor Operated Valve V3 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S9	Motor Operated Valve V2 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S10	Manual Valve V10 Fails to Open	1	Q_d	1×10^{-5} (3)	1×10^{-5} (3)
S11	Manual Valve V10 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S12	Emergency Cooler Plug	1	λ_o	1×10^{-9} (30)	1×10^{-8} (30)
S13	Emergency Cooler Rupture	1	λ_o	1×10^{-9} (30)	1×10^{-8} (30)
S14	Emergency Sea Water Pump Fails to Start	1	Q_d	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)
S15	Emergency Sea Water Pump Fails to Run	1	λ_o	3×10^{-5} (10)	3×10^{-4} (10)
S16	Relief Valve V11 Fails to Open	1	Q_d	1×10^{-5} (3)	1×10^{-5} (3)
S17	Motor Operated Valve V9 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S18	Motor Operated Valve V12 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S19	Manual Valve V8 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S20	Manual Valve V14 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S21	Failure in Check Valve V13 ; Plug	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
S22	Pipe (Secondary) Plug	5 sections	λ_o	1×10^{-10} (30)	5×10^{-9} (30)
S23	Pipe (Secondary) Rupture	5 sections	λ_s	1×10^{-10} (30)	6×10^{-7} (30)
S24	Pipe (Primary) Plug	5 sections	λ_o	1×10^{-11} (30)	5×10^{-10} (30)
S25	Pipe (Primary) Rupture	5 sections	λ_s	1×10^{-11} (30)	6×10^{-8} (30)

Q_d : Demand Failure Probability (/d) λ_s : Stand-by Failure Rate (/hr), Stand-by Time Duration = 1200 hours
 λ_o : Operating Failure Rate (/hr). Operating time = 10 hours

表2-2(b) 基本事象の故障率、故障確率 (むつ)

Basic Events		Number of Component	Mission Type	Failure Rates (Error Factor)	Failure Probabilities (Error Factor)
M1	Diesel Generator Fails to Start	1	Q_d	3×10^{-2} (3)	3×10^{-2} (3)
M2	Diesel Generator Fails to Run	1	λ_o	3×10^{-3} (10)	3×10^{-2} (10)
M3	Switches Fail to Operate	2	Q_d	1×10^{-3} (3)	2×10^{-3} (3)
M4	Breakers Fail to Close	2	Q_d	1×10^{-3} (3)	2×10^{-3} (3)
M5	Electric Circuit Open	1	λ_o	3×10^{-6} (3)	3×10^{-5} (3)
M6	Pipe (Primary) Rupture	2 sections	λ_s	1×10^{-11} (30)	2.4×10^{-8} (30)
M7	Emergency Tank Leak or Rupture	1	λ_s	1×10^{-10} (30)	1.2×10^{-7} (30)
M8	Pump Fails to Start	1	Q_d	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)
M9	Pump Fails to Run	1	λ_o	3×10^{-5} (10)	3×10^{-4} (10)
M10	Manual Valve V1 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M11	Manual Valve V2 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M12	Manual Valve V3 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M13	Pipe (Secondary) Rupture	6 sections	λ_s	1×10^{-10} (30)	7.2×10^{-7} (30)
M14	Pipe (Secondary) Plug	6 sections	λ_o	1×10^{-10} (30)	6×10^{-9} (30)
M15	Air Operated Valve V4 Fails to Operate	1	Q_d	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)
M16	Air Operated Valve V4 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M17	Motor Operated Valve V6 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M18	Motor Operated Valve V8 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)
M19	Relief Valve V10 Fails to Open	1	Q_d	1×10^{-5} (3)	1×10^{-5} (3)
M20	Relief Valve V11 Fails to Open	1	Q_d	1×10^{-5} (3)	1×10^{-5} (3)
M21	Pipe (Secondary) Rupture	3 sections	λ_s	1×10^{-10} (30)	3.6×10^{-7} (30)
M22	Pipe (secondary) Plug	3 sections	λ_o	1×10^{-10} (30)	3×10^{-9} (30)
M23	Manual Valve V12 Fails to Remain Open	1	Q_d	1×10^{-4} (3)	1×10^{-4} (3)

Q_d : Demand Failure Probability (/d)

λ_o : Operating Failure Rate (/hr), Operating Time = 10 hours

λ_s : Stand-by Failure Rate (/hr), Stand-by Time Duration = 1200 hours

な、事故条件下、厳しい環境条件下における故障データには十分なものがないため、本解析では、種々の文献データを参考とした推定値を用いることとする。

RSSは、ポンプとモータについて表2-3に示す様な各種環境条件下における故障率の値を与えている。これによると通常状態における故障率に比較し10~100倍の値となっている。

Green & Bourne⁽²¹⁾は更に詳細な各種条件下における故障率の値を与えている。表2-4は五種類の機器について、それらに加えられるストレス、荷重、電圧の多少により故障率がどの様になるかを示している。表2-5は、機器の置かれた条件により、通常条件下の故障率にどれだけの倍数(K_1 , K_2 , K_3)を乗ずれば良いかを示している。これによると船舶に設置された機器には2倍の大きさの故障率を与えれば良いこととなる。表中、Ratingとは機器に加えられる負荷量で100が標準値である。またTemperatureは機器が曝されている温度である。これらの表から数倍~100倍故障率の値が環境条件により増加することがわかる。

更に、RSS⁽²²⁾では、ポンプのフライホイール破損による配管破断の確率を、二、三の仮定を置いて推定し、 1.3×10^{-2} の値を得ている。本解析において、爆発事故の際の配管破裂の確率はこの値を参考として推定した。

表2-6には、このようにして推定した、各種事故条件下における機器の故障確率の値を示す。表中“*”印は、通常状態の場合の故障率と同一であることを意味する。基本事象は記号で示したので、詳しい記述は表2-2を参照してもらいたい。

表2-3 ホンプ及びモータの各種条件下における故障率 (RSS)

Basic Events	Failure Rates
Pump Fails to Run	
Normal Environment	3×10^{-5} /hr (10)
Extreme, Post Accident Environments, Inside Containment	1×10^{-3} /hr (10)
Post Accident, After Environmental Recovery	3×10^{-4} /hr (10)
Motor Fails to Run	
Normal Environment	1×10^{-5} /hr (10)
Extreme Environment	1×10^{-3} /hr (10)

表2-4 負荷による故障率の違い (Green & Bourne)

Components	Failure Rates (/hr)
Circuit Breakers	
General (less than 33kv)	2.0×10^{-6}
415v - 11kv	1.5×10^{-6}
33kv	3.0×10^{-6}
132kv	4.0×10^{-6}
275kv	7.0×10^{-6}
400kv	1.0×10^{-5}
Ball Bearing	
Heavy Duty	2.0×10^{-5}
Light Duty	1.0×10^{-5}
Shafts	
Heavily Stressed	2.0×10^{-7}
Lightly Stressed	2.0×10^{-8}
Springs	
Heavily Stressed	1.0×10^{-6}
Lightly Stressed	2.0×10^{-7}
Hoses	
Heavily Stressed	4.0×10^{-5}
Lightly Stressed	4.0×10^{-6}

表2-5 各種条件の故障率の値への影響 (Green & Bourne)

Overall environment	K_1	Rating	K_2	Temperature (°C)	K_3
Ideal static condition	0.1	140	4.0	0	1.0
Vibration free, controlled environment	0.5	120	2.0	20	1.0
General purpose, grand-based	1.0	100	1.0	40	1.3
Ship	2.0	80	0.6	60	2.0
Road	3.0	60	0.3	80	4.0
Rail	4.0	40	0.2	100	10.0
Air	10.0	20	0.1	120	30.0
Missile	100.0				

2.5 解析結果

図2-3(a),(b)に“むつ”の非常用崩壊熱除去系及び“サバンナ”の非常用海水冷却系に対するフォールト・ツリーを示す。これらのフォールト・ツリーはどちらも発生確率の低い基本事象を除外した単純化されたフォールト・ツリーである。フォールト・ツリーの基本事象は表2-2で使用した記号を用いて表してある。図2-3(b)の“むつ”のフォールト・ツリー中には、機械室内の配管系に関する部分が存在しないが、これは頂上事象への寄与が他の部分からの寄与に比較し小であるため省略されている結果である。

頂上事象発生確率分布をSAMPLEプログラムを用い求める際には、頂上事象を基本事象の多項式による数式で表現して、それを入力データとする。フォール

ト・ツリーが複雑となるとその作業は大変となるが、図2-3のフォールト・ツリーの場合は十分手計算で求める事が可能である。

図2-4(a),(b)に通常運転条件下における頂上事象の確率分布を示す。両分布とも互にほぼ似た分布を示している。中央値、上限値、下限値はそれぞれ、“むつ”の場合は、 7.7×10^{-2} 、 3.5×10^{-1} 、 2.9×10^{-2} 、“サバンナ”の場合は、 8.3×10^{-2} 、 3.3×10^{-1} 、 3.3×10^{-2} と求まった。

各種事故条件下における頂上事象の確率分布も同様にSAMPLEプログラムにより得られる。確率分布の図は省略するが、図2-5に各種事故条件下における頂上事象の中央値(○印)、90%信頼区間(横線)を示す。それぞれの事故条件は図中に記述してある。

表2-6(a) 各船体事故条件下での基本事象発生確率(サバンナ)

Basic Events	Accident Conditions					
	Explosion in Containment	Fire in Containment	Explosion in Emergency Generator Room	Fire in Emergency Generator Room	Impact	Flooding
S1	*	*	6×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (3)
S2	*	*	6×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (10)	4×10^{-2} (10)	4×10^{-2} (10)
S3	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	3×10^{-3} (3)	3×10^{-3} (3)
S4	*	*	6×10^{-2} (10)	1.8×10^{-2} (3)	1.8×10^{-2} (3)	1.8×10^{-2} (3)
S5	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	*	*
S6	2×10^{-3} (3)	2×10^{-3} (3)	*	*	*	*
S7	1×10^{-2} (3)	1×10^{-2} (3)	*	*	3×10^{-3} (3)	*
S8	*	1×10^{-3} (3)	*	*	3×10^{-4} (3)	*
S9	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	3×10^{-4} (3)	*
S10	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-4} (3)	*
S11	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	*	*
S12	*	*	*	*	*	*
S13	1.2×10^{-4} (30)	1.2×10^{-5} (30)	*	*	1.2×10^{-5} (30)	*
S14	1×10^{-2} (10)	1×10^{-2} (3)	*	*	1×10^{-3} (3)	*
S15	3×10^{-3} (10)	1×10^{-2} (10)	*	*	*	*
S16	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-4} (3)	*
S17	*	*	*	*	3×10^{-4} (3)	*
S18	*	*	*	*	3×10^{-4} (3)	*
S19	*	*	*	*	*	*
S20	*	*	*	*	*	*
S21	*	*	*	*	*	*
S22	*	*	*	*	*	*
S23	5×10^{-2} (10)	6×10^{-5} (30)	*	*	6×10^{-4} (30)	*
S24	*	*	*	*	*	*
S25	5×10^{-2} (10)	6×10^{-6} (30)	*	*	6×10^{-6} (30)	*

表2-6(b) 各船体事故条件下での基本事象発生確率 (むつ)

Basic Events	Accident Conditions									
	Explosion in Containment	Fire in Containment	Explosion in Emergency Generator Room	Fire in Emergency Generator Room	Explosion in Reactor Room	Fire in Reactor Room	Explosion in Auxiliary Machine Room	Fire in Auxiliary Machine Room	Impact	Flooding
M1	*	*	6×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (3)	*	*	*	*	4×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (3)
M2	*	*	6×10^{-2} (3)	4×10^{-2} (10)	*	*	*	*	4×10^{-2} (10)	4×10^{-2} (10)
M3	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	6×10^{-3} (3)	6×10^{-3} (3)
M4	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	3×10^{-3} (3)	6×10^{-3} (3)
M5	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-2} (10)	3×10^{-3} (3)	*	*
M6	2×10^{-2} (10)	2.4×10^{-6} (30)	*	*	*	*	*	*	2.4×10^{-6} (30)	*
M7	*	*	*	*	*	*	*	*	1.2×10^{-5} (30)	*
M8	*	*	*	*	*	*	1×10^{-2} (10)	1×10^{-2} (3)	1×10^{-2} (3)	1×10^{-2} (3)
M9	*	*	*	*	*	*	3×10^{-3} (10)	1×10^{-2} (10)	*	3×10^{-3} (10)
M10	*	*	*	*	*	*	1×10^{-3} (10)	1×10^{-3} (3)	*	*
M11	*	*	*	*	*	*	1×10^{-3} (10)	1×10^{-3} (3)	*	*
M12	*	*	*	*	*	*	1×10^{-3} (10)	1×10^{-3} (3)	*	*
M13	*	*	*	*	2×10^{-2} (10)	2.4×10^{-5} (10)	4×10^{-2} (10)	4.8×10^{-5} (30)	7.2×10^{-4} (30)	*
M14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
M15	*	*	*	*	1×10^{-2} (3)	1×10^{-2} (3)	*	*	3×10^{-3} (3)	*
M16	*	*	*	*	*	1×10^{-3} (3)	*	*	3×10^{-4} (3)	*
M17	*	*	*	*	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	3×10^{-4} (3)	*
M18	*	*	*	*	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	3×10^{-4} (3)	*
M19	*	*	*	*	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-4} (3)	*
M20	*	*	*	*	1×10^{-3} (3)	1×10^{-3} (3)	*	*	1×10^{-4} (3)	*
M21	3×10^{-2} (10)	3.6×10^{-5} (30)	*	*	3×10^{-2} (10)	3.6×10^{-5} (30)	*	*	3.6×10^{-4} (30)	*
M22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
M23	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

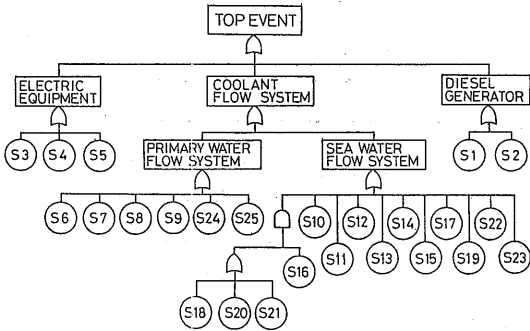


図2-3(a) 簡易化されたフォールト・ツリー (原子力船サバンナ)

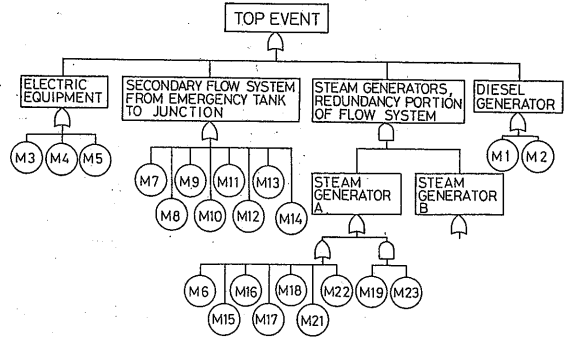


図2-3(b) 簡易化されたフォールト・ツリー (原子力船むつ)

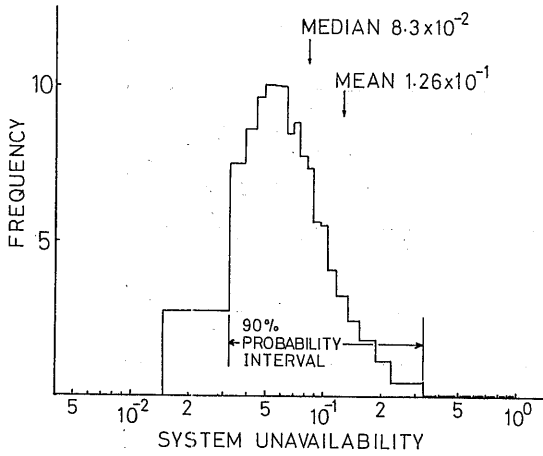


図2-4(a) 頂上事象発生確率分布 (原子力船サバンナ)

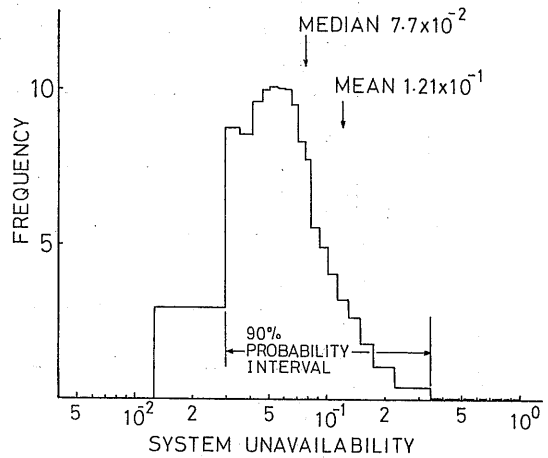


表2-4(b) 頂上事象発生確率分布 (原子力船むつ)

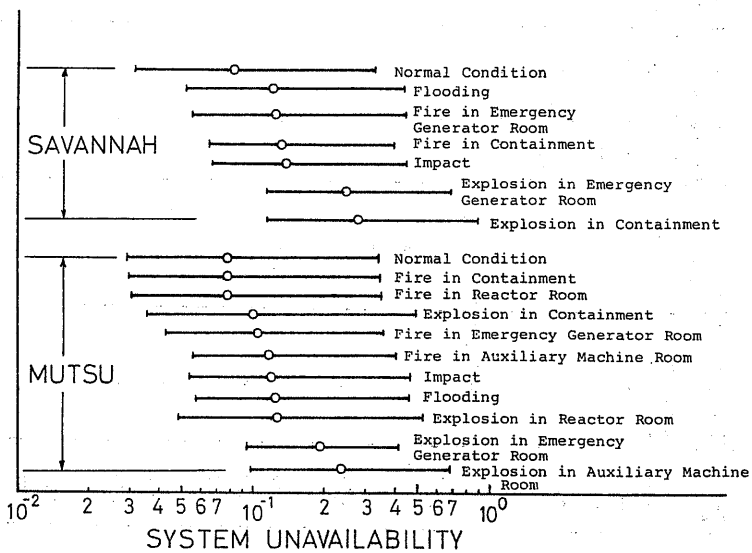


図2-5 開設結果；各種事故条件下における頂上事象発生確率

2.6 考 察

通常運転条件下における頂上事象発生確率の中央値は、“むつ”の方が“サバンナ”よりわずかに小さい値を示している。これは、“むつ”の非常用崩壊熱除去系の熱交換の部分が、蒸気発生器A,Bの二台を用い、冗長系となっているためである。

各種事故条件下における頂上事象発生確率の値の中で最大の値を示しているのは、“サバンナ”の“格納容器内の爆発”である。これに対して、“むつ”の“格納容器内の爆発”の条件下における値は、“サバンナ”の場合の約1/3の値を示している。この差が出てくる理由は、“サバンナ”においては、系の大部分の機器が格納容器内に設置されているが、“むつ”においては、種として、格納容器、原子炉室、補機室の三室に分散して設置されているためである。“むつ”の“原子炉室内の爆発”、及び“補機失内の爆発”の条件下における頂上事象発生確率も“サバンナ”の“格納容器内の爆発”の条件下における値と比較して小である。これらの結果から、事故の発生が一室に限定されている場合は、安全防護系の分散配置は炉心冷却にとり重要な要因であると言える。

系の分配配置の効果は、火災事故の場合にも見られる。“むつ”の“格納容器内の火災”、“補機室内の火災”、“原子炉室内の火災”の条件下における頂上事象発生確率はいずれも、“サバンナ”の“格納容器内の火災”の条件下における値より小であるという結果が出ている。

“むつ”の補機室内には、ポンプ、スイッチ、ブレーカー、2次側配管といった故障確率が事故条件に依存し大きく変化し、特に爆発事故時において大きな値を示す機器が設置されている。“補機室内の爆発”の条件下においては、これらの機器の故障確率が頂上事象発生確率へ大きく寄与する。それ故、この事故条件では分配配置の効果はあまり見られず、“サバンナ”の“格納容器内の爆発”の条件下における頂上事象発生確率に近い値を示している。同様のことが“むつ”の“補機室内の火災”事故条件についても見られる。

“むつ”の非常用発電機室内には、爆発事故の際に大きな故障確率を示す機器が五個（非常用発電機、スイッチ2個、ブレーカー、電気配線）設置されている。これに対し、“サバンナ”の非常用発電機室内には、同様の機器が九個（非常用発電機、スイッチ、ブレーカー6個、電気配線）設置されている。これらの機器の数の差により“むつ”と“サバンナ”の“非常

用発電機室内の爆発”条件下における頂上事象発生確率の違いが生じている。同様の事が、“非常用発電機室内の火災”事故条件においても見られる。

“衝撃”の事故条件下では、系のすべての機器が同様な衝撃力を受ける。それ故、分配配置の効果はこの場合見られない。“むつ”及び“サバンナ”の“衝撃”事故条件下における頂上事象発生確率の値は相互に近い値を示している。

“浸水”事故条件下においては、“サバンナ”の方が“むつ”に比較し、小さい頂上事象発生確率を示している。これは、“サバンナ”の場合、系の大部分の機器が格納容器内に設置されており、本解析での浸水事故に対しては、“サバンナ”の系の方がより良く保護されているためである。

安全防護系の信頼度は、環境条件の影響を受けることが見られる。今の場合、環境条件は各種船体事故により引き起された状態であり、安全防護系の総合的な信頼度を考えた場合、外部事象である船体事故の発生確率とそれぞれの条件下における系の信頼度の積が問題となってくる。“むつ”及び“サバンナ”各々の外部事象の発生確率は、主航路の条件、母港の位置、船舶の用途等、固有の条件に依存し同一の値をあてはめることはできない。それ故、各々のシステムには、それぞれの固有の条件に適したシステム構成があり、単純に分散配置、集中配置の優劣を論ずることは難しい。

しかしながら、環境条件の影響により系の信頼度が変わってくることから、本章で示したように安全防護系の有効性の評価のためには、通常運転条件下だけでなく各種事故条件下における作動確率を求め、検討する必要があると言える。

2.7 結 論

原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系及び、原子力船“サバンナ”の非常用海水冷却系の各種船体事故条件下における信頼性解析の手順を示し、解析を実施した。

通常運転条件下においては、両系はほぼ同様の信頼度を示す結果が得られた。また、系の信頼度は、大きな故障確率を持つ機器により、主として支配されている。

種々の事故条件下における両系の信頼性解析の結果の比較より、系の信頼度は、定期保守、試験間隔、修理に要する時間とともに、系の構成（たとえば、分散配置であるか集中配置であるか）、系の置かれた環境

条件にも依存していることがわかる。

以上のことから、原子力船の安全防護系のような系の有効性の評価のためには、各種事故条件下における系の信頼性解析が必要であると言える。

3. 故障原因，時間依存を考慮した
機器故障モデル

3.1 緒 言

第二章では，各種環境条件を考慮に入れた信頼性解析の必要性について論じた⁽²³⁾が，その解析実施の際，各種環境条件下における機器の故障率はデータの不足から工学的判断により推定せざるを得なかった。

本章においては，故障率の大きさに影響を及ぼす種々の要因を整理し，種々の環境条件下における故障率の推定に一貫性を持たせると共に，今後の故障データの収集方法の参考となるように，故障原因，時間依存を考慮した機器故障モデル⁽²⁴⁾を提唱する。この故障モデルを応用した，共通原因故障，二次的故障を取り扱う方法も考えられる。

最初，RSS⁽²²⁾において，共通原因故障の重要性が指摘され，その評価のために Bounding Technique という比較的原始的な方法が用いられた。より現実的な共通原因故障の評価のために，Fleming⁽²⁵⁾は β -factor 法を導入し，HTGR のリスク評価研究において使用した。RSS は，また，厳しい環境条件の影響についても論じている。その後，この方面の数多くの研究^(26,27,28)がなされているが，現在のところ，決め手となる方法は存在しない状況にある。

本章で提唱する故障モデルにおいては，故障率は，故障原因の種類，原因の程度，原因の作用した時間あるいは回数，および故障モードに依存した，条件付故障率として取り扱われている。共通原因故障，二次的故障，厳しい環境条件下での故障は，特定の条件下における統計的に独立な故障として取り扱えるという考えについても論じる。また，この考え方に基く解析プログラムについて紹介し，あわせてその解析実施例も示す。

3.2 基本的考え方

原子力プラント機器についての数多くの故障データが通常の運転条件下において集められている。これらの故障率の値は一定値と考えられており，故障原因についてはあらわには考慮されていない。この一定値の

故障率はシステム信頼性解析において従来から実用的な値として用いられてきた。しかし，故障率が一定ということは，機器は故障する可能性を常に持っているということであり，新しい機器の設置直後，あるいは修理完了直後においても故障発生があり得るということである。

機器の故障というものは，厳密な意味では，何らかの原因により引き起され，原因が存在しない場合は故障も発生しない。それ故，故障率一定と考えている限り，厳しい環境条件下における故障，共通原因故障，二次的故障の取り扱いが困難となる。

以上の考えから，著者は，故障率の値が一定ではなく，原因の種類，原因の程度，原因が作用する時間あるいは回数，及び故障モードの関数となっている故障モデルを提唱する。

この関係を式で表現すると，

$$\text{故障率} = F(C, S, t, M) \tag{3.1}$$

となる。ここで，C, S, t, M はそれぞれ，原因の種類，原因の程度，原因が作用する時間あるいは回数，故障モードをあらわす。デマンド当りの故障確率も同様の式で表現され得る。

3.3 故障原因の分類

機器に故障をもたらす原因としては，具体的には，多種多様なものが考えられるうえに，機器によっても影響する原因は異なってくる。これら多様な原因を取り扱うため，できるだけ基本的な性質に着目して考え図3-1に示す20種類の基本的原因を選び出した。これらの原因は互に重複することのないよう，また一般性

振動 力 応力 湿度 湿粉 腐食(酸) 酸化 化学反応 伝導性物質 放射線	連続的に作用 する原因 C = 1	物理的原因
衝撃力 過電圧 過電流	衝撃的に作用 する原因	非物理的原因
調整 設備 保守 試験方法 操作 製造業者	C = 0	

図3-1 基本的故障原因

を持たせ、具体的原因が、これらのどれかの原因で表されるように選定した。

これらの原因は、作用の仕方により二種類に大別できる。

一つは、連続的に作用する原因であり機器に対し故障原因が作用する場合、連続的な時間長さを必要とするものである。本章においては、これを $C=1$ で表現する。

他方は、衝撃的に作用する原因であり、故障原因が機器に作用する場合、瞬間あるいは非常に短い時間間隔のうちに作用し、一定の長さの時間経過を必要としないような原因である。本章においては、これを $C=0$ で表現する。

また、他の見地からは、物理的な原因と非物理的な原因に分類できるが、本故障モデルにおいては、この分類は特に意識する必要はない。

連続的な故障原因の場合、(3.1)式における t は原因が作用した時間長さとなり、衝撃的な原因の場合、 t は故障を観測している時刻となる。

3.4 原因の程度

一つの故障モードに対し、図3-1 に示したような多くの故障原因が考えられる。単一の故障原因を取り上げた時、機器の故障率に及ぼす影響は、その原因の程度(大きさ)に依存している。原因の程度は、原因の種類により、いろいろな単位で表現される。例えば、 kg/cm^2 (圧力)、 $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{h}^2$ (衝撃)、 pH (酸)、 V (電圧)、 A (電流) 等である。

これらの原因の程度を簡単に表現し、取り扱いを容易とするため、通常の運転条件 ($S=1$) から考え得る最も厳しい条件 ($S=5$) までの五段階に階層化して取り扱うこととした。

$S=1$ とは、ある特定の原因に着目した時、機器が通常の運転条件下に置かれていることを意味している。これに対し、 $S=5$ とは、機器が最も厳しい条件下に置かれていることを意味している。

通常の運転条件下では、連続的な故障原因のみ存在し、衝撃的な故障原因は存在しないと考える。それ故、

$$F(C=0, S=1, t, M)=0.0 \quad (3.2)$$

が常に成立する。

3.5 故障モードと故障原因

信頼性理論においては、故障率あるいは確率は、デ

マンド時の故障確率 (Demand Probability)、動作中の故障率 (Operating failure rate)、待機中の故障率 (Stand-by failure rate) の三種類に分類されている。これらの区別は、故障モードの違いから出てくる。それ故、故障モードはこの三種類の故障率/確率に基づいて分類することができる。ここでは、故障モードを、デマンド時の故障 ($M=0$)、運転中の故障 ($M=1$)、待機中の故障 ($M=2$) の三種類に分類することとする。

3.3節で故障原因を2種類に分類した。従って故障モードと故障原因の組み合わせに対し、故障発生の機構が以下のように考えられる。

$C=0, M=0$ の組み合わせの場合、衝撃的な故障原因が作用した時点で、機器の一定割合が故障状態となる。デマンド時に、この故障状態の機器は動作開始に失敗する。故障原因が作用しても故障状態にならなかった機器はデマンドにより動作を正常に開始する。

結局、この衝撃的な原因が作用した時点で、デマンド時の故障確率がステップ状に増大し、更に別の原因が作用しない限り一定値を保つこととなる。

$C=0, M=1, 2$ の組み合わせの場合、故障原因が作用した時点で機器の一定割合に潜在的な故障が発生し、その後の機器の動作、待機中に実際の故障に到ると考える。

$C=1$ の場合は、すべての型の故障モードに対して、故障原因が作用している間中、機器の故障率/確率が増大し続けると考える。

3.6 故障確率

システムの信頼性解析実施のためには、機器の故障確率の値が必要となってくる。この節においては、故障確率を与える式を求める。

故障確率は、故障率 F 、運転時間 t_o 、待機時間 t_s により決まる。解析を簡単にするために、本論では、 t_o, t_s は一定値と仮定し、図3-2 に示すような関係に

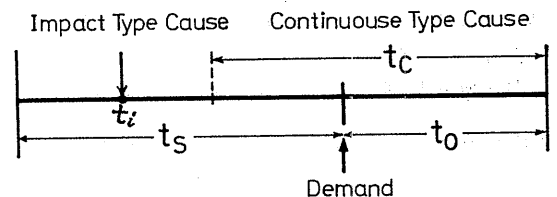


図3-2 故障原因の作用時刻と機器の運転時間との関係

あるとする。一定待機時間の後に起動指令（デマンド）があり、機器が動作を開始するとする。衝撃的な故障原因は、待機中の時刻 t_i において作用し、連続的な故障原因は、待機中に作用が開始し、運転終了時まで続くとする。

$C=0, M=0$ の場合、故障確率を次式で定義する。

$$\text{故障確率} = 1.0 - \exp\{-f(C=0, S>1, t, M)\} \quad (3.3)$$

この式で、 f は、 C, S, t, M の関数であり、無次元量である。この式は、 f の値によらず、必ず故障確率は 1.0 以下になる形をしている。また、後に出てくる $C=1, M=0$ の場合の故障確率 (3.9) 式と同じ形をしている。 f の値が小の場合は、故障確率は近似的に f となり、 f がデマンド時の故障確率そのものとなる。

もし、故障原因が複数回作用する場合は、次式により故障確率を与える式を定義する。

$$\text{故障確率} = 1.0 - \exp\left\{-\sum_i f_i(C=0, S>1, t, M)\right\} \quad (3.4)$$

$C=0, M=1$ or 2 の場合、衝撃的な故障原因の作用により機器の一定割合が潜在的な損傷を受ける。原因の作用の結果すぐ故障するのではなく、一定の故障率 λ_i を持つに至る。潜在的な損傷を受けた機器の割合は $1.0 - \exp\{-f(C=0, S>1, t, M)\}$ で与えられるとする。この式は、(3.3) 式と同じ形をしている。

潜在的な損傷を受けた機器は当面動作可能であるが、正常機器の割合 $N(t)$ は次の式により減少していく。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda_i N(t) \quad (3.5)$$

λ_i は潜在的な損傷を与えられた機器の故障率で、原因 (C)、原因の程度 (S)、故障モード (M) により決まる量である。(3.5) 式より、潜在的な損傷を受けた機器の故障確率は

$$1.0 - \exp(-\lambda_i t) \quad (t_s + t_o)$$

となる。 t は故障原因が作用してから後の経過時間 ($M=2$ の場合) か、動作が開始してから時間 ($M=1$ の場合) である。

要求動作終了時 ($t_s + t_o$) における故障確率は

$$\text{故障確率} = \{1.0 - \exp(-f(C=0, S>1, t_o + t_s, M))\} \times \{1.0 - \exp(-\lambda_i t)\} \quad (3.6)$$

となる。ここで、 $M=1$ の場合は $t=t_o$ 、 $M=2$ の場合は $t=t_s + t_o - t_i$ となる。

(3.6) 式は以下の状況を表している。

故障率 λ_i が大きな値を持っている場合は、故障原因が作用した後、機器の一定割合にまもなく故障が発生し、故障確率は $C=0, M=0$ の場合の (3.3) 式と同一の形の式で与えられる。

一方、故障率 λ_i が小の場合は、故障原因が作用した直後は機器はほぼ正常に機能し、時間経過と共に、故障が発生していく。その際の上限値は

$$1.0 - \exp(-f(C=0, S>1, t, M))$$

で与えられている。関数 f は無次元量であり、 λ_i の次元は $[1/h]$ である。

$C=1$ (連続的に作用) の故障原因が作用した場合、故障率/確率は通常、原因が作用している間 (t_c) 増加し続ける。通常運転状態においては、 $C=1$ の故障原因が $S=1$ の程度で常に存在すると考える。それ故、もし $S=1$ の原因が何らの効果も及ぼさない場合は、故障率 F の値は零となる。

$$F(C=1, S=1, t, M) = 0.0 \quad (3.7)$$

$S>1$ の故障原因が作用すると、機器の故障率は通常運転状態より大となる。この故障率を通常運転状態下における値と増加分との和と考える。

$$\text{故障率} = F(C=1, S=1, t, M) + F(C=1, S>1, t, M) \quad (3.8)$$

(3.8) 式は基本的な考え方を示した式である。関数 F の中の t は、 $C=1$ の場合、故障原因が作用した時間経過量を表わす。デマンド時の故障確率も同様の式で表現される。

ここで、 $C=1, M=0$ の場合について、故障確率を求めてみる。 $S=1$ の故障原因は最初から作用しており、 $S>1$ の故障原因は、図 3-2 に示すよう、待機中の途中から作用を開始する。それ故、デマンド時における故障確率は、

$$\text{故障確率} = 1.0 - \exp\{-f(C=1, S=1, t_s, M=0) - f(C=1, S>1, t_c - t_o, M=0)\} \quad (3.9)$$

となる。ここで f は、 C, S, t, M の関数であり、もし $f \ll 1$ の場合は、(3.9) 式は

$$\text{故障確率} = f(C=1, S=1, t_s, M=0) + f(C=1, S>1, t_c - t_o, M=0) \quad (3.10)$$

となる。この場合 f そのものがデマンド時の故障確

率となる。 f は無次元量である。

故障確率を与える式として、(3.9)式の形を用いた理由を、ここで少し述べておく。

故障率/故障確率は t の関数であると仮定した。それ故、 f も t の関数となる。もし、 f の関数形として t^α の様な単純な形を仮定すると、 t の増加と共に、 f の値も大きくなり、1.0より大きくなる場合も出てくる。この場合でも、(3.9)式の形をしていれば、故障確率は必ず1.0以下となる。これが、(3.9)式を故障確率を与える式として選んだ理由である。

$C=1, M=1$ の場合、機器の故障は、動作の開始と共に始まる。正常な機器の割合 $N(t)$ は次式で与えられる。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -(f(C=1, S=1, t+t_s, M=1) + f(C=1, S>1, t+t_c-t_o, M=1)) \cdot N(t) \quad (3.11)$$

この式で f は故障率であり、 F と同一である。 t は動作開始時からの時間である。(3.11)式を積分すると、

$$N(t) = N(0) \exp \left\{ - \int_0^t (f(C=1, S=1, t+t_s, M=1) + f(C=1, S>1, t+t_c-t_o, M=1)) dt \right\} \quad (3.12)$$

となる。ここで $f(C=1, S, t \leq 0, M) = 0.0$ と定義すると (3.12)式は、故障原因の作用開始が機器の動作開始以後になった場合でもそのまま拡張して適用できる。

(3.12)式から、要求動作終了時における故障確率は、

$$\text{故障確率} = 1.0 - \exp \left\{ - \int_0^{t_o} f(C=1, S=1, t+t_s, M=1) dt - \int_0^{t_o} f(C=1, S>1, t+t_c-t_o, M=1) dt \right\} \quad (3.13)$$

となる。 f の値が小の場合は、近似形として

$$\text{故障確率} = \int_0^{t_o} f(C=1, S=1, t+t_s, M=1) dt + \int_0^{t_o} f(C=1, S>1, t+t_c-t_o, M=1) dt \quad (3.14)$$

が得られる。 f の次元は上式より $[1/h]$ であることがわかる。

$C=1, M=2$ の場合、要求動作終了時における故障確率は、

$$\text{故障確率} = 1.0 - \exp \left\{ - \int_0^{t_s+t_o} f(C=1, S=1, t, M=2) dt - \int_0^{t_c} f(C=1, S>1, t, M=2) dt \right\} \quad (3.15)$$

となる。(3.15)式は (3.13)式と同様の方法で得られる。 $f \ll 1$ の場合の近似形は

$$\text{故障率} = \int_0^{t_s+t_o} f(C=1, S=1, t, M=2) dt + \int_0^{t_c} f(C=1, S>1, t, M=2) dt \quad (3.16)$$

となる。 f の次元も同じく $[1/h]$ である。

以上の結果をまとめて、表3-1に示す。

今、ここで、関数 f の時間依存の部分が t^α の形をしていると仮定してみる。

$$f(C=1, S, t, M) = g(C=1, S, M) \times t^\alpha \quad (3.17)$$

$g(C=1, S, M)$ は関数 f 中の時間に依存しない部分である。(3.17)式を用いて計算を実行すると、 $C=1$ の場合の故障確率を与える式は、表3-2に示したようになる。

ある故障モードに対して、複数の故障原因が存在する。もし、二個以上の故障原因が機器に作用した場合、故障率はこれらの故障原因すべてを考慮して決定しなくてはならない。しかし、いままでの式であらわれた関数 f の次元は、無次元の場合と $[1/h]$ の場合があった。それ故、単純に関数 f の和で故障率を定義することは不可能である。そこで、故障原因の複合効果は故障確率で考えることとする。

故障原因が複数個存在する場合の故障確率の値は、故障原因の種類、組み合わせにより、それぞれの特色が出てくる。例えば、全体の故障確率の値が、各々の故障原因が単独で存在する場合の故障確率の単純な和より大きな値を示す場合がある。もし、応力と腐食が両方存在する場合には、配管には応力腐食割れが発生し、その発生率は、応力のみあるいは腐食のみが存在する場合よりはるかに大きな値を示すと考えられる。他の極端な例としては、全体の故障率が、多数存在する故障原因による故障率の中の最大の値でほぼ決定される場合もあるであろう。

本故障モデルにおいては、複数の故障原因が存在する場合の全故障確率は、各々の故障確率の値のプール代数和で近似することとする。すなわち、

$$\text{全故障確率} = \bigcup_i (\text{故障確率})_{c_i} \quad (3.18)$$

ここで、 $(\text{故障確率})_{c_i}$ は、故障原因 C_i による故障確率の値である。

表3-1 故障確率を与える式

Cause Type C	Failure Mode Type M	Failure Probability	Approximate Form	Dimension of Function f
0	0	$1.0 - \exp(-f(C, S>1, t_s, M))$	$f(C, S>1, t_s, M)$	[-]
0	1, 2	$(1.0 - \exp(-f(C, S>1, t_o + t_s, M)))(1.0 - \exp(-\lambda_i t^*))$	$f(C, S>1, t_o + t_s, M) \cdot \lambda_i t^*$	[-]
1	0	$1.0 - \exp(-f(C, S=1, t_s, M) - f(C, S>1, t_c - t_o, M))$	$f(C, S=1, t_s, M) + f(C, S>1, t_c - t_o, M)$	[-]
1	1	$1.0 - \exp(-\int_0^{t_o} (f(C, S=1, t+t_s, M) + f(C, S>1, t+t_c - t_o, M)) dt)$	$\int_0^{t_o} (f(C, S=1, t+t_s, M) + f(C, S>1, t+t_c - t_o, M)) dt$	[1/hr]
1	2	$1.0 - \exp(-\int_0^{t_o + t_s} f(C, S=1, t, M) dt - \int_0^{t_c} f(C, S>1, t, M) dt)$	$\int_0^{t_o + t_s} f(C, S=1, t, M) dt + \int_0^{t_c} f(C, S>1, t, M) dt$	[1/hr]

$$t^* = t_o \text{ or } t_o + t_s - t_i$$

表3-2 故障確率を与える式（時間依存性が の場合

Cause Type C	Failure Mode Type M	Failure Probability	Dimension of Function g
1	0	$1.0 - \exp(-g(C, S=1, M) \cdot t_s^\alpha - g(C, S>1, M) \cdot (t_c - t_o)^\alpha)$	[1/hr ^{$\alpha+1$}]
1	1	$1.0 - \exp(-\frac{g(C, S=1, M)}{\alpha + 1} ((t_o + t_s)^{\alpha+1} - t_s^{\alpha+1}) - \frac{g(C, S>1, M)}{\alpha + 1} (t_c^{\alpha+1} - (t_c - t_o)^{\alpha+1}))$	[1/hr ^{$\alpha+1$}]
1	2	$1.0 - \exp(-\frac{g(C, S=1, M)}{\alpha + 1} (t_o + t_s)^{\alpha+1} - \frac{g(C, S>1, M)}{\alpha + 1} t_c^{\alpha+1})$	[1/hr ^{$\alpha+1$}]

3.7 故障データとの比較

システム信頼性解析においては、故障率は一定として取り扱う場合がほとんどであるため、故障率についての時間依存性のデータはあまり多く存在しない。また、故障の原因については、ほとんど考慮されていない。

それ故、本節においては、故障率の時間依存性を取り上げて実際のデータとの比較を行うこととする。

関数 f の時間依存性を t^α と仮定すると (3.17) 式の形に f が表せられる。

$$f(C, S, t, M) = g(C, S, M) \times t^\alpha \quad (3.17)$$

ここで、 $C=1, M=1$ の場合について、単一の原因のみが存在するとし、更に、故障原因の作用する時間と、機器の動作時間が等しい ($t_0 = t_c$) とすると、累積故障確率は

$$\text{累積故障確率} = 1.0 - \exp\left(-\frac{g}{\alpha+1} t^{\alpha+1}\right) \quad (3.19)$$

となる。ここで時刻 t は機器の動作開始からの時間である。(3.19)式より、故障確率分布 $\varphi(t)dt$ は次のように求まる。

$$\varphi(t)dt = g t^\alpha \exp\left(-\frac{g}{\alpha+1} t^{\alpha+1}\right) dt \quad (3.20)$$

この分布はワイブル分布となっている。

故障データと故障確率モデルの比較は (3.19) 式、(3.20) 式によって行い、 α の値を求めることとする。Boesebeck and Homke⁽²⁹⁾ は三種類の径の主蒸気管の故障率の時間依存性を調べた。図3-3 にその結果を示す。図中の二本の点線は、それぞれ 1.66, 7.64 の α の値に対応している。Behmann⁽³⁰⁾ は三種類の型の導波管について故障率の時間依存性を調べている。Kieron⁽³¹⁾ は TTL 機器についての累積故障確率の値を求めている。その他、小林⁽³²⁾、Lambert⁽³³⁾ の故障データと比較し、表3-3 に示す α の値が得られた。

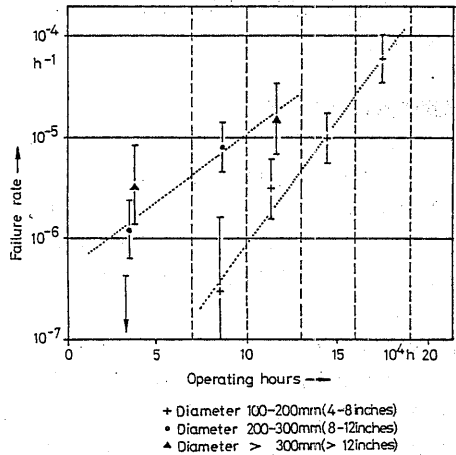


図3-3 主蒸気管の故障率の時間依存性 (Boesebeck & Homke)

表3-3 データより求めた α の値

Experimenter	Component	Data Type	α
Boesebeck & Homke	Main Steam Fitting Diameter > 8inches	Failure Rate	1.66
	Diameter < 8inches	Failure Rate	7.64
Behmann	Traveling Wave Tube	Failure Rate	2.0
		Failure Rate	1.86
		Failure Rate	2.82
Kieron	TTL devices	Cumulative Failure Probability	0.01
Kobayashi	Solder & Solder Joint	Cumulative Failure Probability	0.86
Lambert	Solder	Cumulative Failure Probability	-0.06

この結果から、 α の値は機器により0~8と大きく異なっている事がわかる。ある主の機器では、故障率はほとんど時間に依存しない($\alpha \approx 0.0$)。他方、強い時間依存性を示す機器もある($\alpha \approx 8$)。このことは、故障率の時間依存性は、機器の種類、故障モード、故障原因に強く依存しており、 α の値の決定は、個々の場合の実際のデータに基いてなされなければならないことを示している。

故障率の時間依存性は、 t^α の形で十分近似でき、この形を仮定することにより、(3.19),(3.20)式に示すような、累積故障確率、故障確率分布の比較的簡単な式が得られる。

3.8 信頼性解析プログラム

本章で提唱した故障モデルを用いて、各種事故条件下におけるシステムの信頼性解析を実施する計算プログラム⁽³⁴⁾を作成した。このプログラムでは更に、機器の故障がシステムを構成する他の機器の故障へ影響する効果、システムの信頼性に重大な影響を及ぼす環境条件の探索、の解析も可能となっている。

解析の基本は、フォールト・ツリー解析である。対象とする系は安全防護系であり、通常待機状態に置かれ、作動要求があった時点で作動が開始され、一定時間(t_0)の作動の継続が要求されるとする。保守、点検により機器の健全性が確認された時点をも $t=0$ とする。

本プログラムで実施されている解析方法の基本的な考え方を図3-4に示す。最も根本に故障原因を置き、事故条件の機器故障率への影響は、故障原因まで遡って求める。また、構成機器の故障により他の機器の故障を誘発する場合も、環境条件→故障原因の道筋を考える。

本プログラムは、次の三つの機能を備えている。

(1) 各種の事故状態におけるフォールト・ツリーの頂上事象の発生確率を求める。

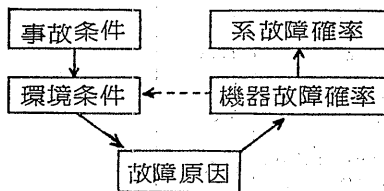


図3-4 解析プログラムの基本的考え方

(2) 機器の故障が同一系内の他の機器の故障を誘発する二次的効果を定量的に算定する。

(3) 系の信頼性に重大な影響を及ぼす環境条件(事故条件)の探索を行う。

以下、これらの三機能についての説明を行う。

3.8.1 各種事故条件下における頂上事象発生確率の計算

この機能により、第二章で示した種類の解析が、事故条件を入力することにより、ほぼ自動的に実行できる。

各種事故状態は、解析対象にとっては外部事象に相当する。この事故状態を環境条件で表現する。環境条件は、故障原因、原因の程度、原因の及ぶ範囲(場所)、原因の作用する時間、を一組としてあらわす。各構成機器の故障確率を求める際、機器の置かれた位置を参照しながら、故障原因の影響を取り入れて計算する。

この様にして事故状態を与えれば、計算機内部で自動的に、その状態における各機器の故障確率を計算する。その故障確率を用いて、フォールト・ツリー解析を実施し、各種事故条件下における頂上事象発生確率が求められる。

3.8.2 二次的効果の計算

系を構成する機器に故障が発生し、それが原因となり、系内の他の機器の故障を誘発する場合は考えられる。これは、内部事象の従属性である。系の構成によっては、この従属性のために頂上事象発生確率が增大する。システムの信頼性解析を行う場合、この効果がどの程度であるかを押えておく必要がある。

この解析のためには、機器の故障による他の機器の故障発生への影響を知る必要がある。この関係は、事前にデータとして与えておく。つまり特定の機器の故障モードに対し、それが発生した場合の影響を(故障原因、程度、場所)の組み合わせで表現して与えておく。原因の作用時間は t_0 を用いる。

考え得るすべての二次的効果を総合し、全体として頂上事象発生確率へどの程度影響するかを次の手順により求める。

- 頂上事象発生に至らない基本事象をすべてリスト・アップする。A. B. C. D. E.
- それらの基本事象の2つ以上の任意の組み合わせで、頂上事象発生に至らないものをリスト・アップする。(A. D), (A. E),
- (a),(b)で選んだ事象を合わせて初期事象(I_1)とし、

その発生確率 $P(I_1)$ を求める。

- (d) $P(I_1) < 10^{-10}$ の初期事象を除外する。
- (e) I_1 なる初期事象により引き起される環境条件 E_1 下における各基本事象発生確率を計算する。
- (f) I_1 が発生した状態での、系が故障状態となる論理をあらわすフォールト・ツリーを作成する。これは元のフォールト・ツリーから事象 I_1 及び関連基本事象を除外する事により得られる。これをフォールト・ツリー T_1 とする。
- (g) T_1 の頂上事象発生確率を求める。 $P(T_1)$
- (h) E_1 の環境条件下 (初期事象 I_1 の発生) における T_1 の頂上事象発生確率を求める。 $P(T_1/I_1)$
- (i) 初期事象 I_1 が発生したための頂上事象発生確率の増加量を求める。

$$P(I_1) \cdot (P(T_1/I_1) - P(T_1))$$

- (j) (e)~(i) の手続きをすべての初期事象 I_i について実施し、その結果を加え合わせる。

$$(二次的効果)_1 = \sum_i P(I_i) \cdot (P(T_i/I_i) - P(T_i)) \quad (3.21)$$

更に、初期事象 I_1 が発生し、その影響により他の機器の故障が発生 (S_j) し、なおかつ、頂上事象発生には至らない場合があり得る。この場合には、 I_1 と S_j の両方が系内の他の健全な機器に影響を及ぼす。この結果を算定する手順を以下に示す。

- k) $P(I_1) \cdot P(S_j/I_1)$
- l) $P(I_1) \cdot (P(S_j/I_1) - P(S_j))$
- m) $P(T_{1j}/I_1, S_j) - P(T_{1j}/I_1)$
- n) $(二次的効果)_2 = \sum_{ij} P(I_i) \cdot (P(S_j/I_i) - P(S_j))$

$$\times \{P(T_{1j}/I_1, S_j) - P(T_{1j}/I_1)\} \quad (3.22)$$

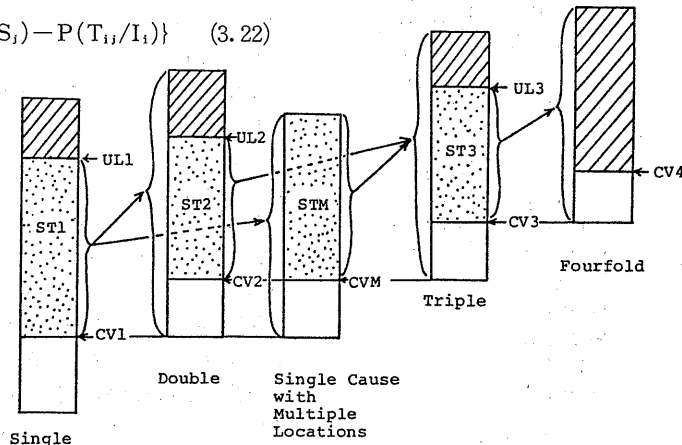


図3-5 多重故障の探索手順

同様な手順を繰り返す、最終的には二次的効果は次のようになる。

$$二次的効果 = \sum_k (二次的効果)_k \quad (3.23)$$

3.8.3 系の信頼性に重大な影響を及ぼす環境条件の探索

環境条件を (故障原因, 場所) の組み合わせにより表現する。任意の環境条件に対する頂上事象発生確率の増加量は、3.8.1 と同じ方法で求められる。これにより環境条件探索の第一段階が実施できる。つまり、大きな頂上事象発生確率を与える環境条件をリスト・アップすれば良いわけである。

系の構成によっては、単一の原因個々では、系の信頼性に及ぼす影響は小さいが、複数の原因が同時に作用した場合に大きな影響を及ぼす可能性がある。それ故、故障原因の多重の組み合わせを調べる必要がある。この組み合わせは、異なった種類の原因相互、同一種類の原因が異なった場所に発生する場合、等が考えられ、すべての可能な組み合わせの数は膨大なものとなる。これらを単純に調べあげることは効率も、結果の見通しも悪くなる。そこで、本プログラムでは図3-5に示す手順に従って探索を行っている。この手順の考え方は、既に系の信頼性に大きな影響を及ぼしている (故障原因, 場所) は、更に他との組み合わせを考える必要はない。つまり、まずこのような原因に対する対策が必要であるということである。

解析結果は、各多重の組み合わせ別に、(故障原因, 場所) と対応する頂上事象発生確率の一覧表の形で出力される。

3.8.4 プログラム構成

本プログラムにおける解析手順の概略図を 図3-6 に示す。図3-7 にサブルーチン群の関係を示す。

以下、各サブルーチンの機能説明を与える。

- MAIN : 主プログラム。プログラム全体を制御する。
- CPVAL : ブロック・データ・サブプログラム。機器故障確率データ収録。
- CONDI : 事故条件データ読み込み。
- TREE : フォールト・ツリーの構造データ読み込み。

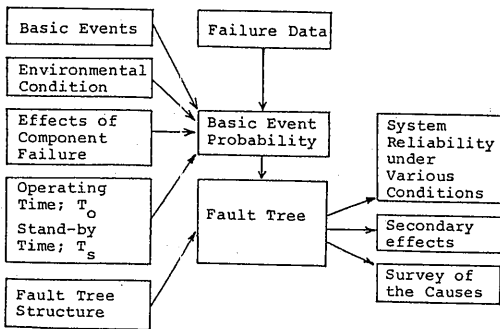


図3-6 プログラムの解析手順

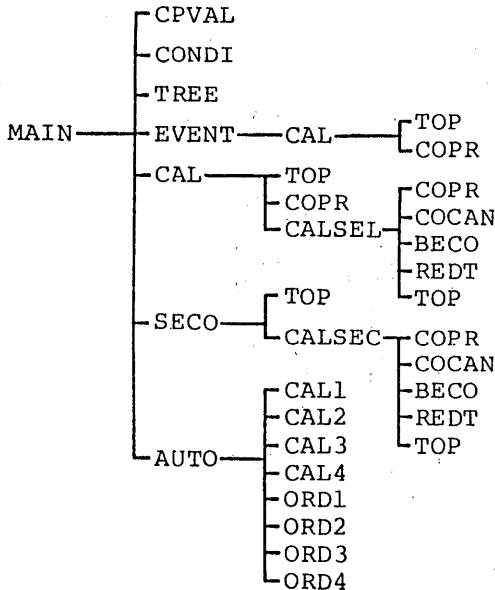


図3-7 解析プログラムの構成

- EVENT : フォールト・ツリーの基本事象を定義する。
- COPR : 与えられた環境条件における基本事象発生確率を計算。
- TOP : フォールト・ツリーの頂上事象発生確率計算。次章の高速フォールト・ツリー解析プログラムにより構成されている。
- CAL : 与えられた環境条件における頂上事象発生確率計算。COPR, TOP の制御プログラム。
- SECO : 二次的効果の計算。機器故障の及ぼす影響についてのデータ読み込み。
- CALSECO : 二次的効果の計算実施。
- COCAN : 頂上事象発生に至らない基本事象を見つけ出す。
- BECO : 機器の故障により引き起される環境条件を決定する。
- REDT : 初期事象 I_i が発生した場合のフォールト・ツリーを作成。
- AUTO : 故障原因の探索。
- CAL 1~4 : 1~4 重の故障原因に対し、頂上事象発生確率を計算。
- ORD 1~4 : 上記計算結果を発生確率の高い順に並び換える。それと共に不要なものを除く。

3.9 信頼性解析プログラムによる解析実施例

本節では、以上前節で説明した解析プログラムによる解析実施例について述べる。解析対象としては、第二章で取り上げた、原子力船むつの非常用崩壊熱除去系を、ここでも取り上げることとする。

3.9.1 入力データ

解析実施に先立ち、対象とする系の情報、故障データ等を本解析プログラムのフォーマットに従い与える必要がある。

まず、故障原因には、表3-4のように番号を割り当てた。計算プログラム内では、この番号により故障原因を取り扱うようになっている。また、原子炉室、格納容器、等にも表3-5に示すように番号を与え、各機器の設置された位置を同定する際には、これらの番号を用いた。番号7,8,9はそれぞれ、配線、スイッチ、補機室内ポンプに対応しているが、これらは、電気回路(2番)、補機室(3番)の一部である。この様に、より細分化した部分にも番号を割り当てたのは、特定の故障原因を、特定の機器のみに作用させら

れるようにするためである。

定期保守間隔は1年間、系の起動要求後10時間の連続運転が必要であるとした。

機器の故障は、まず各種故障モードについての、デ

表3-4 故障原因及び対応番号

故障原因	番号
衝撃力	1
振動	2
圧力	3
粉塵	4
湿度	5
応力	6
温度	7
放射線	8
伝導性物質	9
過電圧	10
過電流	11
腐食(酸)	12
酸化	13
化学反応	14
調整	15
設置	16
保守	17
操作	18
試験方法	19
製造者	20

表3-5 機器設置位置及び番号

場所	番号
非常用発電機室	1
電気回路	2
補機室	3
原子炉室	4
機械室	5
格納容器	6
配線部分	7
スイッチ	8
補機室内ポンプ	9

ータ・バンク的なものを整備し、そのデータを用いて、フォールト・ツリー中にあらわれる基本事象発生確率を求めるようになっている。

機器の故障データは表3-6のように与えてある(ブロック・データ・サブプログラム CPVAL に収録)。これらは、3.6節において定期した f の値であり、起動指令時あるいは10時間経過後における故障確率の値は表3-1、表3-2の式にもとづいて計算して求める。図中、左端は故障原因の番号で、その各々の原因が存在した場合の f の値が、原因の程度(1~5)に従って、五種類与えられている。故障原因が機器の故障に影響しない場合には、この値には、すべて0.0が与えられている。これらの数値は、第二章で与えた故障確率の値を基に工学的判断により与えた。

フォールト・ツリー中の基本事象は表3-7に示す様に定義する(サブ・プログラム EVENT において定義)。左端の数字が、フォールト・ツリー中における基本事象の番号である。二列目の数字は、故障の種類番号で、この番号により、先に定義した機器の故障モードを参照することができる。三列目の数字は、故障モードの型で0が起動時、1が運転中、2が待機中の故障を意味している。四列目の数字は、機器の数。LOCATIONS に与えられた数字は、機器の置かれた位置を示す。この番号は、表3-5で割り当てた番号である。次のCOMMON LINKS は、故障原因15~20の相互の関連性を与えるために用いる。今回の解析では、これらの原因については考慮しなかったためすべて同一の1という数が与えてある。

通常運転条件下での基本事象発生確率はこの段階で直ちに求まる。これは、すべての故障原因が程度1で作用したとして求められる(この計算はサブプログラム COPR において実行される)。

その他、システムのフォールト・ツリーの構造もデータとして与える。(サブプログラム TREE においてデータを読み込む)。

以上で解析実施のための準備は完了したと言える。

3.9.2 解析手順及び結果

第一の機能の各種事故条件下における頂上事象発生確率の計算は、事故条件をデータとして与えることから始まる。事故条件は、3.8.1節で述べたように、(故障原因、原因の及ぶ範囲、原因の程度、原因の作用する時間)により表現される。例えば、「原子炉室内の火災」は(温度、原子炉室、最も厳しい条件、10時間)及び(温度、配線、最も厳しい条件、10時間)に

より表現される。これを記号表現にすると、(7, 4, 5, 10) 及び (7, 7, 5, 10) となる。同様に他の事故条件も表3-8のように与えられる。(これらのデータの読み込みはサブプログラム CONDI において行われる。)

これらの事故条件のデータをもとにして、サブプログラム COPR において事故条件下における基本事象の発生確率を計算し、その値を使い、更にサブプログラム TOP により頂上事象発生確率を計算する。

以上により、各種事故条件下における頂上事象発生確率が、事故条件を与えるだけで求まる。表3-9は、衝突事故の場合の解析結果である。各基本事象の発生確率及び頂上事象の値が得られている。

第二の機能の二次的効果の算定のためには、機器の故障により引き起される環境条件のデータをサブプログラム BECO において与えておく。これは各基本事象の発生により起り得る環境条件を(故障原因, 位置, 程度)の組により与える。計算はサブプログラム SECO及び附属のサブプログラムにより実施される。

この計算は、第一の機能(事故条件下における頂上事象発生確率の計算)と合わせて実施することもできる。計算の結果,対象とした系の場合,二次的効果による頂上事象発生確率の増加量は10~20%程度であった。

第三の機能の故障原因の探索は、サブプログラム AUTO 及び附属のサブプログラムにより実行される。必要とするデータは、3.9.1節で述べたデータだけでなく、AUTO サブプログラム開始指令により解析を開始する。解析結果は(故障原因, 場所)の組み合わせに対する頂上事象発生確率の値が一覧表として得られる。この場合、原因の程度は“最も厳しい条件”, 原因の作用時間は、運転時間($t_0=10$ 時間)と仮定されている。

表3-10に単一故障原因で大きな影響を及ぼすものを、効果の大きい順に並べた解析結果を示す。このリストによると、順位3,8,6,7,8の(原因, 場所)の組み合わせはそれぞれ(5,3), (1,3), (7,3), (1,1), (7,1)である。これらは、それぞれ、補機室内浸水、

表3-8 船体事故条件の表現方法

CONDITION = EXPLOSION IN REACTOR ROOM					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
1	4	5	0	10.0	
1	7	5	0	10.0	
CONDITION = FIRE IN REACTOR ROOM					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
7	4	5	1	10.0	
7	7	5	1	10.0	
CONDITION = EXPLOSION IN AUX. ROOM					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
1	3	5	0	10.0	
1	7	5	0	10.0	
1	8	5	0	10.0	
CONDITION = FIRE IN AUX. ROOM					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
7	3	5	1	10.0	
7	7	5	1	10.0	
7	8	5	1	10.0	
CONDITION = IMPACT TO WHOLE SHIP					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
1	1	3	0	10.0	
1	2	3	0	10.0	
1	3	3	0	10.0	
1	4	3	0	10.0	
1	5	3	0	10.0	
CONDITION = FLOODING IN AUX. ROOM					
CAUSE	LOCATION	SEVERITY	CAUSE TYPE	TIME DURATION OF THE CAUSE	
5	1	5	1	10.0	
5	2	4	1	10.0	
5	9	3	1	10.0	

表3-9 衝突事故時における頂上事象発生確率の解析結果

*** ANALYTICAL RESULTS FOR THE VARIOUS CONDITIONS ***

*** CONDITION = IMPACT TO WHOLE SHIP ***

*** BASIC EVENTS AND THEIR FAILURE PROBABILITIES ***

	MISSION TYPE	COMPONENT NUMBER	FAILURE PROBABILITIES
X(1) - DIESEL ENGINE FAIL TO START	- 0	1	0.38926E-01
X(2) - DIESEL ENGINE FAIL TO RUN	- 1	1	0.32215E-01
X(3) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X(4) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X(5) - BREAKER FAIL TO OPERATE	- 0	1	0.20087E-02
X(6) - WIRE OPEN CIRCUIT	- 1	1	0.10846E-02
X(7) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	6	0.59987E-07
X(8) - PIPE(SECONDARY) RUPTURE	- 2	6	0.49945E-03
X(9) - EMERGENCY TANK RUPTURE OF LEAK	- 2	1	0.57494E-04
X(10) - PUMP FAILURE TO RUN	- 1	1	0.33668E-02
X(11) - MANUAL VALVE FAILURE TO START	- 0	1	0.40067E-02
X(12) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(13) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(14) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(15) - PIPE(PRIMARY) RUPTURE	- 2	2	0.11011E-05
X(16) - PIPE(SECONDARY) RUPTURE	- 2	3	0.24976E-03
X(17) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	3	0.29993E-07
X(18) - MOV FAILURE TO OPERATE	- 0	1	0.29989E-02
X(19) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(20) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(21) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(22) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02
X(23) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(24) - MOV FAILURE TO OPERATE	- 0	1	0.29989E-02
X(25) - MOV FAILURE TO REMAIN OPEN	- 0	1	0.11000E-02
X(26) - PIPE(SECONDARY) PLUG	- 1	1	0.99978E-08
X(27) - MANUAL VALVE FAILURE TO REMAIN OPEN(PLUG)	- 0	1	0.11000E-02

*** POINT VALUE OF THE SYSTEM FAILURE PROBABILITY ***

POINT VALUE = 0.87075E-01

表3-10 単一故障原因の頂上事象発生確率への影響

*** SINGLE GENERIC CAUSE ***

TOTAL NUMBER = 91 CUT OFF VALUE = 0.67107E-01

NO.	CAUSE	LOCATION OR LINK	POINT VALUE
(1)	10	2	0.16857E+00
(2)	11	2	0.16857E+00
(3)	5	3	0.16402E+00
(4)	5	9	0.16402E+00
(5)	1	3	0.12742E+00
(6)	7	3	0.10695E+00
(7)	1	1	0.98911E-01
(8)	7	1	0.98911E-01
(9)	7	9	0.97775E-01
(10)	10	6	0.90272E-01
(11)	10	7	0.90272E-01
(12)	11	6	0.90272E-01
(13)	11	7	0.90272E-01
(14)	10	8	0.89854E-01
(15)	11	8	0.89854E-01
(16)	4	1	0.80799E-01
(17)	5	1	0.80799E-01
(18)	1	9	0.80753E-01
(19)	1	6	0.79475E-01
(20)	1	2	0.77074E-01
(21)	4	2	0.76134E-01
(22)	5	2	0.76134E-01
(23)	4	3	0.74571E-01
(24)	4	9	0.72443E-01
(25)	1	4	0.71654E-01

補機室内爆発, 補機室内火災, 非常用発電機室内爆発, 非常用発電機室内火災と考えられ, 第二章の解析で取り上げた事故条件に対応している。

順位 1, 2 には (10,2), (11,2) がきており, これは電気回路に過電圧, 過電流が加わり, 制御系統に故障が発生した場合に影響が大きいことを示している。

順位 4 は (5,9) で補機室内のポンプが浸水等で故障が発生する場合で (5,3) の一部と考えられる。

表3-11 には単一故障原因が複数箇所に現われた場合を示す。このリストから, 爆発, 紛塵, 湿度等の影響が大きいことがわかる。

表3-12 には, 二重の故障原因の場合のリストを示す。上位 5 位までは単一故障の再録である。

六位は過電圧と過電流が同時に作用した場合, 七位は過電圧と非常用発電機室内の粉塵, 等と意味づけられるが, リスト中には, 論理的に意味をなさないもの, 起こり難いもの等, すべての組み合わせが入っている。

三重の故障原因についても同様のリストが得られる。

以上のように, 解析プログラムにより故障原因のリストが得られる。そのリストに上げられた各項目の意味を判断するのが解析者の仕事であると言える。計算機により, すべての可能な組み合わせについて調べた中で, 影響の大きいものが一覧表として出力されているため, 解析者の考え落としは最小限になると考えられ

表3-11 単一故障原因が複数場所に現れた場合

*** SINGLE GENERIC CAUSE WITH
MULTIPLE LOCATIONS ***
TOTAL NUMBER = 39 CUT OFF VALUE = 0.67107E-01

CAUSE	LOCATIONS	POINT VALUE
1	(6, 9, 0, 0)	0.97748E-01
1	(2, 4, 0, 0)	0.86441E-01
1	(7, 8, 0, 0)	0.73371E-01
1	(2, 4, 9, 0)	0.10457E+00
1	(5, 6, 8, 0)	0.81320E-01
1	(2, 4, 6, 9)	0.10500E+00
2	(1, 3, 0, 0)	0.76157E-01
2	(1, 3, 4, 0)	0.76165E-01
2	(1, 2, 3, 4)	0.76172E-01
4	(1, 2, 0, 0)	0.94518E-01
4	(3, 8, 0, 0)	0.79198E-01
4	(4, 9, 0, 0)	0.72453E-01
4	(1, 2, 3, 0)	0.10652E+00
4	(4, 8, 9, 0)	0.77091E-01
4	(1, 2, 3, 4)	0.10653E+00
5	(1, 2, 0, 0)	0.94518E-01
5	(1, 2, 4, 0)	0.94527E-01
5	(1, 2, 4, 5)	0.94527E-01
6	(3, 6, 0, 0)	0.67383E-01
6	(2, 3, 6, 0)	0.67383E-01
6	(2, 3, 4, 6)	0.67383E-01
7	(2, 4, 0, 0)	0.71208E-01
7	(6, 8, 0, 0)	0.67341E-01
7	(2, 4, 6, 0)	0.71209E-01
7	(2, 4, 5, 6)	0.71209E-01
8	(1, 3, 0, 0)	0.80799E-01
8	(2, 9, 0, 0)	0.79846E-01
8	(1, 2, 3, 0)	0.89047E-01
8	(4, 8, 9, 0)	0.74308E-01
8	(1, 2, 3, 4)	0.89056E-01
9	(1, 3, 0, 0)	0.80799E-01
9	(2, 9, 0, 0)	0.79846E-01
9	(1, 2, 3, 0)	0.89047E-01
9	(4, 8, 9, 0)	0.74308E-01
9	(1, 2, 3, 4)	0.89056E-01
10	(4, 8, 0, 0)	0.89967E-01
10	(4, 5, 8, 0)	0.89967E-01
11	(4, 8, 0, 0)	0.89967E-01
11	(4, 5, 8, 0)	0.89967E-01

る。また、個々の機器の故障モードに対して与えた故障データから、故障原因の影響をあらわす頂上事象発生確率の数値が得られているため、故障原因の重要度を相互に比較し、順位をつける上で大変便利になっていると言える。

3.10 考 察

3.6で求めた故障確率を与える式を、実際に応用する場合には、待機時間は普通一定に固定された値ではないため、最長の待機時間と最短時間の間で平均化の操作を行う必要がある。更に、連続的に作用する原因が間欠的に作用する場合もある。このような場合は、故障確率を与える式は、表3-1, 3-2とは異なってくる。しかし、式の導出は、基本的には、本章で示したと同様の方法となる。

厳しい環境条件の影響は、この故障モデルを用いると取り扱いが可能となり、それにより、種々の条件下における故障率の値相互の間に一貫性を持たせることができるようになる。また、解析プログラムで示したように、二次的効果の算定も可能となる。更に、解析実施例において見られたように系の故障発生に重大な影響を持つ環境条件の探索が実行できるということ

は、系の弱点なり欠陥を見出すことが可能であると言える。

この故障モデルにより、共通原因故障を取り扱うための一方法も考えられる。共通原因故障とは、何らかの共通の原因により発生する故障である。本故障モデルでは、各種の条件下における条件付故障確率が得られるので、これを用い、原因を与えた時の、互に統計的に独立な、しかし、故障原因により増大した故障確率として共通原因故障の現象をとらえる方法が考えられる。

本故障モデルでは、一つの故障モードの関数 f に対して100種の値が原理的に必要となる。つまり、(20種の故障原因) \times (5段階の原因の程度) である。更に、 $C=0, M=1,2$ の場合、45種の λ_i の値が必要となる。これは、(9種の原因) \times (5段階の原因の程度) に対応している。しかし、特定の故障モードに対し、すべての故障原因が影響するわけではなく、数種の主要な原因のみが影響するだけである。また、調整、設置、保守、試験方法、操作、製造業者、の原因に対するデータは多種類の故障モードに対し共通に使えらる。

それ故、実質的には、必要とされる故障データは、

表3-12 二種の故障原因の影響

*** DOUBLE GENERIC CAUSES ***

TOTAL NUMBER = 53 CUT OFF VALUE = 0.98602E-01

NO.	CAUSE AND LOCATIONS	POINT VALUE
(1)	(10, 2) (0, 0)	0.16857E+00
(2)	(11, 2) (0, 0)	0.16857E+00
(3)	(5, 3) (0, 0)	0.16402E+00
(4)	(5, 9) (0, 0)	0.16402E+00
(5)	(1, 3) (0, 0)	0.12742E+00
(6)	(10, 8) (11, 8)	0.11675E+00
(7)	(10, 8) (4, 1)	0.10797E+00
(8)	(10, 8) (5, 1)	0.10797E+00
(9)	(11, 8) (4, 1)	0.10797E+00
(10)	(11, 8) (5, 1)	0.10797E+00
(11)	(10, 8) (1, 9)	0.10792E+00
(12)	(11, 8) (1, 9)	0.10792E+00
(13)	(7, 3) (0, 0)	0.10695E+00
(14)	(10, 8) (1, 6)	0.10668E+00
(15)	(11, 8) (1, 6)	0.10668E+00
(16)	(10, 8) (1, 2)	0.10435E+00
(17)	(11, 8) (1, 2)	0.10435E+00
(18)	(10, 8) (4, 2)	0.10344E+00
(19)	(10, 8) (5, 2)	0.10344E+00
(20)	(11, 8) (4, 2)	0.10344E+00
(21)	(11, 8) (5, 2)	0.10344E+00
(22)	(10, 8) (4, 3)	0.10192E+00
(23)	(11, 8) (4, 3)	0.10192E+00
(24)	(10, 8) (4, 9)	0.99856E-01
(25)	(11, 8) (4, 9)	0.99856E-01

それ程多くならないと考えられる。

3.11 結 論

本章で提唱した故障モデルは、システム信頼性解析を実施する際、環境条件の影響を取り扱うことを念頭に置いており、この故障モデルを用いた信頼性解析プログラムを作成した。

故障率に影響を及ぼす種々の要因をできるだけ見通し良く整理、分類したのが、本故障モデルと言える。その結果、機器の故障確率を表わす式が比較的整理された形で得られた。これにより、各種環境条件下における機器の故障確率に一貫性のある値を与え得る。

連続的に作用する故障原因の場合、故障率の時間依存性は t^α の形により比較的良く近似でき、故障データより α の値は $\alpha=0\sim 8$ と広い値の範囲にあることがわかった。

また、この故障モデルを用いた解析プログラムの開発により、事故条件下の頂上事象発生確率の計算のほぼ自動的な実行、二次的効果の算定、故障原因の探索、が実行できるようになり、信頼性解析における新たな機能が得られた。

4. 高速フォールト・ツリー解析プログラム

4.1 緒 言

確率論的安全評価において、システム信頼性解析を実施する際には、フォールト・ツリー解析が主要な役割を占めている。

複雑なシステム、大規模なシステムのフォールト・ツリー解析には、処理する情報量が多いため、計算機の使用が必須となり、現在までに種々の計算プログラムが開発され使用されている。⁽¹¹⁾

第二章の解析はフォールト・ツリー解析を用いて実施しており、第三章の信頼性解析プログラムも基本はフォールト・ツリー解析である。特に第三章の信頼性解析プログラムでは、二次的効果の算定、故障原因の探索において、異なった構造のフォールト・ツリーの解析を多数回繰り返す必要がある。そのため、どうしても既存の解析プログラムより高速でフォールト・ツリー解析を実行するプログラムが必要となり、高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発を行った。⁽³⁵⁾

以下の各節において、本プログラムの説明、解析例を示す。

4.2 フォールト・ツリー及び構成要素

フォールト・ツリー解析は、信頼性解析の一手法であり、原子力プラントのような大規模、複雑な系の解析に広く用いられている。

フォールト・ツリー解析は、系の望ましからぬ状態あるいは故障状態の定義から始まる。この定義された状態が、フォールト・ツリーの頂上事象となる。頂上事象を順次論理的により小さな事象に分解していき、最終的に、基本事象 (Basic Event) と分解不可能な事象 (Undeveloped Event) が、AND ゲート、OR ゲートにより頂上事象と結びつけられた樹形図ができあがる。それ故、この解析方法がフォールト・ツリー解析と呼ばれている。

基本事象とは、実際の機器の故障であり、故障データの入手が可能なものである。分解不可能な事象とは、情報不足等により、これ以上他の基本事象に分解できない、あるいは、しない事象のことである。

フォールト・ツリーの枝の先端に存在する一次事象 (Primary Event) は、基本事象か分解不可能な事象である。中間事象 (Intermediate Event) とは、論理ゲートで結合された二個以上の事象により構成されている事象のことである。

AND ゲートは、ブール代数における共通部分を求める操作をあらわしており、AND ゲートに入力しているすべての事象が発生した場合に、AND ゲートから上への事象が発生する。OR ゲートは、和集合を求める操作をあらわしており、OR ゲートに入力している事象のうち最低一つの事象が発生した場合に、OR ゲートから上への事象が発生する。NOT ゲートは補集合を取る操作をする。NOR, ANOT, 等、他の論理ゲートは、AND, OR, NOT ゲートの組み合わせにより表現できる。

反復事象 (Replicated Event) とは、フォールト・ツリーにおいて複数個所にあられる一次事象のことである。

カット・セットとは、それを構成するすべての事象が発生した場合に頂上事象が発生する様な一次事象の集合である。最小カット・セットとは、頂上事象が発生するためには、構成するすべての事象が発生しなければならないカット・セットである。

4.3 解析の基本的な方法

本解析プログラムは、フォールト・ツリーの末端から始め、順次頂上事象へ近づいていく、Bottom-Up の

方法によっている。

反復事象がフォールト・ツリー中に一つも存在しない場合は、各ゲートにおいて数値計算を実行してしまい、その結果を上位ゲートの入力とする。この操作を繰り返していくと最後に頂上事象発生確率の値が得られる。

反復事象がフォールト・ツリー中に存在する場合は、反復事象を含んだカット・セット間の和は各ゲートにおいては実行せず、頂上事象発生確率を計算する最終段階で実行する。

最小カット・セットを求める場合は、すべての一次事象を識別しておき、カット・セット間の和は、同じく、最終段階で実行する。

計算方法の詳細は以下の2節において説明する。

4.4 各ゲートにおける手続き

各ゲートにおいては、ブール代数に従い、和、積の演算を行う。その場合、各一次事象、カット・セット間の包含関係を考慮する。

本節で、反復事象をA,Bで、非反復事象をX,Yで表わすこととする。

ORゲートにおいては、次の演算を実行する。

$$A+A=A \quad (4.1)$$

$$A+A \cdot X=A \quad (4.2)$$

ANDゲートにおいては、

$$A \cdot A=A \quad (4.3)$$

$$A \cdot \bar{A}=0 \quad (4.4)$$

$$(A \cdot X) \cdot (A \cdot Y)=A \cdot X \cdot Y=A \cdot Z \quad (4.5)$$

$$(A+B) \cdot X=A \cdot X+B \cdot X=A \cdot C+B \cdot C \quad (4.6)$$

の演算を実行する。ここで \bar{A} はAの補集合、ZはX、Yよりなる中間事象、(4.6)式におけるXは名称をCと変えて、以後は反復事象と同様に取り扱う。

非反復事象間の数値計算は各ゲートにおいて実行してしまい、その結果の中間事象とその発生確率を上位ゲートの入力とする。

各ゲートにおける出力は、非反復事象だけから構成されている中間事象と、反復事象を含んだ中間事象の和となっている。

各ゲートにおいては、上記演算の他に、一次事象の積の次数が一定次数より大きい中間事象、及び、発生確率が事前に指定された値より小さい中間事象を除外する操作も行う。それにより、各ゲートの出力を構成するカット・セット(中間事象)の数を可能な限り少なくする。

4.5 頂上事象発生確率の計算方法

前節で説明した、各ゲートでの操作を繰り返していくと、最終的に頂上事象に対して、次の式が得られる。

$$TOP=C_0+\sum_{i=1}^l C_i \quad (4.7)$$

$$C_i=X_i \cdot \prod_i A_{ij} \quad (i>0) \quad (4.8)$$

この式で和は、ブール和を意味しており、 A_{ij} は反復事象、 C_0 および X_i は非反復事象のみで構成されている中間事象である。

頂上事象発生確率を与える式は、(4.7)式より、次のように表現できる。

$$P(TOP)=P(C_0)+\sum_{i=1}^l P(C_i)-\sum_{\substack{i,j=0 \\ i<j}}^l P(C_i)P(C_j)/f_{ij} \\ +\sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i<j<k}}^l P(C_i)P(C_j)P(C_k)/f_{ijk}+O(h) \quad (4.9)$$

ここで、 $P(C_i)$ は事象 C_i の発生する確率を意味しており、 $O(h)$ は $P(C_i)$ についての4次以上の高次の項を意味する。 f_{ij} 、 f_{ijk} 等は次の式で定義された因子である。

$$f_{ij}, f_{ijk}=\prod_i P(A_i)^{m-1} \quad (4.10)$$

ここで、 A_i は事象 C_i 、 C_j 、 C_k に含まれている反復事象で、 m は A_i が C_i 、 C_j 、 C_k の中にあられる総数である。

原理的には、頂上事象発生確率を求める場合に(4.9)式の計算を実行しなくてはならない。カット・セットの数(C_i の項数)が少ない場合は問題ないが、カット・セット数が多くなると、相互の組み合わせの数は膨大なものとなり計算はほとんど不可能となってしまう。そこで本プログラムでは、以下の手順に従い、近似的に頂上事象発生確率を求める方法を取った。(4.7)式における第1項から第 $m-1$ 項までの和が $P_{m-1}(TOP)$ と求まっているとする。その時、更に第 m 項を加えた値 $P_m(TOP)$ を、第一近似として次のように求める。

$$P_m(TOP)=P_{m-1}(TOP)+P(C_m) \\ -P_{m-1}(TOP) \cdot P(C_m) \quad (4.11)$$

(4.11)式に、(4.9)式を代入すると、

$$P_m(TOP)=P(C_0)+\sum_{i=1}^m P(C_i)-\sum_{\substack{i,j=0 \\ i<j}}^{m-1} P(C_i)P(C_j)/f_{ij} \\ -P(C_m) \cdot \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i < j < k}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \cdot P(C_k) / f_{ijk} \\
& + P(C_m) \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) / f_{ij} \\
& + O(h) \tag{4.12}
\end{aligned}$$

となる。この近似方法では、 $P(C_i)$ についての一次の項まで厳密に計算していることが(4.9)式と比較してみてもわかる。それ故、第二近似として、(4.11)式に次の項を加える。

$$P(C_m) \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i) - P(C_m) \cdot \sum_{i=0}^{m-1} P(C_i) / f_{im}$$

そうすると、 $P_m(TOP)$ は、

$$\begin{aligned}
P_m(TOP) &= P(C_0) + \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^m P(C_i) P(C_j) / f_{ij} \\
& + \sum_{\substack{i,j,k=0 \\ i < j < k}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \cdot P(C_k) / f_{ijk} \\
& + P(C_m) \cdot \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) / f_{ij} + O(h) \tag{4.13}
\end{aligned}$$

となる。(4.13)式によれば、 $P(C_i)$ についての2次の項まで厳密な形をしていることがわかる。フォールト・ツリー解析の大多数は、第二近似の方法により、頂上事象発生確率を厳密な値に非常に近い値まで求めることができる。

本プログラムでは、更に、第三近似として、(4.13)式に以下の項を付け加える操作もオプションとして与えてある。

$$-P(C_m) \cdot \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^{m-1} P(C_i) \cdot P(C_j) \{1/f_{ij} - 1/f_{im}\}$$

この追加項においては、 i, j は次の条件を満足するものだけに制限している。

$$\begin{aligned}
P(C_m) \cdot P(C_i) / f_{mi} &> COV \\
P(C_m) \cdot P(C_j) / f_{mj} &> COV
\end{aligned}$$

ここで、 COV はあらかじめ与えられた、切り捨て値である。この制限を設けることにより、計算すべき組み合わせが無制限に増大することを防いでいる。

$m=1$ に対しては、 $P_m(TOP)$ は $P(C_0)$ と求まるので、上記の手続きを $m=1$ から順次繰り返していけば、すべての項を加え合せた、頂上事象発生確率の値が求まる。

もし、フォールト・ツリー中に反復事象が存在しない場合は、(4.7)式は

$$TOP = C_0 \tag{4.14}$$

となり、頂上事象発生確率は、

$$P(TOP) = P(C_0) \tag{4.15}$$

とただちに求まる。

最小カット・セットを求める場合は、すべての一次事象を反復事象と同様に取り扱い、各ゲートでの操作を繰り返していく。その場合、(4.7)式において、 C_0 、 X_i の項はあられず、 C_i のみになる。そして、 C_i が一次事象の積であらわせられ、最小カット・セットそのものとなる。

4.6 プログラムの説明

4.6.1 プログラム概説

本プログラムはFORTRAN 77により書かれており、船舶技術研究所に設置されているFACOM-180 II AD 計算機において使用可能となっている。

現時点においては、計算実行時、2048Kバイトの記憶容量を必要とする。

計算の実行により、フォールト・ツリーの頂上事象発生確率の点推定値が得られる。また、必要に応じて、最小カット・セットも得られる。その場合、最小カット・セットは各ゲートに対して求める事ができる。

解析可能なフォールト・ツリーのサイズは、一次事象の数は最大500個、ゲートの数は最大500個、求められる最小カット・セットの数は最大2800個である。また、最小カット・セットを求める際の切り捨て回数、切り捨て値は使用者が事前に定めるようになっている。

4.6.2 解析実施時の具体的手順

以下、本節において、解析実施時における具体的な手続きを説明することとする。

まず、入力データは、解析実施の際の条件とフォールト・ツリーについての記述から成り立っている。フォールト・ツリーについての情報は、ツリー構造、一次事象の発生確率、及び、オプションとして、一次事象の10文字以内の名称である。NOTゲートがフォールト・ツリー中に存在する場合は、NOTゲートへの入力(一次事象)を補集合に置き換え、NOTゲートを取り除く。この場合、(4.4)式の演算が可能となる様、補集合の元となる一次事象の情報も与えておく。NOR, ANOT, NAND, ONOT等のゲートは、AND, OR, NOTゲートの組み合わせで表現しなおして、入力

する。

ゲート及び一次事象に対して、整数を割り当て、計算機内部では、この整数により、ゲート、一次事象を識別する。

フォールト・ツリーの構造は、頂上事象から末端の一次事象までを結びつけているゲート番号を並べる事により表現する。例えば、図4-1に示したフォールト・ツリーの構造は、図4-2のように表現される。第1列から第3列まではゲート番号であり、第4列は、この場合、一次事象の番号である。ゲート番号0とはその位置にゲートが存在しないことを意味している。ANDゲートは偶数で、ORゲートは奇数で表現することとする。行の並ぶ順序は、フォールト・ツリーにおいて、一次事象の置かれている位置と対応している。

フォールト・ツリーの構造は、いかなる形であって

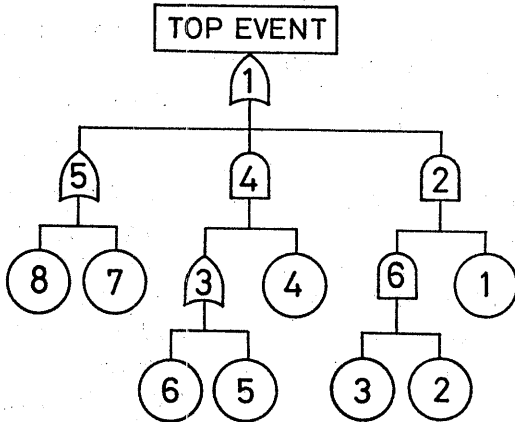


図4-1 フォールト・ツリーの一例

1	2	0	1
1	2	6	2
1	2	6	3
1	4	0	4
1	4	3	5
1	4	3	6
1	5	0	7
1	5	0	8

図4-2 フォールト・ツリーの表現方法
(図4-1のフォールト・ツリーの場合)

も、この表現によって記述することができ、この表現から容易にフォールト・ツリーの構造が思い浮べられる。更に、この表現方法は、本解析プログラムにおける解析手順に適合している。

図4-1, 4-2の構造のフォールト・ツリーを実際に解析する際の手順をやや詳細に示し、解析手順の説明とする。

図4-3に、頂上事象発生確率を求める際の手順を示す。図中、NG(1), NG(2), NG(3), はゲート番号を記憶する変数、NEは一次事象番号を記憶する変数、PPは一次事象発生確率を記憶する変数である。P(m,n)は計算途中の値を一次的に保存する変数である。

第1ステップで、入力データの最初の行を読み込む。(1, 2, 0, 1, 1.0×10^{-2}) このデータから、一次事象“1”は、ゲート“2”の入力であり、ゲート“2”は頂上事象から2段階目の位置にあることがわかる。第2ステップで、一次事象“1”の発生確率の値 (1.0×10^{-2}) を P(2,1) に保存する。ここで、2の下の下線は、2に着目していることを意味する。以下、本節においては同様の表記法とする。P(2,1)は第2段階に位置するゲートの入力値を保存するための変数である。

第3ステップで次の入力データを読み込む。一次事象“2”は、ゲート“6”の入力であり、ゲート“6”はANDゲートであることがわかる。第4ステップで一次事象“2”の発生確率 (3.0×10^{-2}) を変数 P(3,1) に保存する。

第7ステップで次の入力データを読み込む。一次事象“4”はゲート“4”の入力である。ゲート“4”は第2段階に位置しており、同じく第2段階に位置しているゲート“2”から分岐した枝には属していないことがわかる。それ故、ゲート“2”の入力はすべて出揃い、ゲート“2”の出力の計算が可能となったことがわかる。第8ステップで、P(2,1)とP(3,1)の積を計算し、その結果をP(2,1)に保存する。第9ステップで、P(2,1)の値をP(1,1)に移す。P(1,1)は第1段階に位置するゲートの入力値を保存する変数である。第10ステップで、一次事象“4”の発生確率をP(2,1)に保存する。

以上のような手順を繰り返し、第21ステップに至ることにより、頂上事象発生確率の値が 4.569×10^{-4} と求まる。

図4-4に最小カット・セットを求める場合の手順を示す。この手順は、図4-3の手順と類似しているが、

更に、カット・セットを構成する一次事象番号及びカット・セットの発生確率も記憶している。
第1ステップは、入力データの第一行の読み込みで

ある。第2ステップにおいて、一次事象“1”の発生確率 (1.0×10^{-2}) を P(2,1) に保存し、一次事象番号“1”を N(2,1) に保存する。変数 N(1,m,n) は、

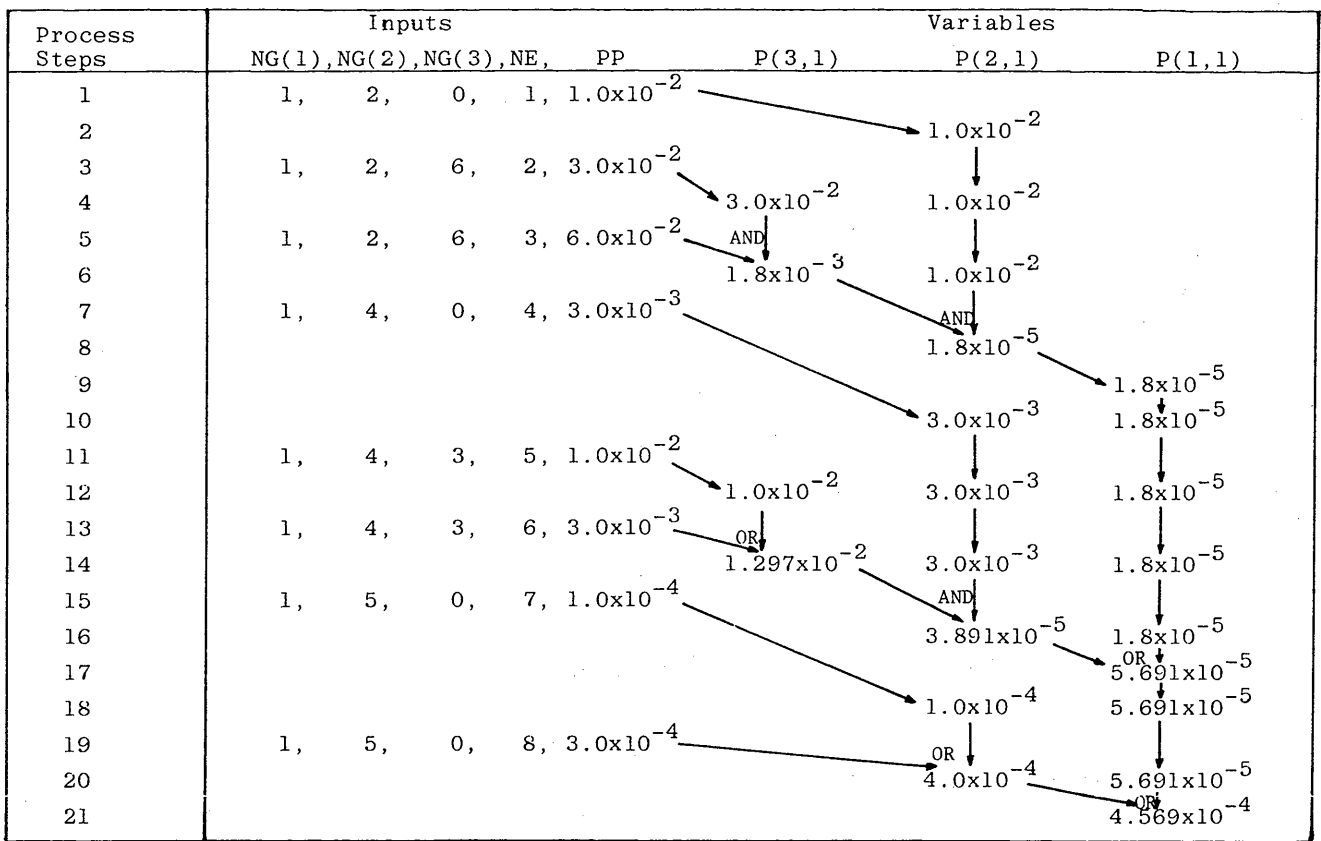


図4-3 計算手順 (頂上事象発生確率のみを求める場合)

Process Steps	Inputs					Variables					
	NG(1)	NG(2)	NG(3)	NE	PP	N(3,J,K),P(3,K)		N(2,J,K),P(2,k)		N(1,J,K),P(1,K)	
1	1	2	0	1	1.0×10^{-2}						
2								1,0,0, 1.0×10^{-2}			
3	1	2	6	2	3.0×10^{-2}						
4						2,0,0, 3.0×10^{-2}		1,0,0, 1.0×10^{-2}			
5	1	2	6	3	6.0×10^{-2}						
6						AND ↓					
7	1	4	0	4	3.0×10^{-3}	2,3,0, 1.8×10^{-3}		1,0,0, 1.0×10^{-2}			
8								AND ↓			
9								1,2,3, 1.8×10^{-5}			
10						4,0,0, 3.0×10^{-3}		1,2,3, 1.8×10^{-5}			
11	1	4	3	5	1.0×10^{-2}						
12						5,0,0, 1.0×10^{-2}		4,0,0, 3.0×10^{-3}		1,2,3, 1.8×10^{-5}	
13	1	4	3	6	3.0×10^{-3}						
14						5,0,0, 1.0×10^{-2} 6,0,0, 3.0×10^{-3}		4,0,0, 3.0×10^{-3}		1,2,3, 1.8×10^{-5}	
15	1	5	0	7	1.0×10^{-4}			AND ↓			
16								4,5,0, 3.0×10^{-5} 4,6,0, 9.0×10^{-6}		1,2,3, 1.8×10^{-5}	
17										1,2,3, 1.8×10^{-5} 4,5,0, 3.0×10^{-5} 4,6,0, 9.0×10^{-6}	
18						7,0,0, 1.0×10^{-4}				1,2,3, 1.8×10^{-5} 4,5,0, 3.0×10^{-5} 4,6,0, 9.0×10^{-6}	
19	1	5	0	8	3.0×10^{-4}						
20						7,0,0, 1.0×10^{-4} 8,0,0, 3.0×10^{-4}				1,2,3, 1.8×10^{-5} 4,5,0, 3.0×10^{-5} 4,6,0, 9.0×10^{-6}	
21										1,2,3, 1.8×10^{-5} 4,5,0, 3.0×10^{-5} 4,6,0, 9.0×10^{-6} 7,0,0, 1.0×10^{-4} 8,0,0, 3.0×10^{-4}	

図4-4 計算手順 (最小カット・セットを求める場合)

1段階目に位置するゲートのn番目の入力(カット・セット)を構成するm番号の一次事象の番号を記憶する変数である。今の場合、 $N(2,2,1)$ 、 $N(2,3,1)$ には、初期値0が与えてある。

第4ステップで、一次事象“2”の発生確率(3.0×10^{-2})を $P(3,1)$ へ、一次事象番号(“2”)を $N(3,1,1)$ 保存する。

第6ステップで、 $P(3,1)$ と一次事象“3”の発生確率の積を計算し、それを再び $P(3,1)$ に保存する。 $N(3,m,1)$ の値は、 $P(3,1)$ が事象“2”と“3”の積を記憶していることを示している。

第8ステップで、事象“1”、“2”、“3”の積を $P(2,1)$ に保存する。

第14ステップで、事象“6”の発生確率を $N(3,1,2)$ に保存する。この場合、 $N(3,m,n)$ と $P(3,n)$ は、第3段階に位置するゲートの入力が事象“5”と“6”であり、それらの発生確率がそれぞれ、 1.0×10^{-2} と 3.0×10^{-2} であることをあらわしている。

第16ステップで、事象“4”と“5”の発生確率の積が $P(2,1)$ に保存され、事象“4”と“6”の発生率の積が $P(2,2)$ に保存される。これらは、第2段階に位置するゲートの出力となっているので、第17ステップで、それらの値が、それぞれ、 $P(1,2)$ と $P(1,3)$ に移される。それに伴い、事象番号“4”、“5”と“4”、“6”はそれぞれ、 $N(1,1,2)$ 、 $N(1,2,2)$ 、 $N(1,1,3)$ 、 $N(1,2,3)$ へと移される。

以上の手順を続けることにより、第21ステップにおいて、頂上事象への入力が求まる。

第21ステップにおける $N(1,m,n)$ の値から最小カット・セット(Minimal Cut Sets, M.C.S.と略記)は次のように求める。

$$M. C. S. = \{X_1, X_2, X_3\}, \{X_4, X_5\}, \{X_4, X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\} \quad (4.16)$$

最小カット・セットの発生確率は、変数 $P(1,1)$ から $P(1,5)$ に記憶されている。頂上事象発生確率は、(4.13)式により 4.569×10^{-4} と求まる。

前節における C_i 、 $P(C_i)$ の情報は、図4-4からわかるように、変数 $N(1,m,n)$ 、 $P(1,n)$ に記憶されている。 $N(1,m,n)$ には、カット・セット C_i を構成する一次事象の番号が記憶されているわけである。

以上で解析は終了し、結果が出力される。解析結果は、フォールト・ツリーの構造、一次事象の名称、一次事象の発生確率、頂上事象の発生確率、及び、必要

に応じて、最小カット・セットとその発生確率のリストより成る。

4.7 解析実施例, WAM-BAM, WAM-CUTコードとの比較

4.7.1 解析対象

解析対象として、6種のフォールト・ツリーを選んだ。第1番から4番まではRRS⁽¹⁹⁾に記載されているフォールト・ツリーであり、それぞれ、(1) TEST1、(2) 格納容器スプレイ系(Containment Spray Injection System, CSIS)、(3) 影響緩和系(Consequence Limiting Control System, CLCS)、(4) 苛性ソーダ添加系(Sodium Hydroxide Addition System, SHAS)である。

第5番目のフォールト・ツリーは渡辺ら⁽³⁶⁾により解析されたBWR炉心スプレイ系のポンプ起動信号発生回路系(Initiation Signal Circuit for Core Spray, ISCCS)に関するフォールト・ツリーである。

第6番目は、Worrell et al.⁽³⁷⁾によって取り上げられた複雑フォールト・ツリー(Complex Fault Tree, CFT)である。

これらのフォールト・ツリーの構造について表4-1にまとめて示した。また、図4-5(a)~(f)に、図4-2の表現方式によるフォールト・ツリーの構造を示す。図4-5(e),(f)において、一次事象番号が記入されておらず、途中のゲート番号までしか書いてない表記方法が見られるが、これは、既に出現したゲートを繰り返して記述するのを避けるための表記法である。例えば、図4-5(e)の42行目は、5列目の27番のゲート番号で終了している。これは、図中、15行目から37行目までにあらわれている27番のゲートが再びこの位置に存在することを意味し、しかも、このゲートより下位には、15行目~37行目の既出の構造とまったく同一のゲート、一次事象が存在することを意味している。この表記法により、複雑なフォールト・ツリーの表現がより簡単となった。

4.7.2 解析条件及び結果

本プログラムによる解析の他に、FTA-J-BAM及びFTA-J-CUTコード⁽³⁸⁾によっても解析を実施し比較を行った。FTA-J-BAM, FTA-J-CUTコードは日本原子力研究所により整備されたコードで、基本的にはBAM⁽³⁹⁾, CUT⁽⁴⁰⁾コードと同じである。BAM, CUTコードは、多くの確率論的安全評価研究において、広く使用されているコードである。

表4-1 解析対象としたフォールト・ツリー

Tree Number	Tree Name	Number of Primary Events	Number of OR Gates	Number of AND Gates	Number of Replicated Events
1	TEST1	8	1	3	2
2	CSIS	18	3	5	1
3	CLCS	35	3	1	0
4	SHAS	48	3	5	0
5	ISCCS	83	15	7	22
6	CFT	34	23	18	27

TEST 1

1	0	7
1	0	6
1	0	1
1	0	8
1	6	2
1	6	4
1	8	3
1	8	4
1	10	2
1	10	5

CLCS

1	0	0	1
1	0	0	2
1	0	0	3
1	0	0	4
1	0	0	5
1	2	3	6
1	2	3	7
1	2	3	8
1	2	3	9
1	2	3	10
1	2	3	11
1	2	3	12
1	2	3	13
1	2	3	14
1	2	3	15
1	2	3	16
1	2	3	17
1	2	3	18
1	2	3	19
1	2	3	20
1	2	5	21
1	2	5	22
1	2	5	23
1	2	5	24
1	2	5	25
1	2	5	26
1	2	5	27
1	2	5	28
1	2	5	29
1	2	5	30
1	2	5	31
1	2	5	32
1	2	5	33
1	2	5	34
1	2	5	35

図4-5(a) フォールト・ツリー TEST1

CSIS

1	2	0	0	1
1	2	0	0	2
1	4	0	0	3
1	4	0	0	4
1	6	0	0	5
1	6	5	0	6
1	6	5	0	7
1	6	5	8	8
1	6	5	8	3
1	0	0	0	9
1	0	0	0	10
1	0	0	0	11
1	10	0	0	12
1	10	3	0	13
1	10	3	0	14
1	0	0	0	15
1	0	0	0	16
1	0	0	0	17
1	0	0	0	18

図4-5(b) フォールト・ツリー CSIS

図4-5(c) フォールト・ツリー CLCS

SHAS

1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	2
1	0	0	0	0	3
1	0	0	0	0	4
1	0	0	0	0	5
1	0	0	0	0	6
1	2	3	0	0	7
1	2	3	0	0	8
1	2	3	0	0	9
1	2	3	0	0	10
1	2	3	0	0	11
1	2	3	0	0	12
1	2	3	0	0	13
1	2	3	0	0	14
1	2	3	0	0	15
1	2	3	0	0	16
1	2	3	0	0	17
1	2	3	0	0	18
1	2	3	0	0	19
1	2	3	4	0	20
1	2	3	4	6	21
1	2	3	4	6	22
1	2	3	0	0	23
1	2	3	0	0	24
1	2	3	0	0	25
1	2	3	0	0	26
1	2	3	0	0	27
1	2	5	0	0	28
1	2	5	0	0	29
1	2	5	0	0	30
1	2	5	0	0	31
1	2	5	0	0	32
1	2	5	0	0	33
1	2	5	0	0	34
1	2	5	0	0	35
1	2	5	0	0	36
1	2	5	0	0	37
1	2	5	0	0	38
1	2	5	0	0	39
1	2	5	0	0	40
1	2	5	8	0	41
1	2	5	8	10	42
1	2	5	8	10	43
1	2	5	0	0	44
1	2	5	0	0	45
1	2	5	0	0	46
1	2	5	0	0	47
1	2	5	0	0	48

図4-5(d) フォールト・ツリー SHAS

参考文献(37)においては、フォールト・ツリーの基本事象に対して故障データを与えていないため、本解析においては適当な値を割り当てて解析を実施した。

頂上事象発生確率は、(4.13)式、つまり、第2次近似により計算した。また、最小カット・セットは、一次事象についての6次以上の高次項は除外し、打ち切り値は、頂上事象発生確率値の 10^{-6} 倍の値とした。

BAMコードは、頂上事象発生点推定値を計算する。CUTコードは、最小カット・セットと頂上事象の点推定値を求める。

TEST 1, CLCSのツリーについては、フォールト・ツリー中の3個のゲートについても最小カット・セットを求め、その他のフォールト・ツリーに対しては、7個のゲートについて最小カット・セットを求めた。

WAMコードによる事前の処理をBAM, CUTコードの実行の前に実施した。

解析の結果を表4-2に示す。表中、FFTA-TPは本プログラムにより頂上事象発生確率のみを計算した場合で、FFTA-MCSは最小カット・セットと頂上事象発生確率を求めた場合を意味している。

頂上事象発生確率は、FTA-J-BAMにより得られた値を記載してある。他の解析コードの結果では、第1番のフォールト・ツリーに対し、FFTAは 6.468×10^{-3} の値を、3番に対し、FFTA-MCSは 6.447×10^{-4} の値を、2番に対し、FTA-J-CUTは 2.063×10^{-2} の値を与えたが、その他の組み合わせに対しては、すべて表中の値と同じであった。

計算時間にはWAMコードの処理時間は含まれていない。図4-6に所要計算時間を示し、相互の比較を容易とした。

4.8 頂上事象発生確率計算方法の精度

本章で示した高速フォールト・ツリー解析プログラムでは、4.5節の近似方法を頂上事象の計算に用いている。実際のシステムを対象としたフォールト・ツリーでは、大きな発生確率を示す基本事象が比較的少数存在しており、それらが主として頂上事象の値を支配している。このような場合は、前節の解析実施例で示したように実用上十分な精度で頂上事象の値が得られている。前節で比較のため用いたFTA-J-BAMコードは真理表を用いた計算方法であり、頂上事象の値としては正しい値を与える。6ケースのフォールト・ツリー計算例では、有効数字4桁において、FFTA-TP

ISCCS (1)

1	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	2
1	0	0	0	0	0	3
1	0	0	0	0	0	4
1	0	0	0	0	0	5
1	0	0	0	0	0	6
1	0	0	0	0	0	7
1	0	0	0	0	0	28
1	0	0	0	0	0	29
1	4	17	0	0	0	57
1	4	17	0	0	0	58
1	4	17	0	0	0	59
1	4	17	0	0	0	60
1	4	17	0	0	0	61
1	4	17	27	0	0	62
1	4	17	27	0	0	63
1	4	17	27	14	21	71
1	4	17	27	14	21	72
1	4	17	27	14	21	73
1	4	17	27	14	21	74
1	4	17	27	14	21	75
1	4	17	27	14	23	76
1	4	17	27	14	23	77
1	4	17	27	14	23	78
1	4	17	27	14	23	79
1	4	17	27	14	23	80
1	4	17	27	12	19	64
1	4	17	27	12	19	65
1	4	17	27	12	19	66
1	4	17	27	12	19	67
1	4	17	27	12	19	68
1	4	17	27	12	25	69
1	4	17	27	12	25	70
1	4	17	27	12	25	81
1	4	17	27	12	25	82
1	4	17	27	12	25	83
1	4	2	5	0	0	30
1	4	2	5	0	0	31
1	4	2	5	0	0	32
1	4	2	5	0	0	33
1	4	2	5	0	0	34
1	4	2	5	27		
1	4	2	7	0	0	35
1	4	2	7	0	0	36
1	4	2	7	10	29	42
1	4	2	7	10	29	43
1	4	2	7	10	29	44
1	4	2	7	10	29	45
1	4	2	7	10	29	46

ISCCS (2)

1	4	2	7	10	13	47
1	4	2	7	10	13	48
1	4	2	7	10	13	49
1	4	2	7	10	13	50
1	4	2	7	10	13	51
1	4	2	7	6	9	37
1	4	2	7	6	9	38
1	4	2	7	6	9	39
1	4	2	7	6	9	40
1	4	2	7	6	9	41
1	4	2	7	6	15	52
1	4	2	7	6	15	53
1	4	2	7	6	15	54
1	4	2	7	6	15	55
1	4	2	7	6	15	56
1	8	11	0	0	0	8
1	8	11	0	0	0	9
1	8	11	0	0	0	10
1	8	11	0	0	0	11
1	8	11	0	0	0	12
1	8	11	0	0	0	13
1	8	11	0	0	0	14
1	8	11	0	0	0	15
1	8	11	0	0	0	16
1	8	11	0	0	0	17
1	8	3	0	0	0	18
1	8	3	0	0	0	19
1	8	3	0	0	0	20
1	8	3	0	0	0	21
1	8	3	0	0	0	22
1	8	3	0	0	0	23
1	8	3	0	0	0	24
1	8	3	0	0	0	25
1	8	3	0	0	0	26
1	8	3	0	0	0	27

図4-5(e) フォールト・ツリー ISCCS

CFT

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

図4-5(f) フォールト・ツリー CFT

表4-2 解析結果及び所要計算時間

Fault Tree Number	Point Probability of Top Event	Number of Minimal Cut Sets Determined	CPU Time (sec)			
			FFTA-TP	FFTA-MCS	FTA-J-BAM	FTA-J-CUT
1	6.469×10^{-3}	8	0.005	0.007	1.56	1.75
2	2.062×10^{-2}	13	0.006	0.011	2.77	5.95
3	6.449×10^{-4}	155	0.009	1.06	4.63	615.
4	2.055×10^{-4}	300	0.009	3.90	6.40	4459.
5	7.545×10^{-3}	73	0.134	1.06	10.71	3108.
6	1.211×10^{-4}	20	0.71	0.81	6.47	240.

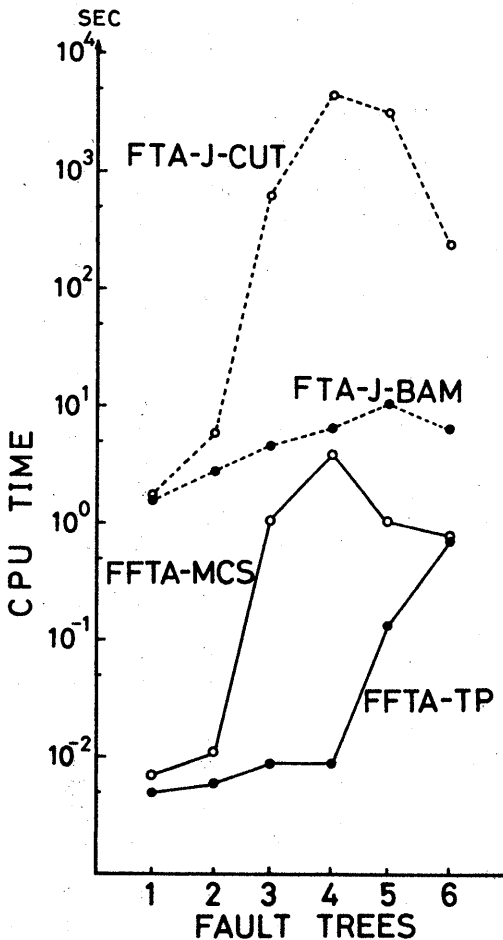


図4-6 所要計算時間

とBAMによる計算結果が一致していた。

基本事象の値がすべて同じ値となった極端な場合は、各基本事象間の二次、三次の積の組み合わせが、各々すべて同等の重みで頂上事象の値に寄与してくる。このような場合、本プログラムの近似方法で、頂上事象の値としてどの程度の精度が得られるかを調べ、一般に、実際のシステムに対して使用する際の誤差の上限の目安を求めることとする。

検討対象としては、前節で用いた6種のフォールト・ツリーを本節でも用い、基本事象の発生確率としては、すべて 3×10^{-3} を与えた。

表4-3に、本プログラムによる計算結果と、FAT-J-BAMコードによる計算結果を示す。なお、FFTAの計算は2次までの近似方法とし、オプションとして与えてある3次までの近似方法は適用しなかった。

表4-3の結果よりわかるように、1~4のフォールト・ツリーのように反復事象を含まないか、含んでいる場合でも1,2個で単純な構造のフォールト・ツリーに対しては有効数字5桁において、まったく同一の結果が得られた。

5,6番の反復事象を多数含んだ複雑なフォールト・ツリーに対しても、FFTAによる計算結果の誤差は0.1%以下であり、本章で示したFFTAの近似方法は、2次近似まででも、実用上十分な精度を持っていることが確認できた。

4.9 考察

図4-6によると、本解析プログラムの計算所要時間は、BAMあるいはCUTコードの計算時間と比較し、非常に少ないことがわかる。

第1番と2番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPとFFTA-MCSの計算所要時間は近い値となって

表4-3 頂上事象発生確率計算値の比較

Fault Tree Number	Point Probability of Top Event	
	FFTA	WAM-BAM
1	1.1973×10^{-2}	1.19727×10^{-2}
2	2.6713×10^{-2}	2.67133×10^{-2}
3	1.6823×10^{-2}	1.68232×10^{-2}
4	2.0587×10^{-2}	2.05875×10^{-2}
5	5.5439×10^{-2}	5.54432×10^{-2}
6	9.0539×10^{-6}	9.0515×10^{-6}

いる。これは、これら2つのフォールト・ツリーは小サイズのフォールト・ツリーであり最小カット・セットの数もわずか8及び13であるため、最小カット・セットが少ない計算時間で容易に見つけられるためである。

第3番と4番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPとFFTA-MVSの計算所要時間の間に大きな差がある。これは、これらのフォールト・ツリーが中サイズのフォールト・ツリーであり、最小カット・セットの数も155及び300と多いため、最小カット・セットを見つけ出すのに計算時間がかかるためである。一方、フォールト・ツリーの構造は、反復事象が一つもないことからわかるように、単純である。この場合、頂上事象発生確率を計算する本プログラムの手順は、特に計算時間の短縮に有効となっている。

第5番と6番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPによる計算所要時間が増大し、FFTA-MCSによる所要時間に近づいている。これらのフォールト・ツリーの構造は複雑であり、反復事象が多く存在する。それ故、FFTA-TPの場合でも、反復事象を含んだカット・セットを解析途中において多く求める必要があり、結局、FFTA-MCSで実施する手順と、ほとんど同じことを実施することとなる。このためにFFTA-TPの計算所要時間がFFTA-MCSに近くなってしまった。

特に、第6番のフォールト・ツリーでは、FFTA-TPの計算所要時間が増大し、ほとんどFFTA-MCSに等しくなっている。しかし、原理的に、FFTA-TP

の計算が、FFTA-MCSの計算時間より多くなることはない。また、このFFTA-TPの計算所要時間は、それでも、BAMの所要時間の約1/10となっている。

フォールト・ツリー解析の高速処理が可能となった理由としては以下のことが挙げられる。

1. 一次事象、ゲートに整数を割り当て、計算機内での取り扱いはこの整数値によった。
2. フォールト・ツリー構造を、上記整数を用い、数字の並びにより表現した。この表現方法は、計算機内での処理と良く適合している。
3. 解析実行時、計算機のコア・メモリを有効に使用し、外部記憶装置を使用していない。
4. 数値計算を可能な限り初期の時点で実行してしまう。
5. 各処理段階において不要な情報は切り捨てていく。たとえば、一次事象の高次の積からなるカット・セット、発生確率の低いカット・セット等は、途中のゲートにおいて、可能な限り除いていく。

また、頂上事象の値の計算において導入した近似方法及び各ゲートにおける処理方法で、前節に示したように、実用上十分な精度で頂上事象の値が得られることが確認できた。

4.10 結 論

本章で説明した解析プログラムにより、フォールト・ツリー解析が、BAM, CUTコードに比較し、10～1000倍の高速で実施でき、頂上事象の値も、実用上十分な精度で得られることが示された。

この高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発により、フォールト・ツリー解析が、高速・大型計算機システムを用いずとも手軽にできるようになり、確率論的安全評価解析が今まで以上に容易に実施できるようになった。

特に、第三章で示した信頼性解析プログラムにとっては、この高速フォールト・ツリー解析プログラムの存在は必須の条件といえる。つまり、多数回のフォールト・ツリー解析の実施を行うため、既存の解析プログラムでは計算所要時間が非現実的な程長くなってしまった。この高速フォールト・ツリー解析プログラムの導入（図3-7の構成図の中のTOPに組み込まれている。）によりの信頼性解析プログラムの計算時間は現実的なものとなった。

この高速フォールト・ツリー解析プログラムの活用により、更に新しい機能の信頼性解析方法の開発、実現の途が開けたと言える。

5. GO-FLOW 手法

5.1 緒言

第二章の各種事故状態下におけるシステムの信頼性解析、及び第三章の信頼性解析プログラムの中心は、いずれも、フォールト・ツリー解析であった。フォールト・ツリー解析は確立された信頼性解析手法として、確率論的安全評価において幅広く用いられてきている。それ故、第四章においては、高速フォールト・ツリー解析プログラムを開発し、フォールト・ツリー解析の応用範囲の拡大の途を拓いた。

しかし、フォールト・ツリー解析には、解析対象、解析すべき内容等によっては、必ずしも使い易くない点もある。これらの点を補う信頼性解析手法としてGO手法⁽⁴¹⁾がある。GO手法は、フォールト・ツリー解析に置き換え得ると共に、フォールト・ツリー解析では不可能であった種類の解析も実施できる。

著者はこのGO手法に着目しその解析⁽⁴²⁾を実施してきたが、GO手法においても、なお、不十分な点があることがわかった。そこで、GO手法を発展させた、GO-FLOW手法⁽⁴³⁾の開発を行った。本章では、このGO-FLOW手法について述べることとする。

以下、GO-FLOW手法開発の経緯、GO手法の説明、GO-FLOW手法概説、GO-FLOW手法による具体的計算方法、解析例の順に述べていくこととする。更に比較のため、附録に、GO手法のオペレータの定義、GO

手法による解析実施例を収録した。

5.2 GO-FLOW 手法開発の経緯

フォールト・ツリー解析においては、頂上事象として、システムの特定の一つの事象しか選定できないこと、フォールト・ツリー作成には、解析者の熟練を要し、作成されたフォールト・ツリーに論理的な欠陥がないことを確認することが難しい等の問題点がある。

これらの問題点を補う解析方法としてGO手法がある。GO手法は1960年代中期に米国のKAMAN SCIENCES社⁽⁴⁴⁾が開発し、軍事産業、航空機産業の分野で主に電気回路の信頼性解析に用いられ、最近原子力の分野への適用⁽⁴⁵⁾がなされるようになってきた。

GO手法では、計算コード内部で特別に定義された16種の標準オペレータを用いて解析対象とするシステムのモデルを構築する。このモデルとして作成されるGOチャートは、解析対象とするシステムの構成と視覚的に対応しており、解析モデルの作成がより機械的に遂行でき、作成したモデルの妥当性を検討することが容易である。また、GO手法ではシステムの取り得るいくつかの状態をひとつのモデルで同時に解析できるという利点がある。

このGO手法を、配管系である原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析に適用⁽⁴²⁾した結果、なお問題点の残ることが判明した。つまり、GO手法においては、On-to-OffかあるいはOff-to-On信号の流れを追って、解析対象のシステムの状態が変化する時点がどこにあるかを調べている。ところが、非常用崩壊熱除去系は、最初待機状態に置かれ、作動要求時に動作を開始し、動作の時間経過と共に故障を起し、機能停止に至る。システムの状態は、Off→On→Offと推移するわけであり、この推移はGO手法によって直接的には取り扱い不可能である。定期点検、保守を考慮に入れた、システムのアンアベイラビリティを求める事も同様の理由からGO手法では実施できない。また、時間経過に伴う系の故障確率の推移を求めることも、同種の解析手続きを多数繰り返す必要があり手数がかかる。

そこで、GO手法を基本としその特長を生かしたままGO手法に於ける限界を克服するため、GO-FLOW手法を開発した。この手法は、チャートによるシステム表現方法、信号の流れを追うという解析方法においてGO手法と類似しているが、信号の意味、タイム・ポイントの取り方、定義されているオペレータの機能

は GO 手法とは本質的に異なる体系である。

この手法は、特に配管系の様な流れを扱う系の解析に適している点、及び、信号の意味が、流れそのものをモデル化したイメージを持っている点から、GO-FLOW 手法と呼ぶこととする。

5.3 GO 手法の特長及び限界

GO 手法とは系の信頼性を解析する一方法であり、GO 手法により系の動作成功及び動作失敗の確率値をひとつのモデルで同時に解析することができる。

GO 手法においては、まず、系の構成、機能をモデル化した GO チャートを作成する。GO チャートはコード（プログラム）内部で定義された16種類の標準オペレータ及びそれらを結ぶ信号線より成り立っている。標準オペレータの中には、フォールト・ツリーで用いられる AND ゲート、OR ゲートをあらわすオペレータがある。さらに、これらの論理機能のオペレータの他に、時間遅れ、スイッチ機能、基本事象等もオペレータとしてモデル化されている。信号線は情報の流れが伝わって行く経路を示している。

次に、系の各構成機器の故障率データを用い、GO オペレータの動作モード（動作成功、動作失敗など）毎に各々の発生確率を定め、入力データとする。これらはフォールト・ツリー解析における基本事象の発生確率に対応している。

更に、系の動作モードに対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントを定義する。このタイム・ポイントは実際の時刻を表わしているわけではないが、実時刻との対応はついている。従って、タイム・ポイントの順序は実際の時刻順序通りとなっている。タイム・ポイントは、0,1,2,3,...と番号付けられている。タイム・ポイント0は実際の系の動作に先立つ仮想的時刻をあらわし実時刻との対応はない。また、タイム・ポイントの最大値は“Never”あるいは“無限大時刻”をあらわし、要求された動作が実現されない系の状態をあらわすのに用いる。これも実時刻との対応はない。各タイム・ポイントにおいて信号が発生したり、オペレータの各種動作が実施される。これらの情報は GO チャート作成の際に同時に与えておく。

GO コードは大別すると、GO コード群と FF コード群に分かれており、GO コード群で、系の特定の動作状態の発生確率を求める。ここに用いられている計算のロジックは、フォールト・ツリー解析プログラム WAM-CUT⁽⁴⁹⁾で用いられているロジックと同じもの

である。FF コード群においては、指定した事象（系の動作成功、動作失敗等）を構成するフォールト・セットを見つけ出す (Fault Set Finder) ことと、特定の基本事象の発生確率を変えて、感度解析を実施することができる。

以上概説した GO 手法は以下のような長所を持っている。

体系をモデル化した GO チャートは、システムの P&I ダイアグラム、シーケンスダイアグラム等と視覚的に対応させることが可能であり、解析対象のモデル化がより機械的に実行できる。それ故、GO チャート作成の際解析者の恣意が入りにくく、作成に要する時間が短くて済む。更に GO チャートの理解、再検討が容易で、GO チャートの正当性を確認しやすい。

GO 手法では各構成要素の成功/失敗状態の任意の組み合わせからなる体系のすべての可能な動作、非動作状態をあらわすことができる。それにより、フォールト・ツリー解析とは異なり、系のすべての状態の発生確率を一つの GO チャートで同時に求めることができる。このことは、系の Failure 状態だけでなく、Success 状態あるいは Premature 状態も調べられることを意味している。

解析対象の系の構造が、設計変更等により変化した場合は、対応するオペレータ、信号線を GO チャートにおいて追加、削除するだけで良い。そのため、設計変更に対する対応は大変容易であり、常に最新の状況に対応した解析結果が得られる。更に、フォールト・セットを見つけ出せるため、不確実な解析をそのまま続けて実行できる。

以上の特長を持つ GO 手法を用いて原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を実施した結果、多くの長所にもかかわらず、まだ実際の解析においては、GO 手法には問題点の残ることが判明した。

まず、GO 手法における信号は、“On-to-Off”あるいは、“Off-to-On”信号を意味している。それ故、GO 手法においては、系の状態の、On から Off あるいは、Off から On への変化が、どの時刻にどれだけの確率で発生するかを調べている。例えば、“Off-to-On”信号を追うことは、Demand により系が起動する確率を求めることに対応している。タイム・ポイント“0”から“∞”までの信号発生確率の和は0.1であり、タイム・ポイント“∞”における信号発生の確率は、Demand による起動が失敗し、系が On 状態にならない確率を意味している。GO 手法では、系の状態が単

に1回変化する場合を取り扱っている。そのため、系の状態がOffからOnになり、更に他の指令でOffになるような、Phased Mission Problemに見られる動作モードの切替を供う系の解析は、このままでは実行不可能である。

また、GO手法における、基本事象データはすべて、発生確率値で与えてあり、発生率ではない。それ故、例えば、非常用崩壊熱除去系が起動開始後に時間経過と共に故障により停止する確率を求めることは容易ではない。この計算のためには、例えば、10時間後、20時間後、50時間後、…における機器の故障確率をそれぞれ求め、それらを、オペレータに対する入力データとして与え、各々の場合について解析を繰り返す必要がある。

5.4 GO-FLOW手法の概略

GO-FLOW手法は、GO手法に於ける限界を克服するために開発した、システム信頼性解析の一手法である。GO-FLOW手法により系の取り得るすべての動作状態あるいは非動作状態の確率値を一つのモデル(GO-FLOWチャート)で、一度の計算により求めることができる。

GO-FLOE手法においては、系の構成、機能をモデル化したGO-FLOWチャートを作成する。GO-FLOWチャートは標準オペレータ及びそれらを結ぶ信号線より成り立っている。

オペレータの動作モードに対し各々の発生確率をデータとして与え、オペレータの定義に基づいて信号を処理していくことにより、最終的に系の動作/不動作確率を求めることができる。

5.4.1 信号の意味

GO-FLOW手法に於ける信号の意味はGO手法とは異なり、配管中の流体の流れ、電流、情報、指令等を意味しており、状態の変化(On-to-Off信号あるいはOff-to-On信号)を意味するものではない。信号が物理的な流れをあらわしている場合には、“信号の存在”とは“物理的な流れの存在”ということになるが、GO-FLOWにおいては、“物理的な流れの存在”を次のように拡張して考える。つまり、“ある場所における流体の流れの存在”とは、下流の配管の流路抵抗が零になった場合にその場所において流体が流れることを意味すると考える。同様に、“電流の存在”は、現に電流が流れている場合だけでなく、下流の電気抵抗が零になった場合に電流が流れることをも意味す

る。

“信号の存在”とは、GO-FLOWにおいては、実際に流体なり電流なりが流れていることだけでなく、流れる可能性を持っていることをも意味している。物理的な流れが実際に流れるためには、流路抵抗が駆動力より小にならなくてはならない。例えば、直列配管の途中一箇所の弁が閉じていると、流路全域にわたり流体は流れないが、GO-FLOW手法においては閉じられた弁の上流側においては、“信号は存在する(弁が開けば流体を流す能力を持っている)”と考え、下流においては、“信号は存在しない(更に下流にある弁を開いても流体は流れない)”と考える。

5.4.2 タイム・ポイント

系の動作の進行に対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントが定義される。タイム・ポイントは実際の時刻を表わしているわけではなく、前後関係が、実際の時間経過と同一となっていればよい。

タイム・ポイントは1から始まる整数値で番号づけられている。タイム・ポイント1は、通常、系の動作の開始に先立つ時刻を表わす。タイム・ポイントの総数は、解析対象の動作モードをあらわすために必要な時間の区切りの数によって定まり、解析者が指定する量である。GO-FLOWにおいては、GO手法とは異なり、“ ∞ (never)”に対応するタイム・ポイントを与える必要はない。

5.4.3 オペレータ機能概略

以上の信号の意味、タイム・ポイントの取り方をもとに、各機能の動作、論理機能等をモデル化したオペレータがGO-FLOWにおいては定義されている。

オペレータは基本的には、GO手法と同様に主入力信号S、副入力信号P、出力信号Rの三種の入出力信号を持っている。信号発生器をあらわすオペレータ(タイプ25)は出力信号のみ、ORゲートをあらわすオペレータ(タイプ22)は主入力信号と出力信号のみを持っているように、必ずしもすべてのオペレータが三種の入出力信号を持っているわけではない。

オペレータの機能は次の三つの基本原則により支配されている。

- (1) タイム・ポイントtにおける主入力信号S(t)は出力信号R(t)にのみ影響する。
- (2) タイム・ポイントt以前に入力した全ての副入力信号P(t') ($t' \leq t$)は出力信号R(t)に影響を及ぼす。
- (3) タイム・ポイントt以後に入力される副入力

信号 $P(t'')$ ($t'' > t$) は出力信号 $R(t)$ には何らの影響も及ぼさない。

5.4.4 信号の強度

信号には、“強度”という量が伴っている。主入力信号は主として物理的な流れを表わしており、“強度”は信号の存在する確率に対応している。それ故、主入力信号の強度は必ず1.0以下でなくてはならない。

例えば、信号#6がタイム・ポイント5において、0.8の強度を持つことは次のように解釈される。冷却水の流れ(信号#6)が配管中を時刻 t_5 (タイム・ポイント5)において流れているか、流れる可能性を持っている確率が0.8(強度0.8)であり、0.2の確率 ($1.0 - 0.8 = 0.2$) で流れておらず流れる可能性も持っていない。

一方、時間経過に伴う機器の故障をモデル化したオペレータ(タイプ35, 37, 38)の副入力信号は、時間経過量を表わすために用いているため、信号の強度は1.0以下である必要はない。逆に、この場合は、最小単位量(単位時間間隔)の整数倍の値を取ることが多い。

一つの信号線が分岐して、同時に複数のオペレータの入力信号となる時は、それぞれは互に独立な信号とはならないことに注意する必要がある。つまり、分岐したそれぞれの系統の信号線が、ANDオペレータや、ORオペレータにより結合される場合は、お互いの従属性を考慮に入れなければならない。詳しい取扱い方法の説明は5.6節において与える。

GO手法においては、任意の信号線における信号の発生確率を全てのタイム・ポイントにわたり加え合せた場合1.0になる必要があったが、GO-FLOW手法においては、信号の意味から明らかなように、強度の和が1.0になる必要はない。

5.4.5 解析手順

解析の手順は、基本的にはGO手法と類似しているが、細部において異なっている。

信号の発生源(タイプ25のオペレータ)から出発し、順次信号の流れの方向に沿って計算を実施していく。各オペレータの機能に従い、主、副入力信号から、出力信号を求め、これを次に位置するオペレータの入力信号とする。この手順を繰り返すことにより、最後に、最終出力信号(系の動作状態を判断する信号)のすべての時刻(タイム・ポイント)における強度を求めることができる。

より詳細な、具体的計算の実施例は、第6節にお

けるサンプル問題において示す。

5.5 標準オペレータ

本節では、GO-FLOW手法において定義されている標準オペレータの機能を、各タイプ毎に説明する。

GO手法においては、16種類の標準オペレータが定義されており、それらに、1~17の番号(タイプ4は欠番)が付けられている。(附録1, 参照)

GO-FLOW手法においても、各オペレータに番号付けを行っているが、GO手法におけるオペレータとの混同を避けるため、20番より大きな番号を与えてある。図5-1にGO-FLOWチャートにおける記号表現の一覧を、また、表5-1には標準オペレータの機能の定義式を示す。

以下の各節において、各オペレータの一般的説明、入出力信号強度のグラフを用いた機能の説明、モデル化の対象となる具体的機器、その他のコメント等を与える。また以下の各節において共通に使用されている記号には次のものがある。

$R(t)$: タイム・ポイント t における出力信号強度。

$S(t)$: タイム・ポイント t における主入力信号強度。

$P(t)$: タイム・ポイント t における副入力信号強度。

P_g : 機器が正常に動作をする確率。

P_f : 機器が動作失敗をする確率。

P_p : 機器が早まった動作をする確率。

P_o : 弁が開指令により開動作を正常に行う確率。

P_c : 弁が閉指令により閉動作を正常に行う確率。

$O(t)$: タイム・ポイント t において弁が開状態にある確率。

5.5.1 オペレータ・タイプ21

このオペレータは、正常状態か故障状態を取る機器をモデル化している。GO手法におけるタイプ1のオペレータに対応している。図5-2にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。図中、横軸はタイム・ポイント、縦軸は入出力信号の強度であり、実線は入力信号、破線は出力信号をあらわす。

このオペレータは、系の動作開始以前に一定の確率で故障を起してしまっている機器を表現している。つまり、待機中に一定確率で故障してしまっている機器とか、系の動作開始に先立ち、一定確率で動作してしまう機器をあらわしている。例えば、 $P_g \approx 1.0$ の場合は、通常開のバルブが、 $(1.0 - P_g)$ の確率で詰まって

しまっている状態を、 $P_g \approx 0.0$ の場合は、通常閉のバルブが P_g の確率で開いてしまっている状態をあらわす。後者の例では P_g が故障確率の値に対応している。オペレータに与えるデータは P_g の値である。

5.5.2 オペレータ・タイプ22

このオペレータは、ORゲートをモデル化している。GO手法におけるタイプ2のオペレータに対応しているが機能は異なっている。図5-1の記号表現からもわかるよう、主入力信号が2つ以上存在し、副入力信号

は存在しない。図5-3にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。図中、実線及び一点鎖線は入力信号強度を示し、破線は出力信号強度を示す。

5.5.3 オペレータ・タイプ23

このオペレータは補集合を取る機能を持っている。つまり、入力信号が存在する場合は出力信号を発生せず、入力信号が存在しない場合に出力信号を発生する。信号の強度で考えると、入力信号強度が $S(t)$ の

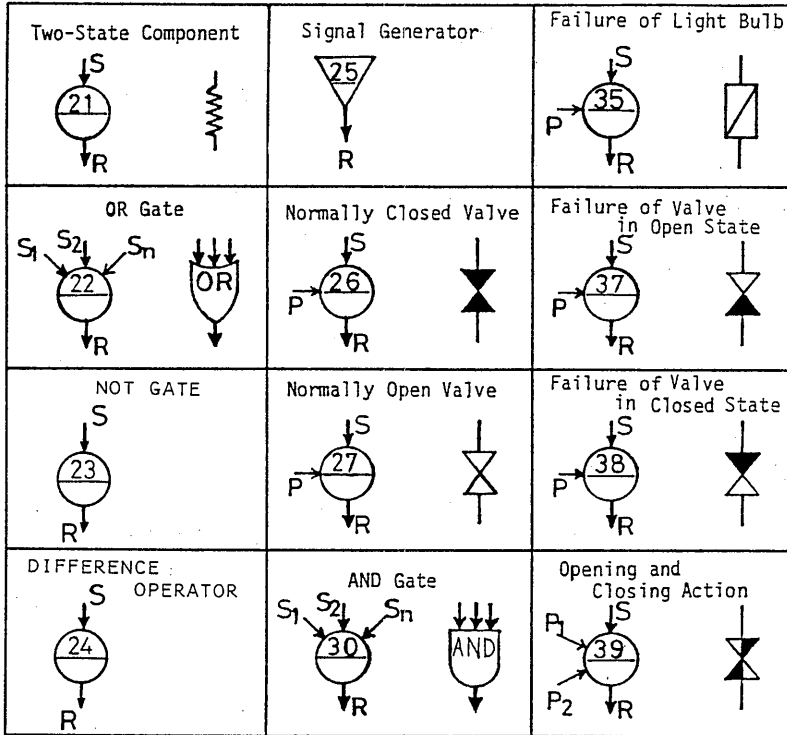


図5-1 標準オペレータの記号表現

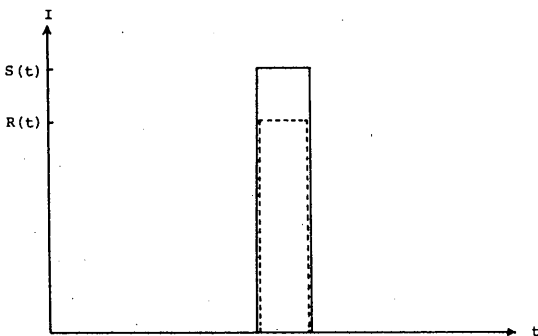


図5-2 タイプ21オペレータの機能

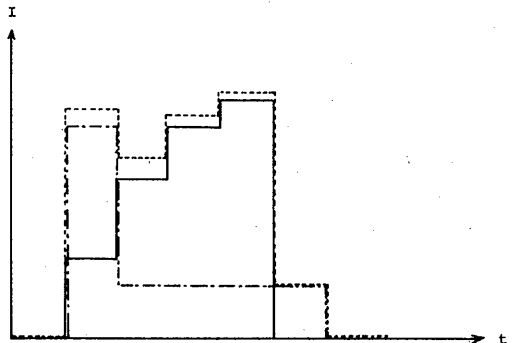


図5-3 タイプ22オペレータの機能

表5-1 標準オペレータの機能

Operator Type	Main Input Signal Intensity	Sub Input Signal Intensity	Output Signal Intensity
21	$S(t)$	-	$R(t)=S(t) \cdot P_g$
22	$S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$	-	Probability that at least one input signal exists.
23	$S(t)$	-	$R(t)=1.0-S(t)$
24	$S(t'), S(t)$	-	$R(t)=S(t)-S(t')$
25	-	-	Probability of a Demand, or Time Duration
26	$S(t)$	$P(t)$	$R(t)=\text{Min}\{ S(t), S(t) \cdot (P_p + \sum_{t_k \leq t} P(t_k) \cdot P_g) \}$
27	$S(t)$	$P(t)$	$R(t)=\text{Max}\{ 0.0, S(t) \cdot (1.0 - P_p - \sum_{t_k \leq t} P(t_k) \cdot P_g) \}$
30	$S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$		Probability that all the input signals exist.
35	$S(t_1), S(t_2), \dots, S(t_n)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots, P_2(t_n)$	$R(t)= S(t) \cdot \exp\{-\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \text{Min}\{1.0, \text{Min}[S(t_k), S(t_{k-1})]\}/S(t)\} - \lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} \frac{1}{2} P_i(t_k) \frac{\text{Min}\{S(t_k), S(t)\} - \text{Min}\{S(t_{k-1}), S(t)\}}{S(t)}\}$
37	$S(t)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots$	$R(t)=S(t) \cdot \exp\{-\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k)\}$
38	$S(t)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots$	$R(t)=S(t) \cdot (1.0 - \exp\{-\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k)\})$
39	$S(t)$	$P_1(t)$ $P_2(t)$	$R(t)=S(t) \cdot O(t), O(t)=O(t') + \{1.0 - O(t')\} \cdot P_1(t) \cdot P_o$ $R(t)=S(t) \cdot O(t), O(t)=O(t') \cdot \{1.0 - P_2(t) \cdot P_c\}$

P_g :Probability for successful operation. $O(t)$:Probability for valve in open state.

P_p :Probability for premature operation. P_o :Probability for valve successfully open.

P_c :Probability for valve successfully close. t' :Time point immediately before the timepoint t .

時、出力信号強度 $R(t)$ は $1.0 - S(t)$ となる。主入力信号と出力信号がそれぞれ一個存在し、副入力信号は存在しない。図5-4 にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

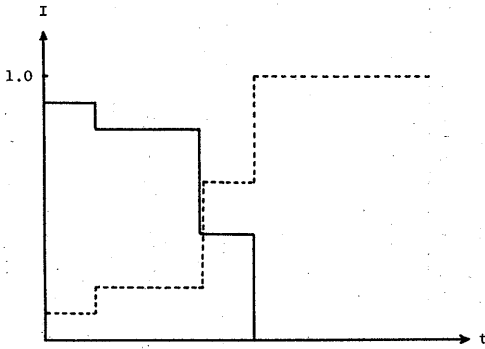


図5-4 タイプ23オペレータの機能

5.5.4 オペレータ・タイプ24

このオペレータは差分機能を持っている。タイム・ポイント t における出力信号は、タイム・ポイント $t-1$ における入力信号強度からのタイム・ポイント t における入力信号強度の増減量となる。それ故。出力信号強度は負の値を取ることもあり得る。また、タイム・ポイント 1 における出力信号強度は 0.0 と定義する。図5-5 にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

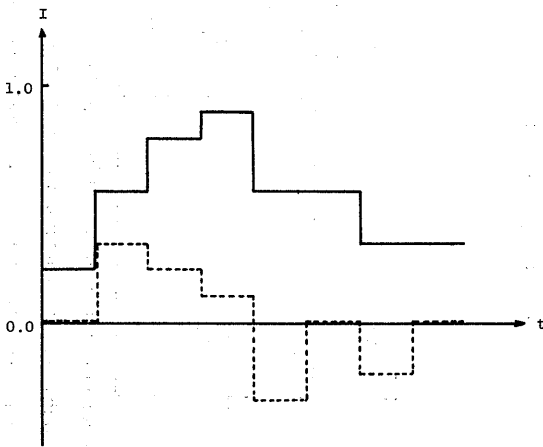


図5-5 タイプ24オペレータの機能

5.5.5 オペレータ・タイプ25

このオペレータは信号発生器をあらわす。GO 手法におけるタイプ 5 に対応する。

通常一つのタイム・ポイントにおいて信号を発生する場合を取り扱うが、複数のタイム・ポイントにおいて次々と信号を発生する場合も取り扱える。

解析対象とする系の外部からの信号、指令に用いる場合が多い。また、各機器の動作の制御、時間経過量を表現する場合にも用いられる。

GO-FLOW チャート中に、2個以上のタイプ25オペレータが存在する場合は、各々、独立な信号を発生するとして取り扱う。

5.5.6 オペレータ・タイプ26

このオペレータは、通常閉状態のバルブをモデル化している。GO 手法におけるタイプ 6 に対応している。このオペレータには、主入力信号 S と副入力信号 P があり、副入力信号の入力によりバルブは開状態へと変化させられる。このオペレータの定義式では、副入力信号が、 $t_1 \sim t_n$ の複数のタイム・ポイントにおいて入力する一般的な場合をあらわしている。表において、 P_g は副入力信号が入力した時、機器が正常に動作する確率で、 P_o は副入力信号の有無にかかわらず早まってバルブが開いてしまう確率である。

図5-6 に、このオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。この図では、副入力信号はタイム・ポイント t_2 において入力し、主入力信号はタイム・ポイント t_1, t_3 において入力する場合を表している。

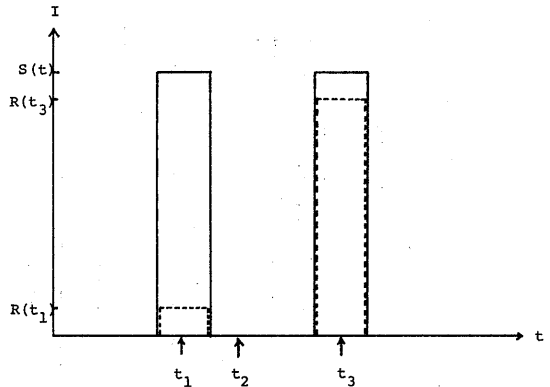


図5-6 タイプ26オペレータの機能

オペレータに与えるデータは P_p , P_g の値である。

このタイプ26のオペレータは、通常開状態のスイッチが副入力信号により閉じる場合も表現できる。

5.5.7 オペレータ・タイプ27

このオペレータは、通常開状態のバルブをモデル化している。GO手法におけるタイプ7に対応しているが信号の意味が異なっているため、機能は大幅に異なる。このオペレータには、主入力信号 S と副入力信号 P があり、副入力信号の入力によりバルブは閉状態へと変化させられる。表5-1における、このオペレータの機能の定義式では副入力信号が $t_1 \sim t_n$ の複数のタイム・ポイントにおいて入力する一般的な場合をあらわしている。 P_g , P_p はオペレータ26の場合と同様である。

図5-7に、このオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。この図では、副入力信号はタイム・ポイント t_2 において入力し、主入力信号はタイム・ポイント t_1, t_3 において入力する場合を表している。

オペレータに与えるデータは P_g , P_p の値である。

このタイプ27のオペレータは、通常閉状態のスイッチが副入力信号により開く場合も表現できる。

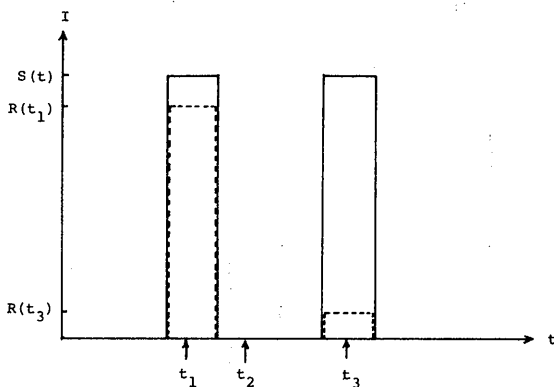


図5-7 タイプ27オペレータの機能

5.5.8 オペレータ・タイプ30

このオペレータは、ANDゲートをモデル化している。GO手法におけるタイプ10のオペレータに対応しているが機能は異なっている。図5-1のオペレータの記号表現からもわかる様に主入力信号が2つ以上存在し、副入力信号は存在しない。図5-8にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。図中、

実線及び一点鎖線は入力信号強度を示し、破線は出力信号強度を示す。

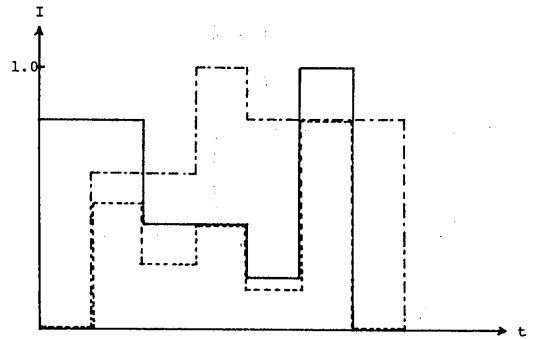


図5-8 タイプ30オペレータの機能

5.5.9 オペレータ・タイプ35

このオペレータは、機器が動作中に故障を発生する現象をモデル化している。つまり、Operating Failureを取り扱う時用いる。主入力信号 S が存在する場合を機器が動作している場合と考え、その場合のみ、故障が発生するようになっている。副入力信号により、事前に定義されたタイム・ポイント間の時間経過量を与える。つまり、 $P(t)$ はタイム・ポイント $t-1$ から t までの間の実際の時間間隔をあらわす。この時間の単位は、機器の故障率 (Operating Failure Rate) を与える時間単位と一致している必要がある。

タイム・ポイント t において機器が故障状態にある確率は t 以前における機器の運転経歴に依存している。それ故、タイム・ポイント t において機器が故障状態にある確率は、 t 以前のすべての主入力信号 S の関数となる。タイム・ポイント t における出力信号 $R(t)$ は、入力信号 $S(t)$ に機器の正常動作確率をかけたものになるため、結局 $R(t)$ は、 t 以前のすべての入力信号 $S(t)$ の値に関係する事になる。これは、5.4.3で述べたオペレータ機能の三基本原則のうちの(1)の規則の例外となっている。

図5-9にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。この例では、機器の動作要求の確率が時刻 t_2, t_3 において、それぞれ0.4, 0.8となっている (主入力信号 $S(t)$ の強度)。動作中の故障率が $10^{-3}/h$ であるとし、タイム・ポイント間の時間間隔がすべて10時間であるとすると、出力信号 $R(t)$ は次のようになる。

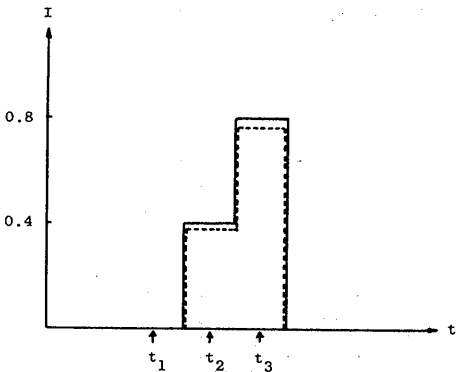


図5-9 タイプ35オペレータの機能

$$\begin{aligned}
 R(t_2) &= S(t_2) \times \exp \left\{ -\lambda \times \frac{1}{2} \times P(t_2) \times \frac{S(t_2)}{S(t_2)} \right\} \\
 &= 0.4 \times \exp \left\{ -1 \times 10^{-3} \times \frac{1}{2} \times 10.0 \times \frac{0.4}{0.4} \right\} \\
 &= 0.4 \times \exp \{-0.005\} = 0.398 \quad (5-1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R(t_3) &= S(t_3) \times \exp \left\{ -\lambda \times P(t_3) \times \frac{S(t_2)}{S(t_3)} \right. \\
 &\quad \left. -\lambda \times \frac{1}{2} \times P(t_2) \times \frac{S(t_2) - S(t_1)}{S(t_3)} - \lambda \times \frac{1}{2} \right. \\
 &\quad \left. \times P(t_3) \times \frac{S(t_3) - S(t_2)}{S(t_3)} \right\} \\
 &= 0.8 \times \exp \left\{ -10^{-3} \times 10 \times \frac{0.4}{0.8} - 10^{-3} \times \frac{1}{2} \right. \\
 &\quad \left. \times 10 \times \frac{0.4}{0.8} - 10^{-3} \times \frac{1}{2} \times 10 \times \frac{0.4}{0.8} \right\} \\
 &= 0.8 \times \exp \{-0.005 - 0.0025 - 0.0025\} = 0.792 \quad (5-2)
 \end{aligned}$$

出力信号 $R(t_2)$ を求める際、タイム・ポイント t_2 において機器が作動を要求されている確率は0.4であるが、 t_2 において突然0.4だけの要求が発生するのではなく、 t_1 から t_2 の間で作動している機器の割合が一樣に増加し、 t_2 の時刻においてちょうど0.4になると考えて、その間の故障発生確率を求めるようになっている。

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\lambda(t_2 - t)} dt &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^{t_2 - t_1} e^{-\lambda t} dt \\
 &= \frac{1}{\lambda(t_2 - t_1)} (1.0 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}) = \frac{1}{\lambda(t_2 - t_1)} \left\{ 1.0 \right. \\
 &\quad \left. - 1.0 + \lambda(t_2 - t_1) - \frac{1}{2} \lambda^2 (t_2 - t_1)^2 + \dots \right\} \\
 &= 1.0 - \frac{1}{2} \lambda(t_2 - t_1) \doteq e^{-\frac{1}{2} \lambda(t_2 - t_1)} \quad (5-3)
 \end{aligned}$$

出力信号 $R(t_3)$ を求める計算式の指数部分の中の第1項は、 t_2 において既に作動が要求されていた機器が、 $t_2 \sim t_3$ の間に故障する確率をあらわしている。第二項は、 $t_1 \sim t_2$ の間において新たに作動を開始した機器の故障確率を、第三項は、 $t_2 \sim t_3$ の間に作動を開始した機器の故障確率を表している。

5.5.10 オペレータ・タイプ37

このオペレータは、通常開状態のバルブが時間経過と共に故障を起し、閉状態となることをモデル化している。GO手法において対応するオペレータは存在しない。

このオペレータは、主入力信号と副入力信号があり、副入力信号の強度により一般に直前のタイム・ポイントからの時間経過量をあらわしている。副入力信号線は複数個あってもよい。

表5-1におけるオペレータの機能の定義式中 λ は、単位副入力信号強度（単位時間）当たりの故障率を表している。

系の動作開始以前に副入力信号を与えると、待機中の故障をモデル化できる。また、保修により故障が回復し正常状態へ機器がもどる場合は、副入力信号に負の強度を与えることによりモデル化できる。詳細は、5.7.4の解析例を参照のこと。

図5-10にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

オペレータに与えるデータは λ の値である。

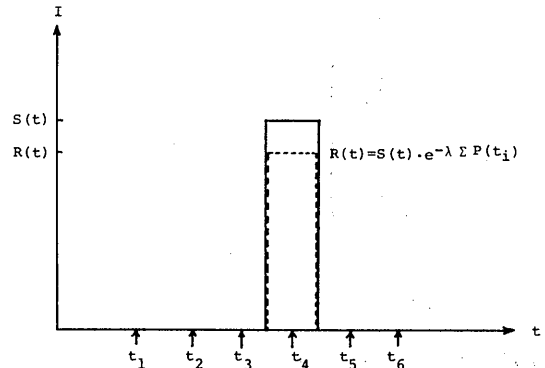


図5-10 タイプ37オペレータの機能

5.5.11 オペレータ・タイプ38

このオペレータは、通常閉状態のバルブが時間経過と共に故障を起し、開状態になることをモデル化して

いる。GO手法において対応するオペレータは存在しない。このオペレータはタイプ37と類似しており、副入力信、 λ の意味は同様である。

図5-11にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

オペレータに与えるデータは λ の値である。

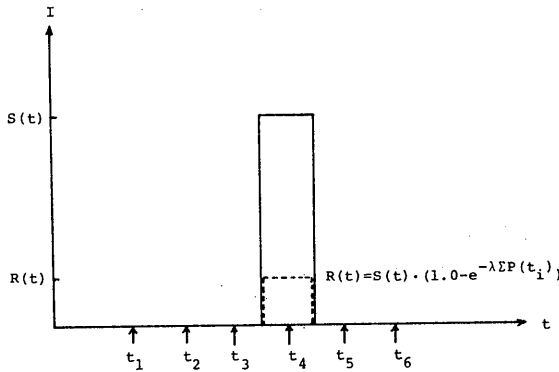


図5-11 タイプ38オペレータの機能

5.5.12 オペレータ・タイプ39

このオペレータはバルブの開閉をモデル化している。GO手法において対応するオペレータは存在しない。

二種類の副入力信号を持っており副入力信号 P_1 により、バルブ開の指令が与えられ、副入力信号 P_2 により、バルブ閉の指令が与えられる。

表5-1におけるこのオペレータの機能の定義式中 $O(t)$ は、バルブが開状態にある確率を示す量である。副入力信号の入力がタイム・ポイント t において存在しない場合は、 $O(t)$ の値は、直前のタイム・ポイントにおける値と等しく置く。 P_o 、 P_c は、それぞれ、バルブ開、閉の指令により正常に動作する確率である。

図5-12にこのオペレータの機能をグラフにより表現した一例を示す。

オペレータに与えるデータは、 $O(1)$ (系の動作開始に先立ってのバルブ開状態の確率)、 P_o 、 P_c の値である。

図5-12の例では、 $P_o=0.666$ 、 $P_c=0.9$ の値が与えてあり、最初、バルブは完全に閉じている。時刻 t_1 にバルブ開指令が与えられ、 $P_o=0.666$ の確率でバルブが開く。時刻 t_2 において閉指令が与えられるが完全には閉とならない。定義式により、

$$O(t') \times (1.0 - P_2(t_2) \cdot P_c) = 0.666 \times (1.0 - 1.0 \times 0.9) = 0.0666 \tag{5-4}$$

なお0.0666の確率で開状態にある。時刻 t_3 において再び開指令が与えられ

$$O(t') + (1.0 - O(t')) \cdot P_1(t_3) \times P_o = 0.0666 + (1.0 - 0.0666) \times 1.0 \times 0.666 = 0.688 \tag{5-5}$$

0.688の確率で開状態となる。

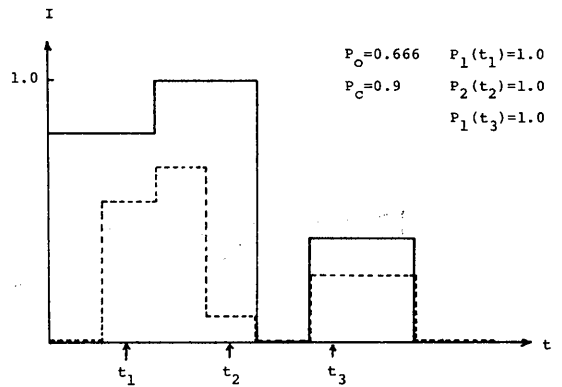


図5-12 タイプ39オペレータの機能

5.6 解析手順の説明

ここでは、解析対象として、簡単なサンプル問題を取り上げ、GO-FLOWによる解析のステップを詳しく追うことにより、解析手順の説明を行う。

5.6.1 サンプル問題(1)

解析対象として、図5-13に示す簡単な電気回路を取り上げる。この回路は、GO手法の解説⁽⁴⁸⁾において使用された回路であり、GO-FLOWによる解析とGOによる解析の比較が容易となるよう、このサンプル問題を選んだ。

この回路は、電源、2個のスイッチ、2個のランプより成り立っている。電源が接続された後に、スイッチ1が閉じられ、その後、更にスイッチ2が閉じられるとする。ここで求める事柄は、各時刻(タイム・ポイント)において少なくとも1つのランプが点灯する確率値である。

(1) GO-FLOWチャートによる表現

図5-13の電気回路をGO-FLOWチャートに表現すると図5-14のようになる。図中、オペレータ記号の円の中で、横線の上に記した数字は、オペレータ・タイプを示し、下側に記した数字は、オペレータに付けた

通し番号である。信号線に添えてある数字は信号の番号を示す。

図5-13 と 図5-14 の比較から推測がつくように、4番のオペレータはバッテリー、5,6番はスイッチ1,2を、7,8番はランプ1,2をあらわしている。9番のオペレータは、どちらか一方のランプが点灯すれば良いという論理をあらわすORゲートを示す。オペレータ1,2,3番は、それぞれ、バッテリーの接

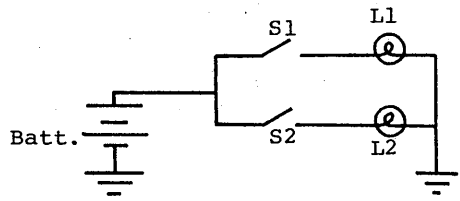


図5-13 サンプル問題 (電気回路)

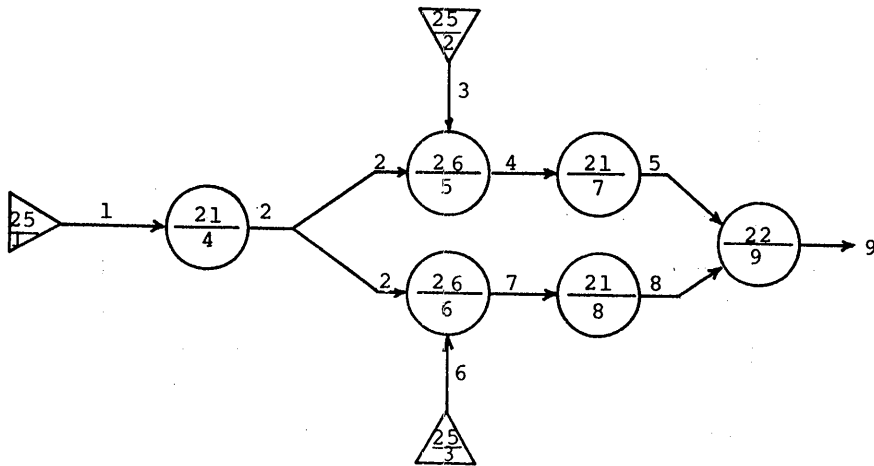


図5-14 GO-FLOW チャート (サンプル問題1)

続、スイッチ1,2を閉じる時刻を指定するための信号発生器である。

タイム・ポイントは表5-2のように定める。また、各信号線の意味を表5-3に示す。最終信号線は、#9であり、少なくともランプ1か2が点灯することをあらわしている。それ故。求めるべき答は、信号9の強度となる。

表5-4には、各オペレータに与えるデータを示す。オペレータ1の出力信号強度は、タイム・ポイント1,2,3において1.0であることを意味している。また、オペレータ2は、タイム・ポイント2において、出力信号強度1.0であり、他は、0.0である。オペレータ3

の出力信号強度も同様である。

(2) 計算手順

表5-5に、計算の手順及び表記方法を示す。

信号の強度は、一般にその信号が存在する確率をあらわしている。計算は、信号線に沿って、その存在確率を順次求めて行くことにより行う。

表5-5の一行目は、オペレータ#1を取り扱うことを示し、入力信号は存在せず、出力信号は#1であり、タイム・ポイント1,2,3において、それぞれ、1.0の強度を持っていることをあらわす。回路図における意味は、電源が、タイム・ポイント1,2,3において、接続されていることである。

表5-2 タイム・ポイントの定義 (サンプル問題1)

Time Points	作 用	意 味
1	信号#1 発生開始	電源接続開始
2	信号#2 発生	スイッチ1 閉指令
3	信号#6 発生	スイッチ2 閉指令

表5-3 信号の意味 (サンプル問題1)

Signals	意 味
1	電源の接続
2	電源よりの電圧
3	スイッチ1の閉動作指令
4	電圧がランプ1に加えられる
5	ランプ1点灯
6	スイッチ2の閉動作指令
7	電圧がランプ2に加えられる
8	ランプ2点灯
9	ランプ1か2が点灯

表5-4 オペレータに与えるデータ (サンプル問題1)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	R=1.0(1), 1.0(2), 1.0(3)	電源接続
2	25	R=0.0(1), 1.0(2), 0.0(3)	スイッチ1閉指令
3	25	R=0.0(1), 0.0(2), 1.0(3)	スイッチ2閉指令
4	21	$P_g=0.9, P_f=0.1$	電源
5	27	$P_p=0.1, P_g=0.7, P_f=0.2$	スイッチ1
6	27	$P_p=0.1, P_g=0.7, P_f=0.2$	スイッチ2
7	21	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ1
8	21	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ2
9	22	なし	ORゲート

第二行目は、オペレータ#4を取り扱うことを示す。オペレータ#4の働きにより、入力信号#1から出力信号#2の強度が得られ、その結果が各タイム・ポイントについて記載されている。例えば、タイム・ポイント1における出力信号強度は、

$$R(1)=S(1) \times P_g=1.0 \times 0.9=0.9 \quad (5-6)$$

と求まる。同様にして、タイム・ポイント2,3における信号#2の強度もそれぞれ0.9となる。回路図における意味は、電源が正常に働き、電圧がスイッチS1, S2に加わる確率がタイム・ポイント1~3において0.9であることに相当する。

第三行目は、オペレータ#2を取り扱うことを示す。オペレータ#2により発生された信号#3の存在確率(強度)が、タイム・ポイント2において1.0であり、他は、0.0であることを示している。回路図においては、タイム・ポイント2において、スイッチ1を閉じる動作の指令が出されることに相当する。

第四行目は、オペレータ#5を取り扱うことを示す。入力信号は、#2, #3であり、オペレータ#5の働きにより、信号#4の強度が得られ、その結果が記載されている。ただし、信号#2は分岐して、オペレータ#5と#6の主入力信号となっており、それらの信号はオペレータ#5~#8の変換を受けた後に、オペレータ#9のORゲートにおいて再び結合される。その時、オペレータ#9の計算をする際、入力信号#5と#8は、独立事象でない事を考慮しなくてはならない。それ故、今のような場合には、分岐した信号番号の情報を残しておく必要がある。第四行目出力信号欄においては、信号#2が存在し、なおかつ、信号#4が存在する確率値であることを明示してある、具体的な計算方法は次のようになる。

$$R(1)=S(1) \times P_p=0.9 \times 0.1=0.09 \quad (5-7)$$

$$R(2)=S(2) \times \{P_p+P(2) \times P_g\} \\ =0.9 \times (0.1+1.0 \times 0.7)=0.72 \quad (5-8)$$

表5-5 GO-FLOW 手法計算手順 (サンプル問題1)

Line	Operator(Type)	Signal		Intensity of Output Signal		
		Input	Output	Time Points		
				1	2	3
1	1 (25)	-	1	1.0	1.0	1.0
2	4 (21)	1	2	0.9	0.9	0.9
3	2 (25)	-	3	0.0	1.0	0.0
4	5 (27)	2,3	4(2)	0.09	0.72	0.72
5	7 (21)	4	5(2)	0.072	0.576	0.576
6	3 (25)	-	6	0.0	0.0	1.0
7	6 (27)	2,6	7(2)	0.09	0.09	0.72
8	8 (21)	7	8(2)	0.072	0.072	0.576
9	9 (22)	5,8	9	0.13824	0.60192	0.78336

$$R(3) = S(3) \times \{P_p + P(2) \times P_g\} \\ = 0.9 \times (0.1 + 1.0 \times 0.7) = 0.72 \quad (5-9)$$

回路図においては、スイッチ S1 に電圧が加わっており、なおかつスイッチ S1 が閉状態になっている場合に相当する。

第五行目は、オペレータ#7 を取り扱うことを示している。オペレータ#7 により入力信号#4 から出力信号#5 を得た結果を与えてある。例えば、

$$R(1) = S(1) \times P_g = 0.09 \times 0.8 = 0.072 \quad (5-10)$$

等の計算により信号#5 の強度が得られる。信号#4 は、オペレータ#7 の入力信号としてのみ使用されているだけであるため、第五行目の出力信号欄の信号#5 の記述には、信号#4 の情報は入っていない。回路図においては、スイッチ S1 に電圧が加わり、なおかつ、ランプ L1 が点灯している場合に相当している。

第六行目は、オペレータ#3 を取り扱うことを示している。オペレータ#3 により、タイム・ポイント3 において、信号#6 が1.0の確率で発せられることを示している。回路図においては、タイム・ポイント3 においてスイッチ S2 を閉じる動作の指令が出されることに相当する。

第七行目は、オペレータ#6 を取り扱うことを示している。オペレータ#6 により、入力信号#2、#6 から、出力信号#7 が得られた結果を記す。これは、第四行目と同様に、信号#2 が分岐しており、なおかつ、分岐した信号のそれぞれの系統が先において再び

結合されるため、信号#2 が存在し、なおかつ、信号#7 が存在する確率であることを明示してある。回路図においては、スイッチ S2 に電圧が加わり、なおかつ、スイッチ S2 が閉状態になっている場合に相当している。

第八行目は、オペレータ#8 を取り扱うことを示している。出力信号強度は第五行目と同様にして求める。

第九行目は、オペレータ#9 を取り扱うことを示している。オペレータは#9 は OR ゲートであり、信号#5 と#8 が主入力信号、#9 が出力信号である。信号#5 と#8 の強度は、第五、第八行目で、それぞれ求められている。信号#9 の強度を求めるためには、信号#5、#8 の従属性を考慮して次のような計算を行う。

$$P(1) = \left\{ \frac{S_1(1)}{P(\#2(1))} + \frac{S_2(1)}{P(\#2(1))} - \frac{S_1(1)}{P(\#2(1))} \right. \\ \left. \times \frac{S_2(1)}{P(\#2(1))} \right\} \times P(\#2(1)) \\ = \left\{ \frac{0.072}{0.9} + \frac{0.072}{0.9} - \frac{0.072}{0.9} \times \frac{0.072}{0.9} \right\} \times 0.9 \\ = 0.13824 \quad (5-11)$$

ここで $P(\#2(1))$ は信号#2 がタイム・ポイント1 において存在する確率で、第二行目において0.9と求められている。 S_1, S_2 は主入力信号であり、それぞれ、信号#5、#8 に対応している。計算の結果が第九行に記載されている。回路図においては、ランプ

L1 と L2 の少なくともいずれか一方が点灯している確率が、電源接続時、スイッチ S1 閉動作時、スイッチ S2 閉動作時のそれぞれにおいて、0.13824、0.60192、0.78336である事に相当している。

以上が、サンプル問題(1)を GO-FLOW 手法により解析する際の計算手順である。

(3) GO 手法による結果との比較

GO-FLOW により得られた結果と、GO により得られた結果(附録2.1参照)とを比較してみる。

GO 手法による解析結果では、信号#9の到達する確率は、タイム・ポイント1,2,3,4において、それぞれ、0.13824, 0.46368, 0.18144, 0.21664である。これは、言い換えれば、ランプ L1, L2 の少なくとも一方が点灯状態になる確率が、電源接続時、スイッチ S1 閉動作時、スイッチ S2 閉動作時において、それぞれ0.13824, 0.46368, 0.18144であり、決して点灯しない確率が、0.21664であることを示している。

この結果を、GO-FLOW の解析結果の表現(各タイム・ポイントにおいて点灯状態にある確率)になおすと、それぞれ、0.13824, 0.60192 (=0.13824+0.46368), 0.78336 (=0.13824+0.46368+0.18144) となり、GO-FLOW による結果と同じであることがわかる。

5.6.2 サンプル問題(2)

前節で取り上げた電気回路において電球の寿命を考慮に入れた場合を考えてみる。つまり、電球が点灯中に一定確率で断線し、点灯状態から非点灯状態へと変化する場合を取り入れて解析を実施してみる。このような時間経過に伴う機器の動作中の故障発生は、GO 手法では解析を多数回繰り返すしか取り扱い方法はな

い。これを GO-FLOW 手法ではどのように取り扱うかを本節において紹介する。また、この解析例により、タイプ35のオペレータの実際的な使用方法を見ることが出来る。

(1) GO-FLOW チャートによる表現

図5-13の電気回路を GO-FLOW チャートに表現すると図5-15のようになる。図5-14のサンプル問題(1)のチャートと比較してみると、タイプ35のオペレータ(オペレータ番号8,11)とオペレータ番号4の信号発生器が余分に付け加わっている。この部分がランプ1,2の点灯中の断線をモデル化した部分である。他のオペレータはサンプル問題(1)の場合と同じ役割を持っている

次にタイム・ポイントの定義に先立ってランプを点灯させておく時間を決めておかなくてはならない。そこで、この回路の動作を次のようなものとする。

まず、電源が接続され、その直後にスイッチ1が閉じられる。その10時間後にスイッチ2が閉じられ、更にその10時間後までランプの点灯状態が観察される。

以上の動作に対応して、表5-6に示すようにタイム・ポイントを定義する。タイム・ポイント1はすべての動作開始に先立つ初期時刻。タイム・ポイント2において電源が接続される。タイム・ポイント3においてスイッチ S1 閉の指令が出される。実際の時刻においては、タイム・ポイント2の直後と考えられる。タイム・ポイント4は、スイッチ S1 閉指令が出されてから10時間後。タイム・ポイント5においてスイッチ S2 閉の指令が出される。実際の時刻においては、タイム・ポイント4の直後と考えられる。タイム・ポイント6はスイッチ S2 閉指令が出されてから10時間後の時刻を表す。

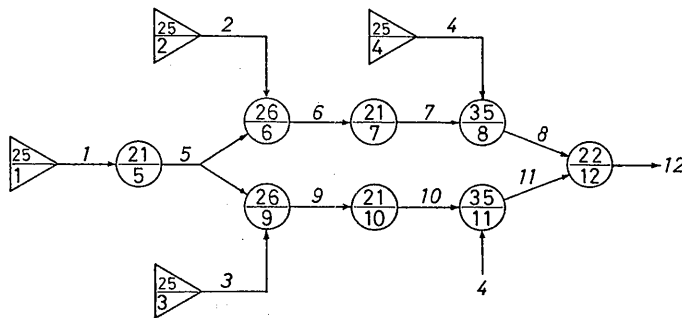


図5-15 GO-FLOW チャート (サンプル問題2)

各信号線の意味は表5-7に示す。最終信号線は#12であり、少なくともランプ1か2が点灯状態にあることを表している。

表5-8には各オペレータに与えるデータを示す。オペレータ1の出力信号強度は、タイム・ポイント1において0.0、タイム・ポイント2以降は1.0である。これは、電源がタイム・ポイント2以降において接続状態にあることを意味している。オペレータ2の出力信号はスイッチS1の閉指令信号で、オペレータ3の出力信号はスイッチS2の閉指令信号である。

オペレータ4の出力信号は時間経過量をあらわしている。タイム・ポイント4と6において、それぞれ強度10.0の信号を出力するが、これは、タイム・ポイント4はタイム・ポイント3から10時間後であり、タイム・ポイント6はタイム・ポイント5から10時間後であることを意味している。

ランプの寿命としては、1,000時間を仮定し、オペレータ8と11のタイプ35オペレータのデータとして、

ランプの使用(点灯)中の故障率0.001/hを与えた。

(2) 計算手順

表5-9に計算の手順及び表記方法を示す。

表5-5と比較し、タイム・ポイント数及びステップ数が増加している。

第七行目まで、表5-15と同様の手続きである。

第八行目は、オペレータ#8を取り扱うことを示す。このオペレータはランプ1の点灯中の故障をモデル化している。出力信号#8の強度は、タイプ35オペレータの定義式を用いて計算されている。

タイム・ポイント1においては、入力信号強度が0.0であるため出力信号強度も0.0となる。

タイム・ポイント2,3においては、副入力信号のタイム・ポイント3以前の強度がすべて0.0であるため定義式より

$$R(2) = S(2) \times \exp\{-0.0\} = S(2) \quad (5-12)$$

表5-6 タイム・ポイントの定義 (サンプル問題2)

Time Points	作 用	意 味
1		初期時刻
2	信号#1発生開始	電源接続開始
3	信号#2発生	スイッチ1閉指令
4	信号#4強度10.0	タイム・ポイント3から10時間後
5	信号#3発生	スイッチ2閉指令
6	信号#4強度10.0	タイム・ポイント5から10時間後

表5-7 信号の意味 (サンプル問題2)

Signals	意 味
1	電源の接続
2	スイッチ1の閉動作指令
3	スイッチ2の閉動作指令
4	時間経過量
5	電源よりの電圧
6	電圧がランプ1に加えられる
7	ランプ1点灯 (点灯中の故障を考慮せず)
8	ランプ1点灯
9	電圧がランプ2に加えられる
10	ランプ2点灯 (点灯中の故障を考慮せず)
11	ランプ2点灯
12	ランプ1か2が点灯

$$R(3) = S(3) \times \exp\{-0.0\} = S(3) \quad (5-13)$$

となり、出力信号強度は入力信号強度と等しくなる。

タイム・ポイント4においては、タイム・ポイント3と4の間の10時間のランプ1点灯中の故障が考慮に入れられ、出力信号強度が次のように求まる。

$$R(4) = S(4) \times \exp\{-\lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(4)}\}$$

$$= 0.576 \times \exp\{-0.001 \times 10.0 \times 1.0\} = 0.5703 \quad (5-14)$$

タイム・ポイント5における強度は次式により求まる。

$$R(5) = S(5) \times \exp\{-\lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(5)}\}$$

$$= 0.576 \times \exp\{-0.001 \times 10.0 \times 1.0\} = 0.5703 \quad (5-15)$$

表5-8 オペレータに与えるデータ (サンプル問題2)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	R=0.0(1),1.0(2),1.0(3),1.0(4),1.0(5),1.0(6)	電源接続
2	25	R=0.0(1),0.0(2),1.0(3),0.0(4),0.0(5),0.0(6)	スイッチ1閉指令
3	25	R=0.0(1),0.0(2),0.0(3),0.0(4),1.0(5),0.0(6)	スイッチ2閉指令
4	25	R=0.0(1),0.0(2),0.0(3),10.0(4),0.0(5),10.0(6)	時間経過量発生
5	21	$P_g=0.9$	電源
6	26	$P_p=0.1, P_g=0.7$	スイッチ1
7	21	$P_g=0.8$	ランプ1
8	35	$\lambda=0.001/h$	ランプ1の点灯中の故障
9	26	$P_p=0.1, P_g=0.7$	スイッチ2
10	21	$P_g=0.8$	ランプ2
11	35	$\lambda=0.001/h$	ランプ2の点灯中の故障
12	22	-	ORゲート

表5-9 GO-FLOW 手法計算手順 (サンプル問題2)

Line	Operator (Type)	Signal		Intensity of Output Signal					
		Input	Output	Time Points					
				1	2	3	4	5	6
1	1 (25)	-	1	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2 (25)	-	2	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
3	3 (25)	-	3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
4	4 (25)	-	4	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	10.0
5	5 (21)	1	5	0.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
6	6 (26)	5,2	6(5)	0.0	0.09	0.72	0.72	0.72	0.72
7	7 (21)	6	7(5)	0.0	0.072	0.576	0.576	0.576	0.576
8	8 (35)	7,4	8(5)	0.0	0.072	0.576	0.5703	0.5703	0.5646
9	9 (26)	5,3	9(5)	0.0	0.09	0.09	0.09	0.72	0.72
10	10 (21)	9	10(5)	0.0	0.072	0.072	0.072	0.576	0.576
11	11 (35)	10,4	11(5)	0.0	0.072	0.072	0.0713	0.5753	0.5696
12	12 (22)	8,11	12	0.0	0.13824	0.60129	0.59642	0.78105	0.77687

タイム・ポイント4における強度と同じ値となる。これは、タイム・ポイント4と5は実際の時刻においては同一の時刻と考えて良く、スイッチ2を閉じる前と閉じた後の状態の違いを区別しているだけであるためである。

タイム・ポイント6における強度は定義式より、

$$R(6) = S(6) \times \exp\{-\lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(6)} - \lambda \times P(6) \times \frac{S(6)}{S(6)}\} = 0.576 \\ \times \exp\{-0.001 \times 10.0 \times 1.0 - 0.001 \times 10.0 \times 1.0\} = 0.5646 \quad (5-16)$$

となる。この式で、指数の中の第一項は、スイッチ1を閉じてから10時間点灯中の故障、第二項は、更にもその後の10時間の点灯中の故障による入力信号の減衰を計算している。

第九行、十行も表6-4と同様の手続きである。

第十一行において、オペレータ#11を取り扱う。このオペレータはランプ2の点灯中の故障をモデル化している。タイム・ポイント1～3の計算は、オペレータ#8の場合と同様であるので説明は省略する。

タイム・ポイント4においては、出力信号強度は、

$$R(4) = S(4) \times \exp\{-\lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(4)}\} \\ = 0.072 \times \exp\{-0.001 \times 10.0 \times 1.0\} = 0.0713 \quad (5-17)$$

となる。この式では、スイッチ2の閉指令が来ないにもかかわらず、事前にスイッチ2が閉じ、ランプ2が点灯していた場合における、タイム・ポイント4までの10時間の点灯中の故障を考慮している。

タイム・ポイント5における出力信号強度は、オペレータ#8の場の時と同様の理由でタイム・ポイント4における値と等しくなる。

タイム・ポイント6における出力信号強度は定義式より、

$$R(6) = S(6) \times \exp\{-\lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(6)} - \lambda \times P(6) \times \frac{S(6)}{S(6)}\} = 0.576 \\ \times \exp\left\{-0.001 \times 10.0 \times \frac{0.072}{0.576} - 0.001\right.$$

$$\left. \times 10.0 \times 1.0\right\} = 0.5696 \quad (5-18)$$

これは、最初から点灯していた場合と、スイッチ2の閉指令の時から点灯した場合の故障、両方を考慮した計算式となっている。

今、タイム・ポイント6において、ランプ2が点灯している確率を厳密な式で表わすと次のようになる。

$$S(4) \times \exp\{-\lambda \times (P(4) + P(6))\} + \{S(6) - S(4)\} \times \exp\{-\lambda \times P(6)\} \quad (5-19)$$

第一項は、最初から点灯していたランプ[S(4)]が20時間[P(4)+P(6)]の点灯中に故障して減少した結果を、第二項は、スイッチ2閉指令がでた時点で点灯した[S(6)-S(4)]が10時間[P(6)]の点灯中に故障し減少した結果を表す。

故障率λが小さく、指数の中の値が小の場合には上式は次のように変形できる。

$$S(4) \times \{1.0 - \lambda \times (P(4) + P(6))\} + \{S(6) - S(4)\} \times \{1.0 - \lambda \times P(6)\} \\ = S(4) \{1.0 - \lambda P(4) - \lambda P(6) - 1.0 + \lambda P(6)\} + S(6) \{1.0 - \lambda P(6)\} \\ = S(4) \times \lambda \times P(4) + S(6) \times \{1.0 - \lambda \times P(6)\} \\ = S(6) \times \{1.0 - \lambda \times P(6) - \lambda \times P(4) \times \frac{S(4)}{S(6)}\} \quad (5-20)$$

上式は、(5-18)式の指数の中の数値が小の場合の近似式に一致している。

オペレータ・タイプ35の定義式は、機器が種々の異なった時刻から動作を開始した場合の動作中の故障をまとめて計算する近似式となっている。

なお、定義式の指数の中の第二項は、今の場合は、P(5)=0.0であるため0.0となる。この項は、入力信号が連続的に増加/減少する場合(機器の運転状態になっている確率が連続的に変化する)に必要となる項である。詳しい使用例は、5.7.3の解析実施例(3)において与えることとする。

第十二行目は、オペレータ#12を取り扱うことを示している。このオペレータはORゲートであり、信号#8と#11が主入力信号で、信号#12が出力信号である。計算方法は、サンプル問題(1)の場合と同様である。結果が第十二行に出力信号の強度として記載されている。

信号#12の強度の意味は以下のように解釈される。

ランプ1と2の少なくともいずれか一方が点灯している確率が電源接続時(タイム・ポイント2)に、0.13824である。これは、スイッチ閉指令が出されていないにもかかわらず、1個あるいは2個のスイッチが事前に閉じてしまった場合に相当する。

スイッチ1の閉指令が出された時(タイム・ポイント3)、0.60129の確率で少なくとも一つのランプが点灯状態となっている。その10時間後(タイム・ポイント4)には、ランプの故障により、点灯している確率は0.59642へと下がる。

スイッチ2の閉指令が出された時(タイム・ポイント5)には、0.78105の確率で少なくとも一つのランプが点灯状態となっている。更にその10時間後(タイム・ポイント6)には、点灯している確率は0.77687へと下がる。

以上、サンプル問題(2)をGO-FLOW手法により解析する際の計算手順を説明した。

5.6.3 計算方法まとめ

サンプル問題についての説明で示した計算方法を、二、三の補足説明を加えまとめることとする。

計算は信号の流れに沿って実施していく。つまり、信号発生器から始めて、順次信号の流れの下流側へと計算を進めていく。各オペレータにおける計算を実施する際には、オペレータの入力信号強度の値はすべて定まっている必要がある。

オペレータの動作原理に従い、すべてのタイム・ポイントにおける出力信号強度を求め、その値を計算手順の表(例えば表5-3、5-9)に記載して行く事を原則とする。

一つの信号線が分岐して、複数のオペレータの入力信号として使用され、なおかつ、それぞれの信号の系統が再びANDゲート、ORゲート等により結合される場合は、分岐した信号の情報を出力信号に付加しておく必要がある。これにより、分岐した信号相互間の存在確率の従属性を扱うことができる。例えば、AND/ORゲートの入力信号がA,Bであり、それぞれは、元をたどると同一の信号Cから分岐した信号の系統である場合、次の計算式により、それぞれのゲートの出力信号の強度が得られる。

$$\text{ANDゲート: } P(C) \times \frac{P(A)}{P(C)} \times \frac{P(B)}{P(C)}$$

$$\text{ORゲート: } P(C) \times \left\{ \frac{P(A)}{P(C)} + \frac{P(B)}{P(C)} \right\}$$

$$- \frac{P(A)}{P(C)} \times \frac{P(B)}{P(C)} \}$$

ここで、P()はカッコ内の信号の強度を意味する。

なお、分岐した信号の強度が1.0の場合は、以上の取り扱いは不要となる。また、分岐したそれぞれの系統が下流において再び結合されることのない場合も不要である。

更に、オペレータ・タイプ35、37、38の副入力信号となっている信号線が分岐し、複数のこれらの種類のオペレータの副入力信号として使用されている場合も以上の扱いは不要となる。つまり、この場合、信号強度は時間経過量をあらわし、存在確率をあらわしているわけではない。時間経過は、すべてのオペレータにとって、暗のうちに、1.0の確率で存在していると考えられるからである。

より複雑な場合で、ORゲートの出力信号が、更に下流において他のOR/ANDゲートの入力信号となっており、なおかつ、そのOR/ANDゲートの別の入力信号の上流に、共通の信号が含まれている場合は、最初のORゲートにおいては、数値計算を実施せず、ORゲート以降個々の信号を並列に処理して行き、二番目のOR/ANDゲートで始めて数値計算を実施する。

ANDゲートの入力信号中に、更に下流に存在する他のOR/ANDゲートの別の入力信号(あるいはその別の入力信号の系統の上流にある信号)と同じ信号がある場合は、ANDゲートの出力信号がその信号を含んでいる(積になっている)ことを記録しておく。この場合は、ANDゲートにおいて数値計算は実施してしまう。これにより、下流におけるOR/ANDゲートの処理を正しく行うことができる。

結局、信号線が分岐する場合は、フォールト・ツリー解析において、同一の基本事象が複数個所に存在する場合を取り扱う方法⁽³⁵⁾と基本的には同じ方法を実施することとなる。

5.7 解析実施例

本節において、GO-FLOW手法を実際の系に適用した解析例を紹介する。これらの解析例により、GO-FLOW手法のより実際的な使用方法及びGO-FLOW手法の適用範囲、有用性を示す。

解析対象は、(1)待機安全防護系である原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系⁽¹⁷⁾、(2) Phased Mission Problemとして取り扱われた⁽⁴⁶⁾、沸騰水型原子炉

(BWR)の非常用炉心冷却系, (3) Phased Mission Problemの一種である船用炉非常炉心注入系⁽¹⁷⁾の非常用電源系, (待機冗長系の一種), (4)試験, 修理を考慮した場合の Time Dependent Unavailability の問題⁽⁴⁷⁾として加圧水型原子炉の補助給水系 (PWA AFWS系), の4例を選んだ。

5.7.1 原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系

(1) 系の説明

図5-16に原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系⁽¹⁷⁾を示す。この系は, 他の安全防護系が機能しなくなった場合に, 炉心から崩壊熱を除去する事を目的としている。二基の蒸気発生器が, 非常の場合における熱交換器として使用される。

この系は, 二つの主ループより成り立っている。一つは, 一次系の水を循環するループで, もう一方は, 冷却水を循環するループである。一次水は, 通常運転時に使用されているループを循環する。冷却水は, 非常用水タンクからの純水を用い, 非常用崩壊熱除去ポンプによって循環させられる。ポンプから出た冷却水は, 2つの流路にわかれ, それぞれ, 蒸気発生器A, Bに供給される。蒸気発生器において, 一次側から熱を受け取り, 飽和蒸気となり, 蒸気放出塔から船外へ放出される。

一次水は主循環ポンプにより循環させられるが, 自然循環による除熱も可能である。また, 一基の蒸気発生器によっても十分崩壊熱の除去は可能であるとする。

非常用ディーゼル発電機は, 船の上層部に位置する非常用発電機室に置かれている。非常用発電機は, 主タービン, 及び, 補助発電機が停止した場合に自動的に運転を開始する。更に, 主コンソール室あるいは, 非常用発電機室から手動により運転を開始することもできる。

(2) GO-FLOW チャートによる表現

図5-16のシステム図を GO-FLOW チャートに表現すると 図5-17 のようになる。図中, オペレータ記号の円の中の横線の上の数字は, オペレータ・タイプを示し, 下側の数字は, オペレータの番号を示す。信号線に添えてある番号は, 信号番号を示す。

ここで, タイム・ポイントは表5-10のように定める。各信号線の意味は次のようになっている。信号#5は非常用発電機の起動信号, 信号#6~#8は非常用崩壊熱除去ポンプへの電力, 信号#17はバルブV4, V5の開操作指令, 信号#10は機器の故障をあらわす

オペレータへの副入力信号で, 時間経過量をあらわす。他の信号はすべて, 二次側冷却水の流れをあらわしている。

最終信号線は#46である。この信号の存在は, 少なくとも, どちらか一方の蒸気発生器により除熱が行われることをあらわしている。それ故, 本解析例においては, 信号#46の各タイム・ポイントにおける強度を求める事が解析目的となる。

表5-11に各オペレータに対して与えるデータ及びオペレータの意味, 対応機器を示す。オペレータ#4タイプ25はタイム・ポイント3, 4において強度1.0の信号を発生するが, これは, 今の場合時間経過量10時間を意味している。それ故, この信号を副入力信号としているオペレータ(#12, #13, …)には, 故障率データとして, 10時間当たりの故障確率値を与えてある。

(3) 解析結果

解析の手順及び結果を表5-12に示す。表において各オペレータの出力信号番号のみを記し, 入力信号番号の記載は省略した。出力信号欄において, カッコの中に記された番号は, 5.6.3において説明した, 上流において分岐した信号線の番号である。

表5-12より, 信号#46の強度は, タイム・ポイント1~4において, それぞれ0.0, 0.964866, 0.9356109, 0.9063748, であることがわかる。これらの意味は, 系が待機状態にある時の動作確率は0.0, 起動信号により動作を開始する確率が0.964866, 起動後10時間後において動作している確率が0.9356109, 起動後20時間後において動作している確率が0.9063748である。これを系の故障確率で言い換えると, 起動失敗確率が 3.5134×10^{-2} , 起動後10時間後における故障確率が 6.4389×10^{-2} , 起動後20時間後における故障確率が 9.3625×10^{-2} である。

起動失敗確率は, 附録2.2に示したGO手法による解析によると, 3.51339×10^{-2} である。また起動後10時間後における故障確率は, フォールト・ツリー解析⁽²³⁾によると, 6.4389×10^{-2} である。GO-FLOWによる解析では, 一度の解析で, これらの値及び20時間後における故障確率まで求めることができる。

5.7.2 沸騰水型原子炉非常用炉心冷却系

(1) 系の説明

この系は, Phased Mission Problemの例題として取り上げられたシステムである⁽⁴⁶⁾。系のフロー・チャートを図5-18に示す。系は, 高压炉心スプレイ系

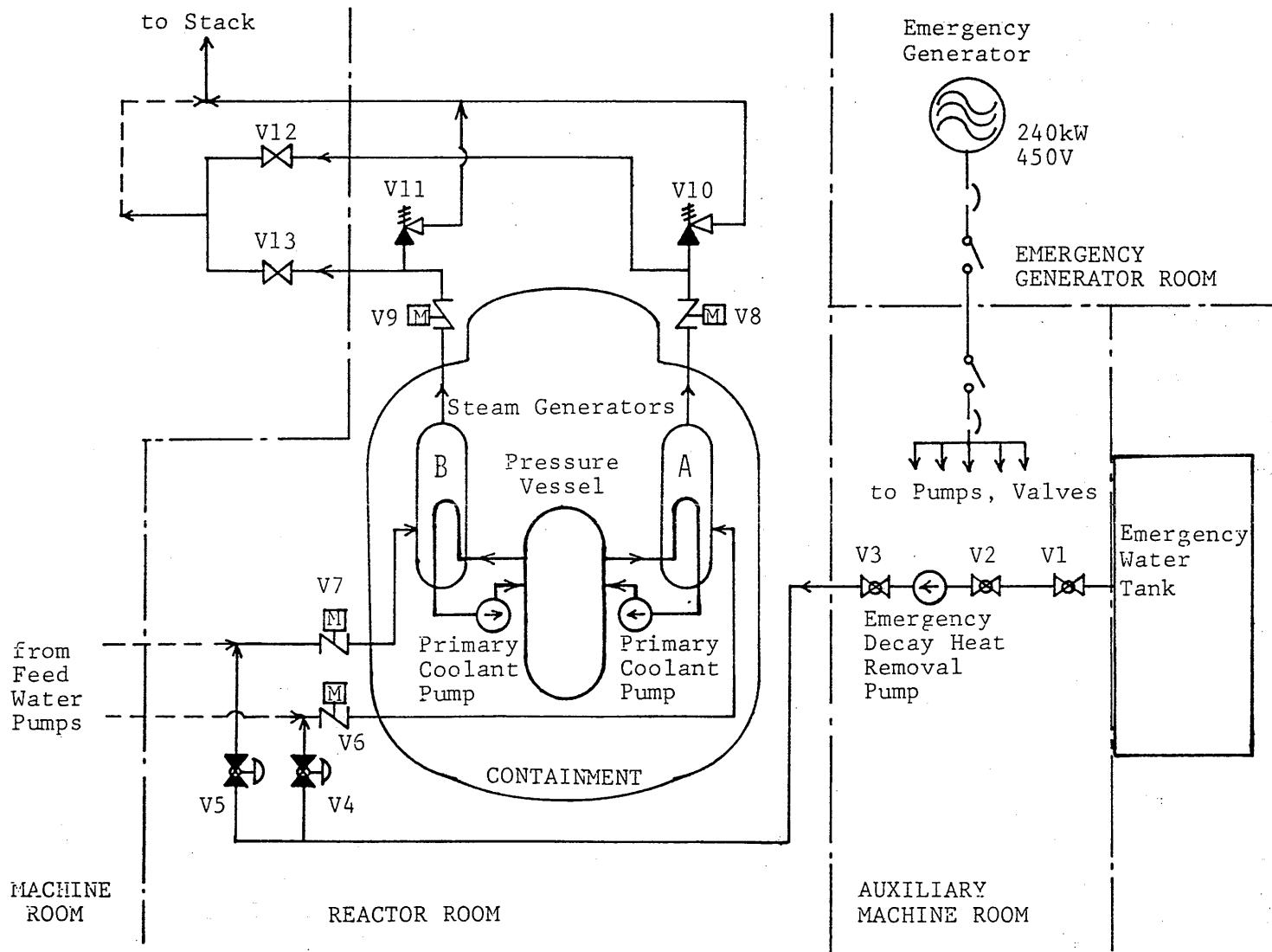


图5-16 原子力船むつ非常用崩壊熱除去系

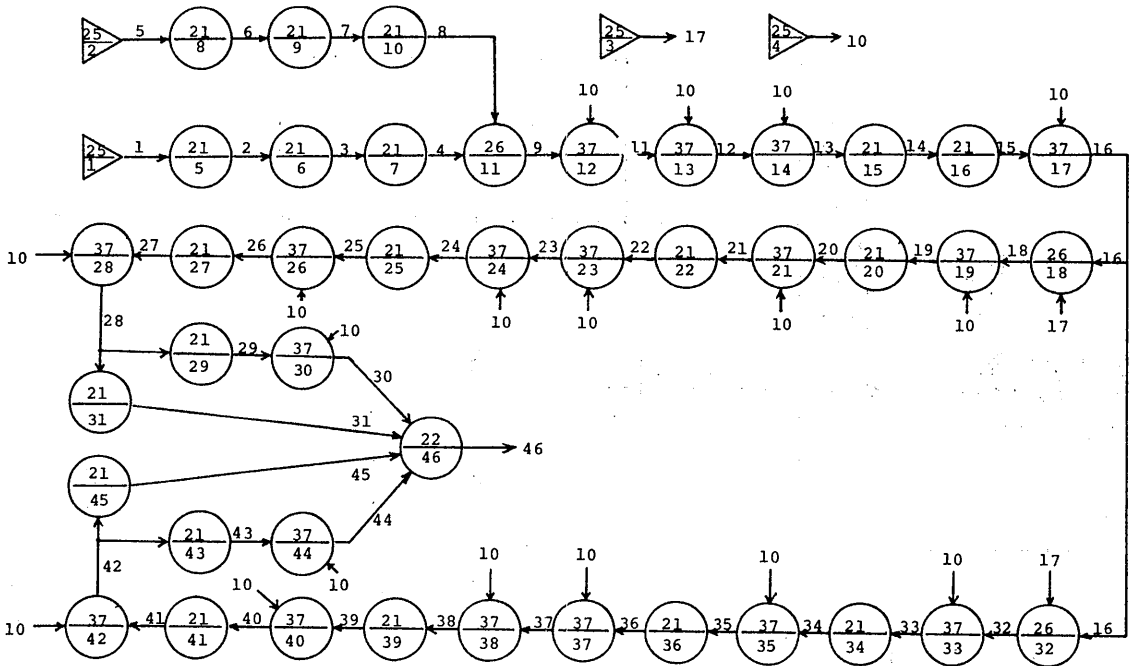


図5-17 GO-FLOW チャート (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

表5-10 タイム・ポイントの定義 (むつ非常用崩壊熱除去系)

Time Points	作 用	意 味
1	信号#1 発生開始	系待機状態に置かれる
2	信号#5, #17 発生	系動作開始
3	信号#10 発生	起動後10時間
4	信号#10 発生	起動後20時間

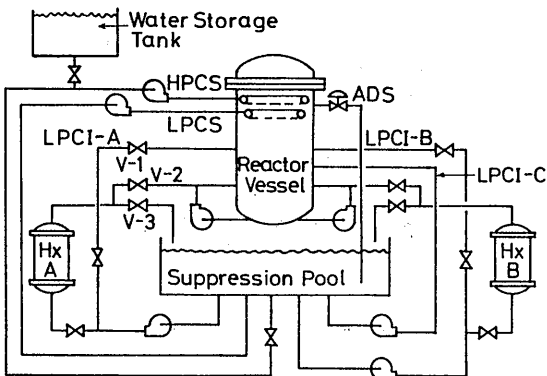


図5-18 BWR 非常用炉心冷却系

(HPCS), 低圧炉心スプレイ系 (LPCS), 低圧炉心注入系 (LPCI), 自動減圧系 (ADS), 熱交換器 (Hx) より成り立っている。

この系は、LOCA後の炉心からの除熱を目的としているが、LOCA後の時間経過に供い、次の三種のフェーズを考え、各々に対し要求される系の動作モードは異なっている。

フェーズ1は、初期炉心冷却である。このフェーズにおいては、HPCS だけか、あるいは、ADSと低圧系の一つの動作が必要とされる。この場合、V-1は開いており、V-2、V-3は閉じている。フェーズ1の継続時間は30分間である。

フェーズ2は、サプレッション・プール冷却である。このフェーズにおいては、まず ADSが炉心内の

表5-11 オペレータに与えるデータ (むつ非常用崩壊熱除去系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~4)	タンク接続
2	25	1.0(2)	非常用発電機始動指令
3	25	1.0(2)	V4, V5 開指令
4	25	1.0(3,4)	運転経過時間
5	21	$P_f=1.2 \times 10^{-7}$	非常用水タンク
6	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V1
7	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V2
8	21	$P_f=3.0 \times 10^{-2}$	非常用発電機起動
9	21	$P_f=2.0 \times 10^{-3}$	スイッチ
10	21	$P_f=2.0 \times 10^{-3}$	ブレーカー
11	26	$P_p=0.0$ $P_f=1.0 \times 10^{-1}$	崩壊熱除去ポンプ始動
12	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-2}/10hr$	非常用発電機運転中の故障
13	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-5}/10hr$	配線断線
14	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-4}/10hr$	ポンプ運転中の故障
15	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V3
16	21	$P_f=7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
17	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	二次側パイプ詰り
18	26	$P_p=0.0$ $P_f=1.0 \times 10^{-2}$	V4 開失敗
19	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-4}/10hr$	V4 継続開失敗
20	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V6 開失敗
21	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V6 詰り
22	21	$P_f=7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
23	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	二次側パイプ詰り
24	37	$\lambda = 2.4 \times 10^{-8}/10hr$	一次側パイプ破裂
25	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V8 開失敗
26	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V8 詰り
27	21	$P_f=3.6 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
28	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-9}/10hr$	二次側パイプ詰り
29	21	$P_f=1.0 \times 10^{-5}$	V10 開失敗
30	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V10 詰り
31	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V12 開失敗
32	26	$P_p=0.0$ $P_f=1.0 \times 10^{-1}$	V5 開動作失敗
33	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-4}/10hr$	V5 詰り
34	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V7 開失敗
35	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V7 詰り
36	21	$P_f=7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
37	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	二次側パイプ詰り
38	37	$\lambda = 2.4 \times 10^{-8}/10hr$	一次側パイプ詰り
39	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V9 開失敗
40	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V9 詰り
41	21	$P_f=3.6 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
42	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-9}/10hr$	二次側パイプ詰り
43	21	$P_f=1.0 \times 10^{-5}$	V11 開失敗
44	37	$\lambda = 1.0 \times 10^{-9}/10hr$	V11 詰り
45	21	$P_f=1.0 \times 10^{-4}$	V13 開失敗
46	22		OR ゲート

表5-12 GO-FLOW手法による計算手順（むつ非常用崩壊熱除去系）

Operator	(Type)	Signal	Time Points			
			1	2	3	4
1	(25)	1	1.0	1.0	1.0	1.0
5	(21)	2	.99999988	.99999988	.99999988	.99999988
6	(21)	3	.9999	.9999	.9999	.9999
7	(21)	4	.9998	.9998	.9998	.9998
2	(25)	5	.0	1.0	.0	.0
8	(21)	6	.0	.97	.0	.0
9	(21)	7	.0	.96806	.0	.0
10	(21)	8	.0	.9661238	.0	.0
11	(26)	9	.0	.9649646	.9649646	.9649646
4	(25)	10	.0	.0	1.0	1.0
12	(37)	11	.0	.9649646	.9360157	.9070667
13	(37)	12	.0	.9649646	.9359876	.9070123
14	(37)	13	.0	.9649646	.9357068	.906468
15	(21)	14	.0	.9648681	.9356132	.9063773
16	(21)	15	.0	.9648674	.9356125	.9063766
17	(37)	16	.0	.9648674	.9356125	.9063766
3	(25)	17	.0	1.0	.0	.0
18	(26)	18(16)	.0	.9639025	.9346768	.9054702
19	(37)	19(16)	.0	.9639025	.9345833	.9052891
20	(21)	20(16)	.0	.9638061	.9344898	.9051985
21	(37)	21(16)	.0	.9638061	.9344898	.9051985
22	(21)	22(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
23	(37)	23(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
24	(37)	24(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
25	(21)	25(16)	.0	.963709	.9343956	.9051072
26	(37)	26(16)	.0	.963709	.9343956	.9051072
27	(21)	27(16)	.0	.9637086	.9343952	.9051068
28	(37)	28(16)	.0	.9637086	.9343952	.9051068
29	(21)	29(16,28)	.0	.9636989	.9343858	.9050977
30	(37)	30(16,28)	.0	.9636989	.9343858	.9050977
31	(21)	31(16,28)	.0	.9636172	.9343017	.9050162
32	(26)	32(16)	.0	.9639025	.9346768	.9054702
33	(37)	33(16)	.0	.9639025	.9345833	.9052891
34	(21)	34(16)	.0	.9638061	.9344898	.9051985
35	(37)	35(16)	.0	.9638061	.9344898	.9051985
36	(21)	36(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
37	(37)	37(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
38	(37)	38(16)	.0	.9638054	.9344891	.9051978
39	(21)	39(16)	.0	.963709	.9343956	.9051072
40	(37)	40(16)	.0	.963709	.9343956	.9051072
41	(21)	41(16)	.0	.9637086	.9343952	.9051068
42	(37)	42(16)	.0	.9637086	.9343952	.9051068
43	(21)	43(16,42)	.0	.9636989	.9343858	.9050977
44	(37)	44(16,42)	.0	.9636989	.9343858	.9050977
45	(21)	45(16,42)	.0	.9636172	.9343017	.9050162
46	(22)	46	.0	.964866	.9356109	.9063748

圧力が上昇しすぎるのを押えるために必要となる。更に、熱交換器の一つと、対応する LPCI ループが、サプレッション・プール水の冷却のために必要となり、それと共に、炉心とサプレッション・プールとの間の循環のため残りの低圧注入系、低圧炉心スプレイ系、高圧炉心スプレイ系の中のどれか一つが最低必要となる。この場合、サプレッション・プール水の冷却のため V-3 は開いている必要がある。フェーズ 2 の継続時間は 36 時間である。

フェーズ 3 は余熱除去である。このフェーズにおいては、LOCA 部分は補修されていると仮定している。

熱交換器 (Hx) と対応する低圧注入 (LPCI) の動作が一組必要とされる。この場合、バルブ V-2 が開いている必要がある。フェーズ 3 の継続時間は 84 時間である。

(2) GO-FLOW チャートによる表現

図5-18 のシステム図を GO-FLOW チャートに表現すると図5-19 のようになる。オペレータの意味は図5-28 と同様である。図中、各々のシステムに対応したオペレータの脇に、システム名を略記した。他のオペレータは、AND/OR の論理オペレータである。

最終信号線は、#30、#38、#27 であり、それぞ

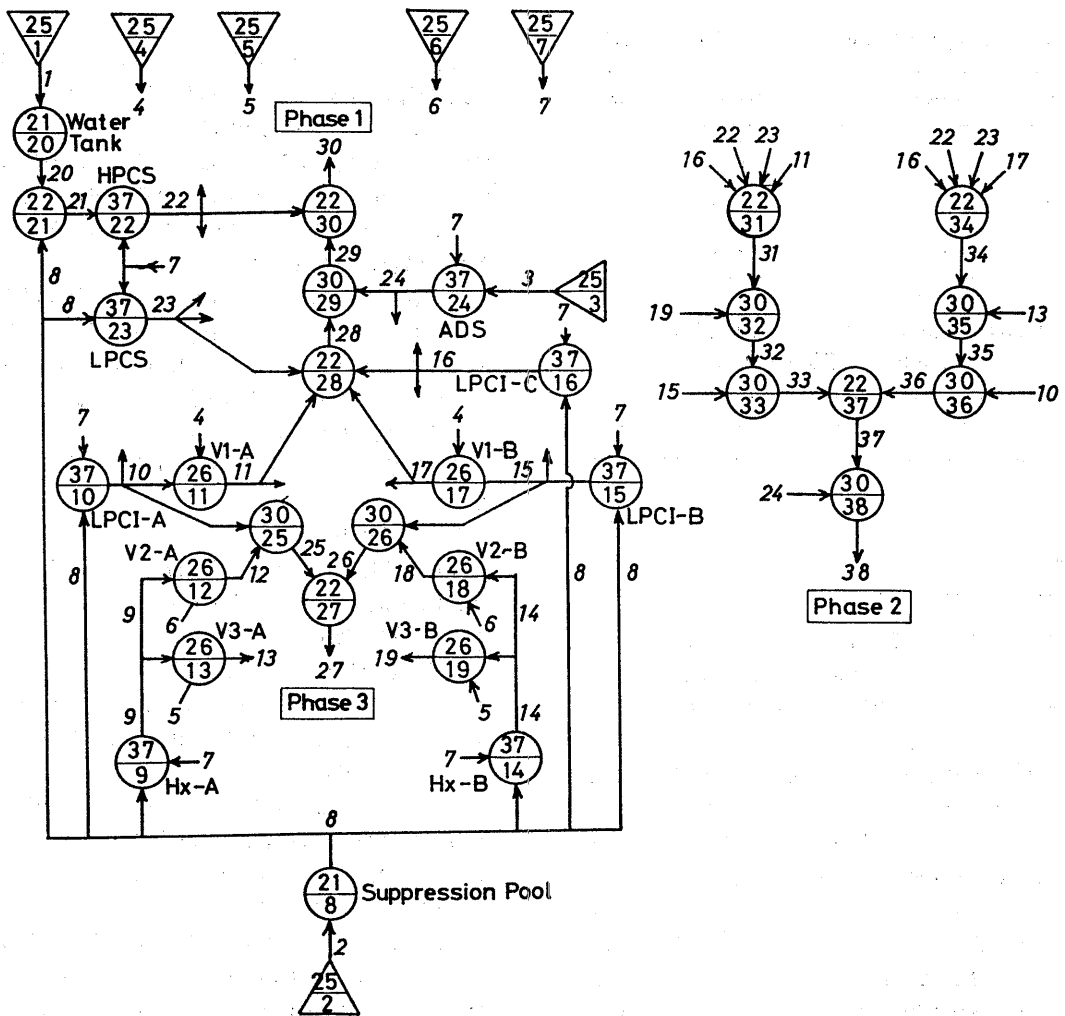


図5-19 GO-FLOW チャート (BWR 非常用炉心冷却系)

表5-13 タイム・ポイントの定義 (BWR 非常用炉心冷却系)

Time Points	作 用	意 味
1	信号#1, #2 発生開始	待機
2	信号#3 発生開始, 信号#4 発生	フェーズ 1 開始
3	信号#7 強度0.5	フェーズ 1 開始後30分
4	信号#5 発生	フェーズ 2 開始
5	信号#7 強度5.0	フェーズ 2 開始後 5 時間
6	信号#7 強度31.0	フェーズ 2 開始後36時間
7	信号#6 発生	フェーズ 3 開始
8	信号#7 強度84.0	フェーズ 3 開始後84時間

表5-14 バルブ開閉の状態 (BWR 非常用炉心冷却系)

Valves	Standby	Phase 1	Phase 2	Phase 3
V1- A	x	o	x o	x
B	x	o	o x	x
V2- A	x	x	x x	o
B	x	x	x x	o
V3- A	x	x	o x	x
B	x	x	x o	x

表5-15 単純化したバルブ開閉の状態 (BWR 非常用炉心冷却系)

Valves	Standby	Phase 1	Phase 2	Phase 3
V1-A,B	x	o	o	o
V2-A,B	x	x	x	o
V3-A,B	x	x	o	o

れ、フェーズ1, 2, 3の動作に対応している。

タイム・ポイントは表5-13のように定義する。

表5-14にバルブの実際の開閉状態を示す。フェーズ1において、V-1は、サブプレッション・プール水を炉心へ再注入するラインを確保するため開いておく。フェーズ2においては、サブプレッション・プール水の冷却のため、一つの熱交換器を働かせる。そのため、例えば、V-3Aを開き、V-1Aを閉じる。一方、残りのループは、冷却されたサブプレッション・プール水を炉心へ注入するために使用された。そのため、V-1Bを開き、V-2B, V-3Bを閉じておく。フェーズ3においては、熱交換器を通して冷却された水を、V-2を通して炉心へもどす。他のバルブは閉状態にしておく。

以上のバルブ開閉の動作を、本解析においては、表5-15の様に単純化して取り扱った。このバルブ開閉のモデルでも、GO-FLOWチャート中の各フェーズに対応する信号線(#30, #38, #27)は、各フェーズにおける動作を正しく模擬している。更に、各フェーズのミッションが終了した後も、仮に、動作を継続させた場合の動作確率も与えている。

表5-16にオペレータに与えたデータ及び対応する機器、意味を記す。文献(44)においては、故障率のデータとしては、ADS, LPCI, HPCS, LPCS, H_xの5つに、サブ・システム全体としての値が与えてある。それ故、本解析では、バルブ、タンク、パイプ等には、機能としての役割のみを与えて、故障は考慮しなかった。

(3) 解析結果

解析の手順及び結果を表5-17に示す。表記方法は表5-12と同様である。各タイム・ポイントにおける強度は、有効数字7桁まで示した。

信号#27はフェーズ3の動作に対応している。タイム・ポイント7, 8における強度の下に不動作確率を括弧の中に記した。信号#30, #38の強度の下にも、同様に不動作確率を示した。

オペレータ#31のORゲートの入力信号の一つである信号#11は信号#10の系統の信号である。そして、このORゲートの出力信号は更に下流において信号#10の系統と結合されている。この場合、原則として、5.6.3節で説明した方法により計算をする必要がある。しかし、#31のオペレータのORゲートにおいて、信号#11以外の入力信号のみで出力信号は1.0(有効桁数8桁において)となってしまうため、5.6.3節での計算方法を実施する必要はなくなる。

オペレータ#34の入力信号の一つの信号#17とオペレータ#33の入力信号である信号#15との間の関係も上と同様である。

更に、オペレータ#31と#34にはそれぞれ、信号

#16, #22, #23の共通の信号が入力しているが、この場合も、特定の一つの信号以外の入力で、ORゲートの出力は1.0となる。

表5-16 オペレータに与えるデータ (BWR 非常用炉心冷却系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~8)	タンク接続
2	25	1.0(1~8)	サブプレッション・プール接続
3	25	1.0(2~8)	ADS 作動, フェーズ 1 開始
4	25	1.0(2)	V1 開指令
5	25	1.0(4)	フェーズ 2 開始, V3 開指令
6	25	1.0(7)	V2 開指令
7	25	.5(3) 5.0(5) 31(6) 84(8)	経過時間
8	21	$P_p=1.0$	サブプレッション・プール
9	37	$\lambda=2.8 \times 10^{-6} / \text{hr}$	Hx-A
10	37	$\lambda=2.5 \times 10^{-5} / \text{hr}$	LPCI-A
11	26	$P_p=1.0$	V1-A
12	26	$P_p=1.0$	V2-A
13	26	$P_p=1.0$	V3-A
14	37	$\lambda=2.8 \times 10^{-6} / \text{hr}$	Hx-B
15	37	$\lambda=2.5 \times 10^{-5} / \text{hr}$	LPCI-B
16	37	$\lambda=2.5 \times 10^{-5} / \text{hr}$	LPCI-C
17	26	$P_p=1.0$	V1-B
18	26	$P_p=1.0$	V2-B
19	26	$P_p=1.0$	V3-B
20	21	$P_p=1.0$	タンク
21	22		OR Gate
22	37	$\lambda=2.7 \times 10^{-4} / \text{hr}$	HPCS
23	37	$\lambda=2.6 \times 10^{-6} / \text{hr}$	LPCS
24	37	$\lambda=1.4 \times 10^{-5} / \text{hr}$	ADS
25	30		AND Gate
26	30		AND Gate
27	22		OR Gate
28	22		OR Gate
29	30		AND Gate
30	22		OR Gate
31	22		OR Gate
32	30		AND Gate
33	30		AND Gate
34	22		OR Gate
35	30		AND Gate
36	30		AND Gate
37	22		OR Gate
38	30		AND Gate

表5-17 GO-FLOW 手法による計算手順 (BWR 非常用炉心冷却系)

Operator (Type)	Signal	Time Points							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 (25)	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2 (25)	2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 (25)	3	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4 (25)	4	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5 (25)	5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6 (25)	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
7 (25)	7	0.0	0.0	0.5	0.0	5.0	31.0	0.0	84.0
8 (21)	8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20 (21)	20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21 (22)	21	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
9 (37)	9	1.0	1.0	.9999986	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
13 (26)	13	0.0	0.0	0.0	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
12 (26)	12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.9998978	.9996627
10 (37)	10	1.0	1.0	.9999875	.9999875	.9998625	.9990879	.9990879	.9969920
11 (26)	11	0.0	1.0	.9999875	.9999875	.9998625	.9990879	.9990879	.9969920
14 (37)	14	1.0	1.0	.9999986	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
19 (26)	19	0.0	0.0	0.0	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
18 (26)	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.9998978	.9996627
15 (37)	15	1.0	1.0	.9999875	.9999875	.9998625	.9990879	.9990879	.9969920
17 (26)	17	0.0	1.0	.9999875	.9999875	.9998625	.9990879	.9990879	.9969920
25 (30)	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.9989858	.9966557
26 (30)	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.9989858	.9966557
27 (22)	27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.9999990 (1.03x10 ⁻⁶)	.9999888 (1.12x10 ⁻⁵)
23 (37)	23	1.0	1.0	.9999987	.9999987	.9999857	.9999051	.9999051	.9996867
24 (37)	24	0.0	1.0	.9999930	.9999930	.9999230	.9994891	.9994891	.9983144
16 (26)	16	1.0	1.0	.9999875	.9999875	.9998625	.9990879	.9990879	.9969920
28 (22)	28	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
29 (30)	29	0.0	1.0	.9999930	.9999930	.9999230	.9994891	.9994891	.9983144
22 (37)	22	1.0	1.0	.9998650	.9998650	.9985161	.9901934	.9901934	.9679886
30 (22)	30	1.0	1.0	1.0 (9.45x10 ⁻¹⁰)	1.0 (9.45x10 ⁻¹⁰)	.9999999 (1.14x10 ⁻⁷)	.9999950 (5.01x10 ⁻⁶)	.9999950 (5.01x10 ⁻⁶)	.9999460 (5.40x10 ⁻⁵)
31 (22)	31	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
32 (30)	32	0.0	0.0	0.0	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
33 (30)	33	0.0	0.0	0.0	.9999861	.9998471	.9989858	.9989858	.9966557
34 (22)	34	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
35 (30)	35	0.0	0.0	0.0	.9999986	.9999846	.9998978	.9998978	.9996627
36 (30)	36	0.0	0.0	0.0	.9999861	.9998471	.9989858	.9989858	.9966557
37 (22)	37	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	.9999990	.9999990	.9999888
38 (30)	38	0.0	0.0	0.0	.9999930 (7.0x10 ⁻⁶)	.9999230 (7.7x10 ⁻⁵)	.9994881 (5.12x10 ⁻⁴)	.9994881 (5.12x10 ⁻⁴)	.9983032 (1.70x10 ⁻³)

それ故、オペレータ #31, #34 の出力信号には、表7-3に見られるような、(16, 22, 23, 11) 等の表記を付け加える必要はない。信号 #31, #34 の強度は全タイム・ポイントにおいて1.0となっている。

表5-18に解析結果をまとめて示してある。各フェ

ーズの開始時及び終了時における対応する系の不動作確率が得られている。表中、括弧の中に示した数値は、仮に各フェーズにおいて要求された動作が終了した後も動作を継続した場合における不動作確率である。

表5-18 解析結果 (BWR 非常用炉心冷却系)

Time Point	State	Unreliability			
		Signal #30 (Phase 1)	Signal #38 (Phase 2)	Signal #27 (Phase 3)	System
1	Stand-by	0.0	1.0	1.0	
2	Phase 1 Demand	0.0	1.0	1.0	0.0
3	30 min. after	9.45×10^{-10}	1.0	1.0	9.45×10^{-10}
4	Phase 2 Demand	(9.45×10^{-10})	7.00×10^{-6}	1.0	7.00×10^{-6}
5	5 hr. after	(1.14×10^{-7})	7.70×10^{-5}	1.0	7.70×10^{-5}
6	36 hr. after	(5.01×10^{-6})	5.12×10^{-4}	1.0	5.12×10^{-4}
7	Phase 3 Demand	(5.01×10^{-6})	(5.12×10^{-4})	1.03×10^{-6}	5.13×10^{-4}
8	84 hr. after	(5.40×10^{-5})	(1.70×10^{-3})	1.12×10^{-5}	5.23×10^{-4}

各フェーズにおいて、炉心からの有効な除熱という指令を満足するためには、各フェーズの対応する系が正常に動作するだけではだめである。例えば、フェーズ2における動作が失敗している場合は、たとえフェーズ3で熱交換器 (H_x)、低圧注入系 (LPCI) が正常に動作したとしても、フェーズ3における要求は満たされていないと考える。それ故、システム全体として考えた場合の各フェーズにおける動作失敗確率は、それ以前のフェーズにおけるシステムの動作成功/失敗に依存することとなる。表7-9におけるシステム故障確率は各フェーズ以前の故障確率を加え合わせたものとなっている。

図5-20に、動作失敗確率の時間経過による推移を

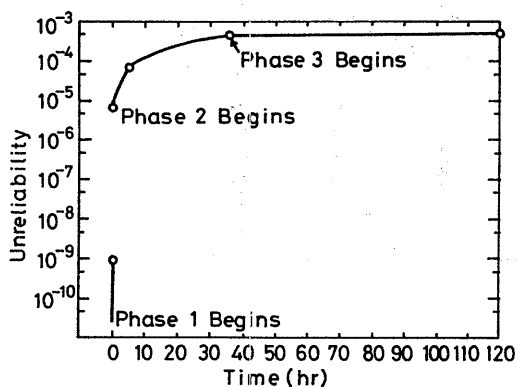


図5-20 解析結果 (BWR 非常用炉心冷却系)

示す。図中、実線は文献(44)に示された解析結果であり、○印は、本解析の結果である。GO-FLOW手法により同一の結果が得られることがわかる。

5.7.3 船用炉非常炉心注入系非常用電源系

(1) 系の説明

船用炉非常炉心注入系は、図5-21に示すように、独立二系統の高圧注入系 (HPCI)、ポンプ出口がタイラインで接続された二系統の低圧注入系 (LPCI)、及び、再循環冷却系一系統で構成されている。

この系も、LOCA後の炉心からの除熱を目的としており、時間経過に伴い動作モードが順次変化する Phased Mission Problem の一例と言える。

この系の非常用電源としては、補助発電機 (720kW) 2台、非常用発電機 (240kW) 1台の計3台のディーゼル発電機が用意されている。本章では、この非常用電源系の信頼性解析に GO-FLOW 手法を適用した例を示す。

3台のディーゼル発電機のうち1台の機能が満足されれば非常用電源は確保される。そこで(1)LOCA信号発生と共に、ディーゼル発電機3台が同時に起動される、単純な冗長系の場合と、(2)LOCA信号発生と共にディーゼル発電機1台が起動され、他の2台は、バック・アップとして待機状態に置かれている、待機冗長系の場合、の2ケースについて解析を行い相互の比較を行う。また、ケース2の場合については、解析的な解も合わせて求める。

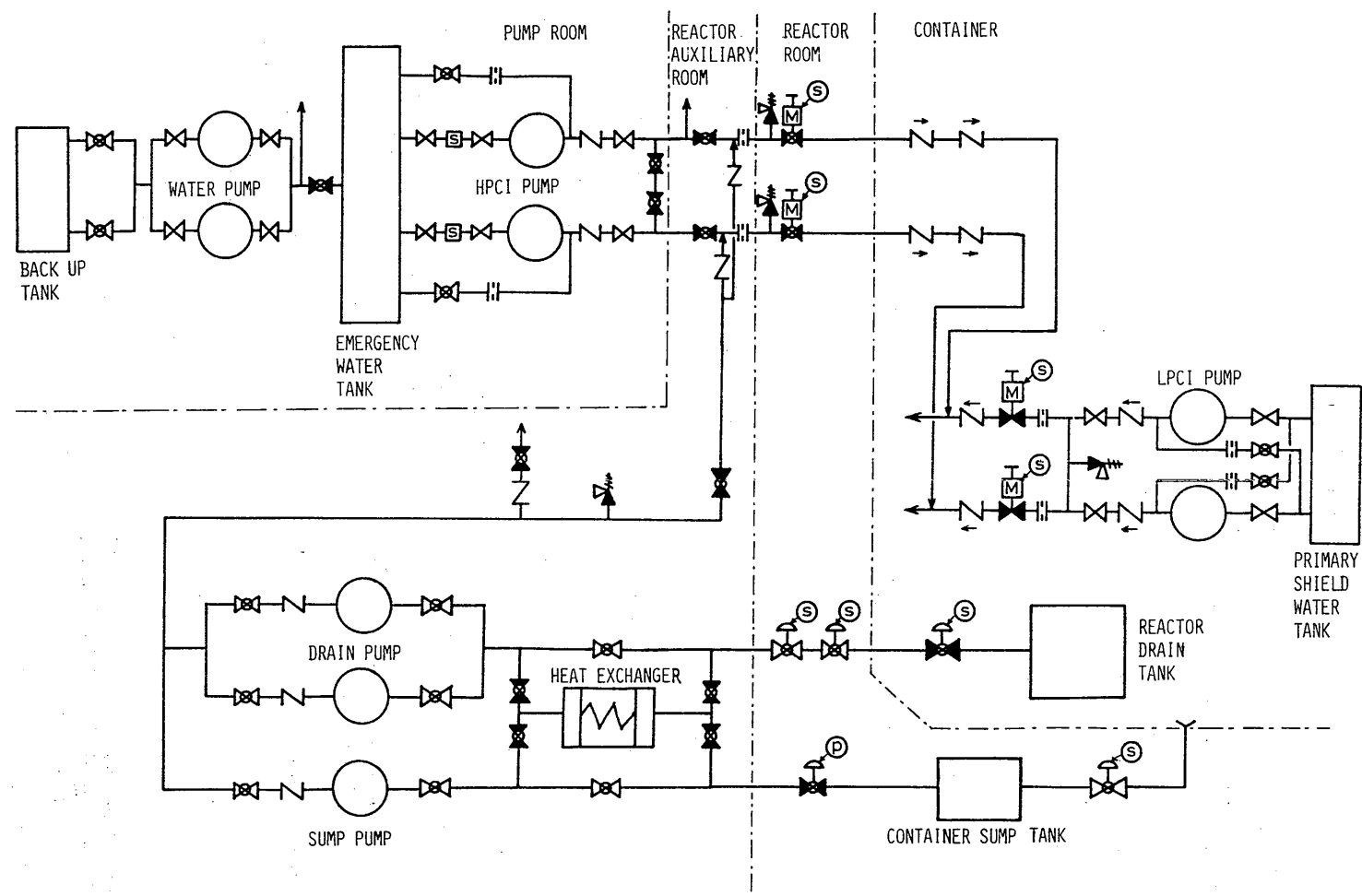


图5-21 船用炉非常炉心注入系

(2) 冗長系, ケース(1)

非常用電源系の部分を GO-FLOW チャートに表現すると図5-22 のようになる。最終信号線は#14であり少なくとも1台のディーゼル発電機が動作状態にあること, すなわち, 非常用電源の確保を意味している。

タイム・ポイントは表5-19 のように定義する。LOCA 信号が発せられるまでの系の待機時間は720時間(30日)とした。非常炉心注入系の動作モードの変化に対応して, Phase1 は0~30分, Phase2 は30分~1時間, Phase3 は1~36時間とした。非常用電源系にとっては, これらの区別は特に意味はないが, 非常

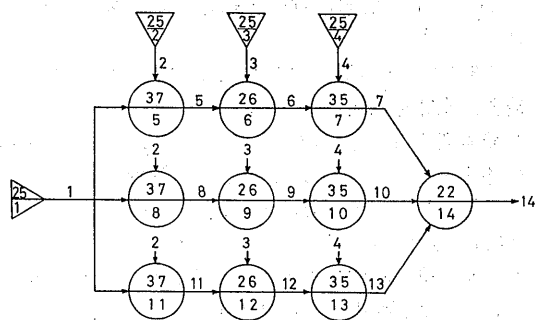


図5-22 GO-FLOW チャート (冗長系)

表5-19 タイム・ポイントの定義 (冗長系)

Time Points	作 用	意 味
1	信号#1 発生開始	初期時刻
2	信号#2 強度720.0 信号#3 発生	Phase 1 開始
3	信号#4 強度0.25	15分後
4	信号#4 強度0.25	30分後, Phase 1 終了, Phase 2 開始
5	信号#4 強度0.25	45分後
6	信号#4 強度0.25	1時間後, Phase 2 終了, Phase 3 開始
7	信号#4 強度11.0	12時間後
8	信号#4 強度12.0	24時間後
9	信号#4 強度12.0	36時間後, Phase 3 終了

表5-20 オペレータに与えるデータ (冗長系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~9)	非常用電源系待機開始
2	25	720(2)	待機時間
3	25	1.0(2)	起動信号
4	25	.25(3~6), 11.0(7), 12.0(8~9)	経過時間
5	37	$\lambda = 0.0$	DG 1 待機中の故障
6	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 1 起動
7	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 1 運転中の故障
8	37	$\lambda = 0.0$	DG 2 待機中の故障
9	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 2 起動
10	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 2 運転中の故障
11	37	$\lambda = 0.0$	DG 3 待機中の故障
12	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 3 起動
13	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 3 運転中の故障
14	22		OR ゲート

炉心注入系の信頼性解析と結びつける場合に意味を持つてくる。

表5-20 にオペレータに与えたデータ及び対応する機器、意味を示す。タイプ37のオペレータはディーゼル発電機の待機中の故障をモデル化している。DGの待機中の故障は小であるので、本解析では、無視した。従って、タイプ37のオペレータのデータには、 $\lambda = 0.0$ が与えてある。タイプ26のオペレータはディーゼル発電機の起動をモデル化しており、タイプ35のオペレータは運転中の故障発生をモデル化している。

信号#1に対応する実在の流れ、信号は存在しないが、この信号は、ディーゼル発電機が待機状態にあり起動指令を受け付ける態勢にあることをあらわしている。タイプ37オペレータを通過後の信号#5、#8、#11も信号#1と同じ意味である。信号#2は待機時間、信号#3は起動指令、信号#4はディーゼル発電機の運転時間をそれぞれあらわしている。その他の信号は、ディーゼル発電機からの電力をあらわしていると考えられる。

解析の手順及び結果を表5-21に示す。表記方法は表5-12,17等と同様である。

(3) 待機冗長系, ケース(2)

待機冗長系とした場合の非常用電源系をGO-FLOWチャートにあらわすと、図5-23のようになる。図5-23と比較すると、オペレータ#5、#9、#10、#11、#15、#16、#17が増えている。信号#3の起動指令は#7のオペレータのみに入っている。ディーゼル発

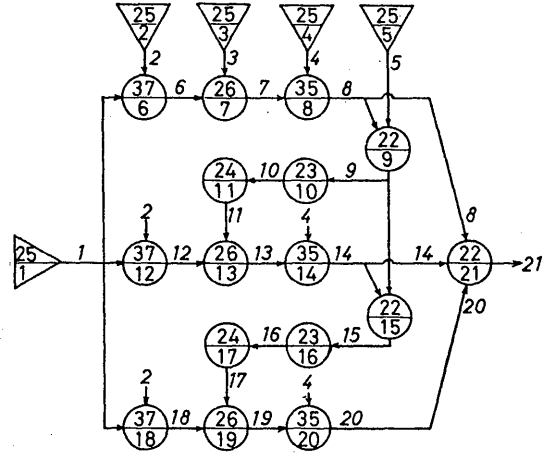


図5-23 GO-FLOWチャート (待機冗長系)

表5-21 GO-FLOW手法による計算手順 (冗長系)

Operator (Type)	Signal	Time Points									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1 (25)	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2 (25)	2	0.0	720.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3 (25)	3	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4 (25)	4	0.0	0.0	0.25	0.25	0.25	0.25	11.0	12.0	12.0	12.0
5 (37)	5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6 (26)	6	0.0	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
7 (35)	7	0.0	0.97	0.969293	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699	
8 (37)	8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
9 (26)	9	0.0	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
10 (35)	10	0.0	0.97	0.969293	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699	
11 (37)	11	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
12 (26)	12	0.0	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
13 (35)	13	0.0	0.97	0.969293	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699	
14 (22)	14	0.0	0.999973	0.999971	0.999969	0.999967	0.999964	0.999734	0.999076	0.997838	

電機の起動をモデル化した他のオペレータ#13, #19には, #11, #17の信号線が入っており, 起動はこれらの信号によって行なわれる。最終信号線は, #21であり, 1台のディーゼル発電機が動作状態にあるこ

とを意味している。

タイム・ポイントは表5-22の様に定義する。単純な冗長系の場合と同じである。

表5-23にオペレータに与えたデータ及び対応する

表5-22 タイム・ポイントの定義 (待機冗長系)

Time Points	作 用	意 味
1	信号 #1 発生開始	初期時刻
	信号 #5 強度1.0	
2	信号 #2 強度720.0	Phase 1 開始
	信号 #3 発生	
3	信号 #4 強度0.25	15分後
4	信号 #4 強度0.25	30分後, Phase 1 終了, Phase 2 開始
5	信号 #4 強度0.25	45分後
6	信号 #4 強度0.25	1 時間後, Phase 2 終了, Phase 3 開始
7	信号 #4 強度11.0	12時間後
8	信号 #4 強度12.0	24時間後
9	信号 #4 強度12.0	36時間後, Phase 3 終了

表5-23 オペレータに与えるデータ (待機冗長系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~9)	非常用電源系待機開始
2	25	720(2)	待機時間
3	25	1.0(2)	起動指令
4	25	.25(3~6), 11.0(7), 12.0(8~9)	経過時間
5	25	1.0(1)	ディーゼル発電機を待機させておく
6	37	$\lambda=0.0$	DG 1 待機中の故障
7	26	$P_f=3 \times 10^{-2}$	DG 1 起動
8	35	$\lambda=3 \times 10^{-3}/h$	DG 1 運転中の故障
9	22		OR ゲート
10	23		DG 1 運転停止の時信号発生
11	24		DG 2 起動指令
12	37	$\lambda=0.0$	DG 2 待機中の故障
13	26	$P_f=3 \times 10^{-2}$	DG 2 起動
14	35	$\lambda=3 \times 10^{-3}/h$	DG 2 運転中の故障
15	22		OR ゲート
16	23		DG 2 運転停止の時信号発生
17	24		DG 3 起動指令
18	37	$\lambda=0.0$	DG 3 待機中の故障
19	26	$P_f=3 \times 10^{-2}$	DG 3 起動
20	35	$\lambda=3 \times 10^{-3}/h$	DG 3 運転中の故障
21	22		OR ゲート

機器, 意味を示す。タイプ25のオペレータ#5は信号#5を発生する。この信号は初期時刻(タイム・ポイント1)において, 二番目, 三番目のディーゼル発電機を起動させないでおくために必要である。つまり, タイム・ポイント1において, 強度1.0の信号を発生し, それにより, タイム・ポイント1における信号#11, #17(起動指令)の強度を0.0にしておく。タイプ23のオペレータ#10は, 入力信号#9が存在しない時に信号を発生する。信号#9は信号#8と#5がORゲートにより結合されたものであるので, #10の信号は, タイム・ポイント2以降においてディーゼル発電機1の運転が停止している時に発せられることとなる。タイプ24のオペレータ#11は, 入力信号#10の直前のタイム・ポイントからの増減量を出力する。これにより, 出力信号11は, ディーゼル発電機2の起動指令となる。#16, #17のオペレータもそれぞれ#10, #11と同様の働きをしている。その他のオペレータの役割は, 表5-20の場合と同様である。

解析の手順及び結果を表5-24に示す。第11行目

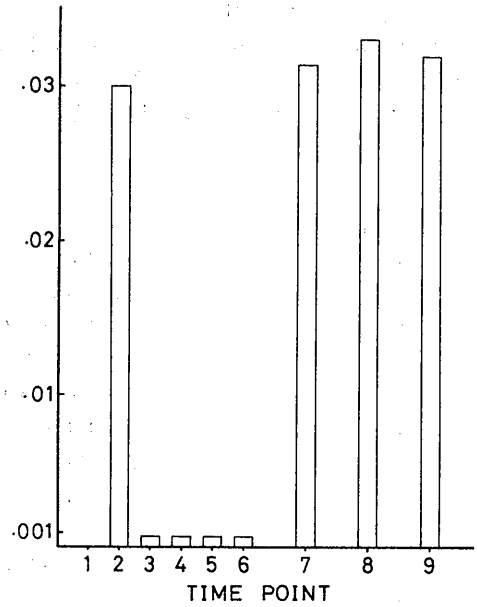


図5-24 ディーゼル発電機2の起動指令

表5-24 GO-FLOW 手法による計算手順 (待機冗長系)

Operator (Type)	Signal	Time Points								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 (25)	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2 (25)	2	0.0	720.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3 (25)	3	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4 (25)	4	0.0	0.0	0.25	0.25	0.25	0.25	11.0	12.0	12.0
5 (25)	5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6 (37)	6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7 (26)	7	0.0	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
8 (35)	8	0.0	0.97	0.969273	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699
9 (22)	9	1.0	0.97	0.969273	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699
10 (23)	10	0.0	0.03	0.030727	0.031454	0.032180	0.032906	0.064299	0.097385	0.129301
11 (24)	11	0.0	0.03	0.000727	0.000727	0.000726	0.000726	0.031393	0.033086	0.031916
12 (37)	12	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
13 (26)	13	0.0	0.0291	0.029805	0.030510	0.031215	0.031919	0.062370	0.094463	0.125422
14 (35)	14	0.0	0.0291	0.029783	0.030465	0.031147	0.031828	0.060744	0.090097	0.117271
15 (22)	15	1.0	0.9991	0.999056	0.999011	0.998967	0.998922	0.996445	0.992712	0.987970
16 (23)	16	0.0	0.0009	0.000944	0.000989	0.001033	0.001078	0.003555	0.007288	0.012030
17 (24)	17	0.0	0.0009	0.000044	0.000045	0.000044	0.000045	0.002477	0.003733	0.004742
18 (37)	18	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
19 (26)	19	0.0	0.000873	0.000916	0.000959	0.001002	0.001046	0.003448	0.007069	0.011669
20 (35)	20	0.0	0.000873	0.000915	0.000958	0.001000	0.001043	0.003372	0.006808	0.011081
21 (22)	21	0.0	0.999973	0.999971	0.999969	0.999967	0.999965	0.999817	0.999520	0.999051

で、ディーゼル発電機2の起動指令が得られる。図5-24に各タイム・ポイントにおけるこの信号の強度を示す。第13行目に、ディーゼル発電機2が起動指令により正常に起動を開始した割合が得られている。これを図に表すと、図5-25となる。

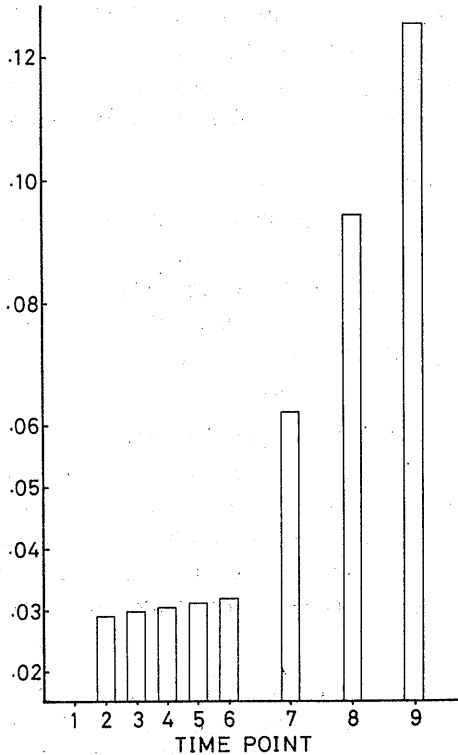


図5-25 ディーゼル発電機2の動作確率

第14行目には、起動を開始したディーゼル発電機2が運転中の故障発生により停止した分だけ減少した運転状態にある割合が記してある。この計算には、タイプ35のオペレータの定義式を用いてある。例えば、タイム・ポイント8における信号#14の強度を与える計算式は次のようになる。

$$14(8) = 0.094463 \times \exp \left\{ -\lambda \times 0.25 \times \frac{0.0291}{0.094463} \right. \\ \left. - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.029805}{0.094463} - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.030510}{0.094463} \right. \\ \left. - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.031215}{0.094463} - \lambda \times 11.0 \times \frac{0.031919}{0.094463} \right\}$$

$$-\lambda \times 12.0 \times \frac{0.062370}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000704}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 11.0 \times \frac{0.030451}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 12.0 \times \frac{0.032093}{0.094463} \quad (5-21)$$

指数の中の第一項は、タイム・ポイント2において起動していたディーゼル発電機がタイム・ポイント2～3の間の0.25時間の中に故障する部分で、図5-26①に相当している。

第七項は、タイム・ポイント2～3の間に新たに起動したディーゼル発電機がその間の運転中に故障する割合を計算している。タイム・ポイント3における信号#13の強度は、起動指令により起動を開始したディーゼル発電機のタイム・ポイント3における累積値である。タイム・ポイント2から3の間で絶えず新たな起動指令が発せられ、その間、起動を開始したディー

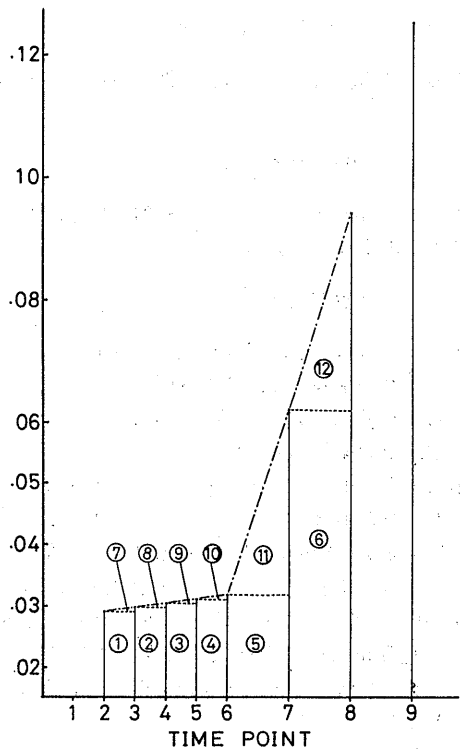


図5-26 タイプ35オペレータの計算式の説明図

ゼル発電機の割合は順次増大していくわけである。タイプ35のオペレータの定義式は、その間、一定割合で起動指令が出るとした場合の近似値となっている。単位時間当たり s の割合で起動するとすると、 $t_2 \sim t_3$ の間で起動を開始したディーゼル発電機が t_3 において作動している割合は次の式で表せられる。

$$\begin{aligned} \int_{t_2}^{t_3} s e^{-\lambda(t_3-t)} dt &= s \int_0^{t_3-t_2} e^{-\lambda t} dt = \frac{s}{\lambda} (1.0 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}) \\ &= \frac{s}{\lambda} (1.0 - 1.0 + \lambda(t_3-t_2) - \frac{1}{2} \lambda^2 (t_3-t_2)^2) \\ &= s \left((t_3-t_2) - \frac{1}{2} \lambda (t_3-t_2)^2 \right) \\ &= s \times (t_3-t_2) \left\{ 1.0 - \frac{1}{2} \lambda (t_3-t_2) \right\} \quad (5-22) \end{aligned}$$

ここで $s \times (t_3-t_2)$ は $t_2 \sim t_3$ の間で新たに起動を開始した割合、つまり、タイム・ポイント2～3の間での信号#13の増加量である。それ故

$$s \times (t_3-t_2) = \#13(3) - \#13(2) = 0.000705 \quad (5-23)$$

となり、又、 $t_3-t_2 = 0.25$ であるので、元の式は、

$$0.000705 \times \left(1.0 - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \right)$$

となる。この結果、 $t_2 \sim t_3$ の間の故障による減少量は

$$0.000705 \times \frac{1}{2} \lambda \times 0.25$$

であることがわかる。一方、(5-21)式を展開し、第7項からの寄与を求めると、

$$-0.000705 \times \frac{1}{2} \lambda \times 0.25$$

である。これにより、(5-21)式、すなわち、タイプ35オペレータの定義式は、この故障発生モデルの近似式となっていることがわかる。図5-26において、⑦の部分、上記検討部分に相当する。

第八～十二項はそれぞれ⑧～⑫に対応する。

なお、今の場合、タイム・ポイント1～2の間については上記7～12項に相当する項は出てこない。これは、タイム・ポイント2における副入力信号#4の強度を0.0にしてあるためである。タイプ35の定義式により、起動指令が順次増大する場合だけでなく、突然、ステップ状に増大する場合も正しく取り扱えることがわかる。

表5-24における第15行目は、ディーゼル発電機1と2どちらかが運転状態にある確率をあらわしてい

る。(タイム・ポイント1における値は除く)

#10のオペレータにより、#9の信号から、#10の信号が得られた際、#10は、#9の補集合となっていた。それ故、#15のオペレータのORゲートの計算の時は、#9と#14の信号で重なり合う部分がないため、単純な加算を行う。

最終オペレータのORゲートも、同様に、信号#8、#14、#20の強度の単純な加算となる。

最終結果は、信号#21の強度である。これは、どれか一台のディーゼル発電機が作動状態にある確率を表している。

(4) 解析的な解法、ケース(2)

ここで、ケース(2)の場合を解析的に解いて、前節のGO-FLOW手法による結果と比較してみる。

ディーゼル発電機1～3の運転状態にある確率を、それぞれ、 N_1, N_2, N_3 と置く。タイム・ポイント2を時間の原点に取り、 $t=0$ と置く。

$t=0$ における初期値は、

$$\begin{aligned} N_1(0) &= (1.0 - 720 \times \lambda_s) \times (1.0 - Q_d) \\ &= 1.0 \times (1.0 - 0.03) = 0.97 \quad (5-24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2(0) &= (1.0 - N_1(0)) \times (1.0 - 720 \cdot \lambda_s) \times (1.0 - Q_d) \\ &= 0.03 \times 1.0 \times 0.97 = 0.0291 \quad (5-25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_3(0) &= (1.0 - N_1(0) - N_2(0)) \times (1.0 - 720 \cdot \lambda_s) \\ &\quad \times (1.0 - Q_d) = 0.0009 \times 1.0 \times 0.97 = 0.000873 \quad (5-26) \end{aligned}$$

となる。これらは、表5-24の、タイム・ポイント2における信号#8、#14、#20の強度と同じである。なお上記計算において、 λ_s (待機中の故障率) = 0.0、 Q_d (起動失敗確率) = 0.03の値を用いた。

N_1, N_2, N_3 についての式を立てると次のようになる。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_o \cdot N_1 \quad (5-27)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (1.0 - Q_d) \times \lambda_o \cdot N_1 - \lambda_o \cdot N_2 \quad (5-28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= (1.0 - Q_d) \times Q_d \times \lambda_o \cdot N_1 + (1.0 - Q_d) \\ &\quad \times \lambda_o \cdot N_2 - \lambda_o \cdot N_3 \quad (5-29) \end{aligned}$$

(5-28)式右辺の第一項は、第1のディーゼル発電機が故障した場合に第2のディーゼル発電機が起動される割合である。

(5-29)式の第1項は、第一のディーゼル発電機が故

障し、第2のディーゼル発電機に起動指令が出されたが、起動失敗し、最後に、第3のディーゼル発電機が起動される割合である。第二項は、第2のディーゼル発電機が運転中停止し、第3のディーゼル発電機が起動される割合である。

N_1 はすぐ

$$N_1(t) = N_1(0) \times e^{-\lambda_0 t} = 0.97 \times e^{-0.003 \cdot t} \quad (5-30)$$

と求まる。

(5-28)式に(5-30)式を代入すると、

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_0(1-Q_d) \times N_1(0) \times e^{-\lambda_0 t} - \lambda_0 \cdot N_2 \quad (5-31)$$

両辺に $e^{\lambda_0 t}$ を乗じ、変形すると、

$$\frac{d}{dt} \{N_2 e^{\lambda_0 t}\} = \lambda_0(1-Q_d) N_1(0) \quad (5-32)$$

上式を積分し、初期条件を代入すると、

$$N_2(t) = \{0.0291 + \lambda_0(1-Q_d) N_1(0) \times t\} \times e^{-\lambda_0 t} \\ = (0.0291 + 0.0028227 \times t) \times e^{-0.003 \cdot t} \quad (5-33)$$

と、 $N_2(t)$ についての式が求まる。

(5-29)式に、(5-30)、(5-33)式を代入すると、

$$\frac{dN_3}{dt} = (1-Q_d) \lambda_0 N_1(0) e^{-\lambda_0 t}$$

$$+ (1-Q_d) \lambda_0 (0.0291 + \lambda_0(1-Q_d) N_1(0) t) e^{-\lambda_0 t} - \lambda_0 N_3 \quad (5-34)$$

両辺に $e^{\lambda_0 t}$ を乗じ変形すると、

$$\frac{d}{dt} \{N_3 e^{\lambda_0 t}\} = \lambda_0(1-Q_d) (0.0291 + Q_d N_1(0)) \\ + \lambda_0^2 (1-Q_d)^2 N_1(0) t \quad (5-35)$$

積分を実行し、初期条件を代入すると、

$$N_3(t) = \{0.000873 + \lambda_0(1-Q_d) (0.0291 + Q_d N_1(0)) \\ \times t + \frac{1}{2} \lambda_0^2 (1-Q_d)^2 N_1(0) \times t^2\} e^{-\lambda_0 t} \\ = (0.000873 + 1.6936 \times 10^{-4} \times t + 4.107 \\ \times 10^{-6} \cdot t^2) e^{-\lambda_0 t} \quad (5-36)$$

と、 $N_3(t)$ についての式が求まる。

(5-30)、(33)、(36)式の t に数値を代入して計算すれば、各時刻における N_1 、 N_2 、 N_3 の値、つまり、各タイム・ポイントにおける、ディーゼル発電機1,2,3の運転確率が求まる。結果を表5-25に示す。表には、GO-FLOW手法による解析結果も合わせて示した。

一般的に、両者は大変良い一致を示している。

N_1 の値は両者まったく同じである。

N_2 の値は、GO-FLOWの方が、タイム・ポイント7~8において、やや小であるが、これは、起動状態

表5-25 解析結果の比較 (解析的な解と GO-FLOW 手法における信号強度との比較)

	2	3	4	Time 5	Points 6	7	8	9
N_1	0.97	0.96923	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699
#8	0.97	0.96923	0.968546	0.967820	0.967094	0.935701	0.902615	0.870699
N_2	0.0291	0.029783	0.030466	0.031147	0.031827	0.060746	0.090117	0.117335
#14	0.0291	0.029783	0.030466	0.031147	0.031828	0.060744	0.090097	0.117271
N_3	0.000873	0.000915	0.000957	0.001000	0.001043	0.003373	0.006796	0.011034
#20	0.000873	0.000915	0.000958	0.001000	0.001043	0.003372	0.006808	0.011081
Total	0.999973	0.999971	0.999969	0.999967	0.999964	0.999820	0.999528	0.999068
#21	0.999973	0.999971	0.999969	0.999967	0.999965	0.999817	0.999520	0.999051

にあるディーゼル発電機の割合の増加を各タイム・ポイント間で直線的と仮定しているため、故障確率をやや大き目に見積もっているためである。

N_3 の値は、GO-FLOWの方が、タイム・ポイント8,9において、やや大きくなっているが、これは、 N_2 の値が小であった分だけ、第3のディーゼル発電機の起動が余分に要求されたためである。

$N_1 \sim N_3$ の和についてみると、更に良い一致を示している。GO-FLOWの方がタイム・ポイント7~9において、わずかばかり小の値を示している。

以上、解析的な解と比較した結果、GO-FLOW手法は厳密解に大変近い値を与えていることが示された。本解析例は、比較的単純な系であったため、解析的な解が簡単に得られたが、複雑な系の場合、常に解析的に解けるとは限らない。これに対し、GO-FLOW手法は離散的なタイム・ポイントを取り、数値的に処理していく方法のため、基本的にはGO-FLOWチャートに表現することができれば解析可能となる。ここにGO-FLOW手法の特長があると言える。

図5-27に、ケース(1)、ケース(2)のGO-FLOW手法

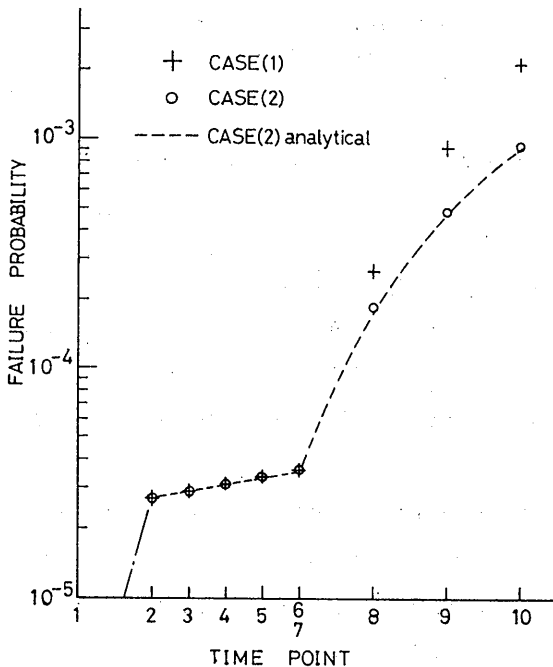


図5-27 解析結果 (船用炉非常炉心注入系用電源)

による解析結果及びケース(2)の解析的な解を示す。図中、横軸のタイム・ポイント間の間隔は実際の時間間隔と一致していないことに注意する必要がある。ケース(1)とケース(2)では時間経過と共に大きな差が出てくる。これは、非常用電源の動作要求後の起動確率に対してはどちらのケースでも差はないが、長時間冷却に対するシステムの信頼性は、ケース(2)の待機冗長系とした方が向上することを意味している。

5.7.4 加圧水型原子炉補助給水系

本節では、Time Dependent Unavailability 解析のGO-FLOW手法による実施例を紹介し、試験、修理をも考慮に入れた解析が可能であることを示す。

(1) 系の説明

解析対象は Reactor Safety Study⁽³⁾で取り上げられた、加圧水型原子炉補助給水系を単純化したものである。

図5-28に補助給水系のフロー・チャートを示す。この系は、蒸気発生器の二次側に補給水を供給し、主給水の喪失をバック・アップする機能を持っている。系には、3台のポンプが備えられており、2台は電動ポンプで1台はタービン駆動ポンプである。タンクからの補給水を途中並列に置かれた二基のヘッダーを介して蒸気発生器へ供給する。3台中1台のポンプが確保されれば補助給水系の機能は満足されるものとする。

図5-29は、補助給水系のフォールト・ツリーで Reactor Safety Studyからの再録である。このツリーの中で頂上事象へ主要な寄与をなすものは、“No Flow from Turbine Pump”と“No Flow from Elec Pump A,B”である。Pump A,Bの不作動の主要原因は電源喪失で、今の場合にはディーゼル発電機の故障となる。“No Flow from Turbine Pump”は故障モード、PSTTBCNT, PXV4041Y, …で構成されており、その中にポンプ、バルブの故障が含まれている。

結局、試験、修理の対象となっており、故障確率の高い機器でこの系を表現すると、図5-30のように単純化されたブロック・ダイアグラムが得られる。解析はこのブロック・ダイアグラムを基に実施した。

次に、定期試験のスケジュールであるが、複数の機器が試験対象となっているため、試験時期のオーバー・ラップ等に種々の場合が考えられるが⁽⁴⁷⁾、本解析では次のように仮定した。

バルブ、ポンプは、30日毎に同時に試験を実施する。ディーゼル発電機は60日毎に試験するが、2台の

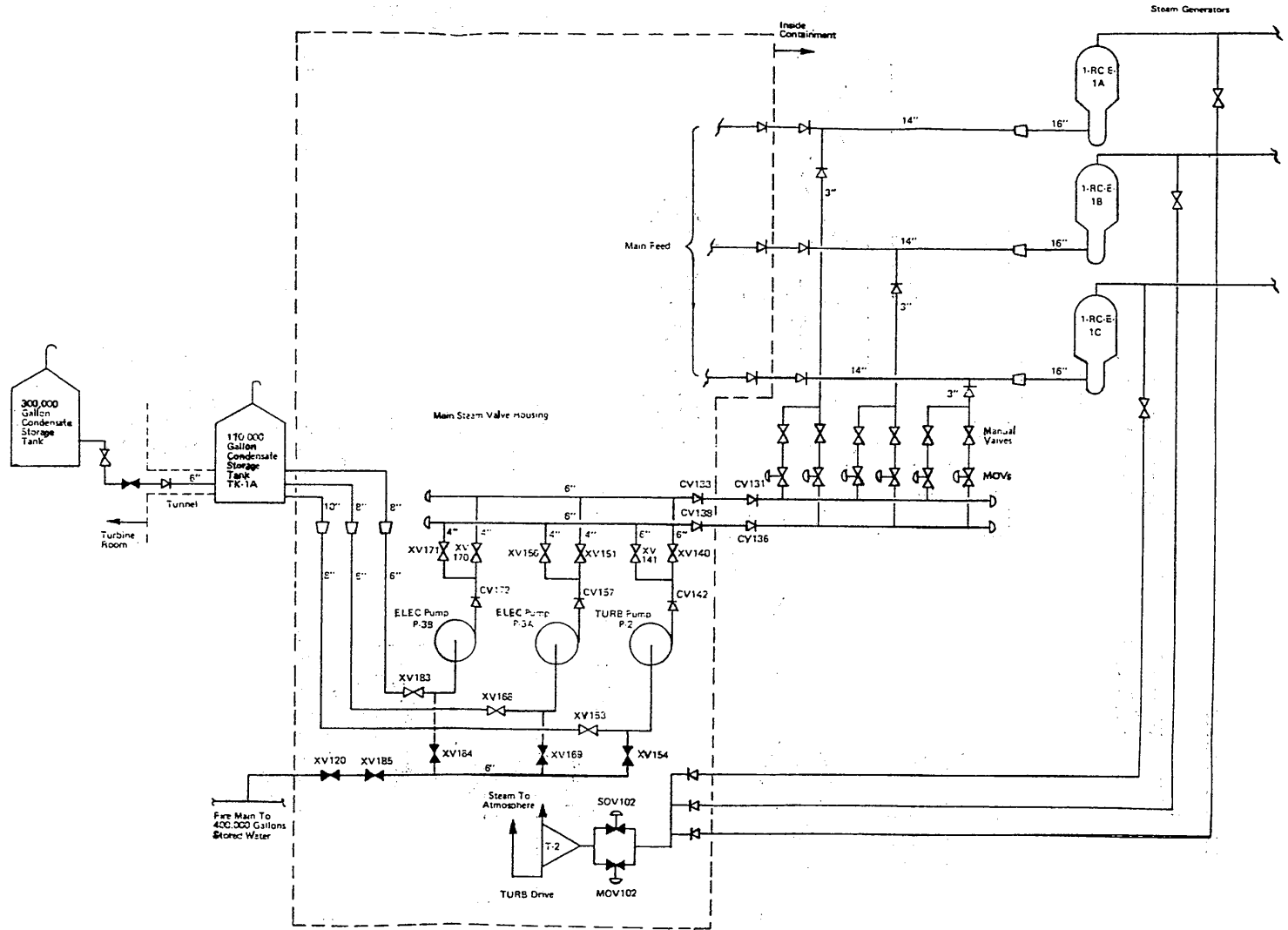


図5-28 PWR 補助給水系

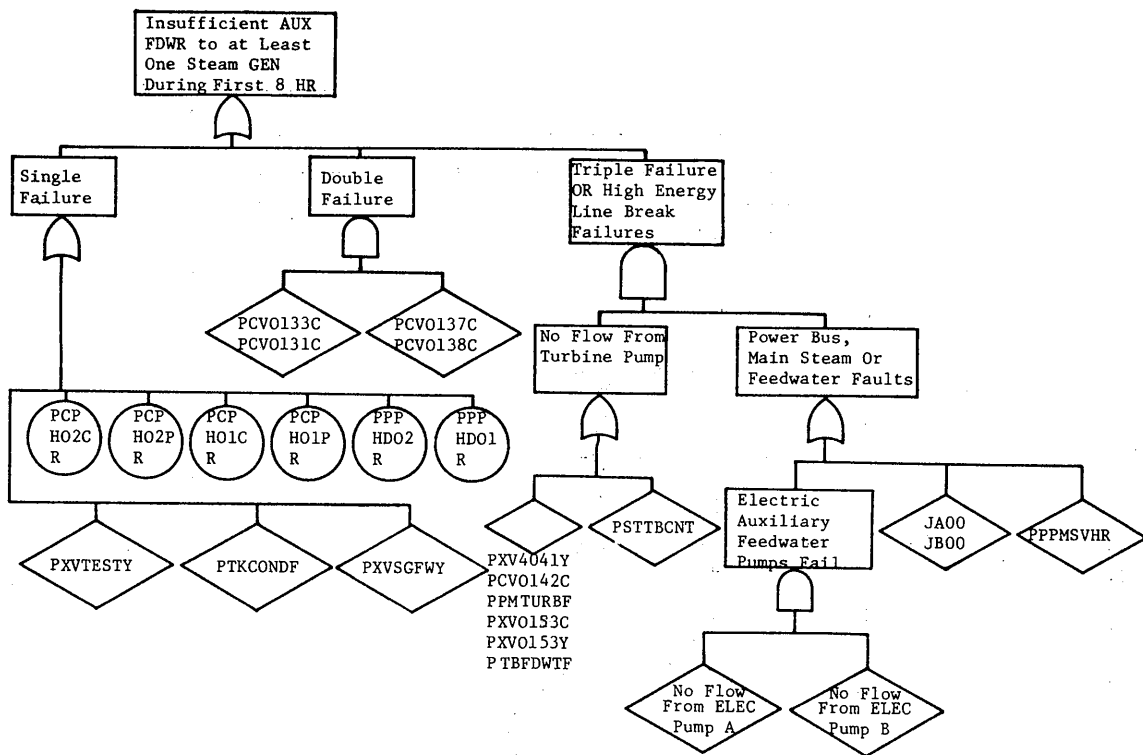


図5-29 PWR 補助給水系のフォールト・ツリー

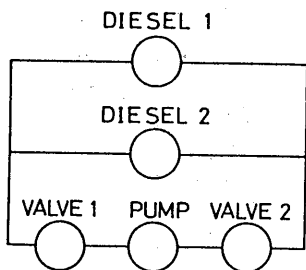


図5-30 ブロック・ダイアグラム (PWR 補助給水系の主要部分)

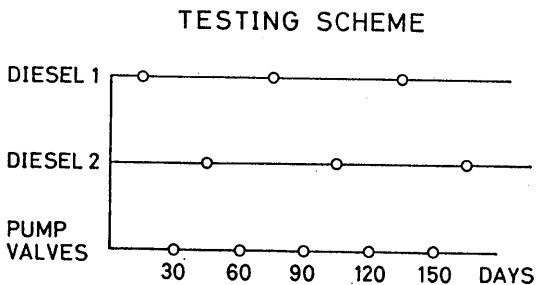


図5-31 テスト・スケジュール (PWR 補助給水系)

ディーゼル発電機相互、及びバルブ、ポンプとも試験時期をずらす。図5-31に定期試験のスケジュールを示す。

試験に要する平均時間は、すべての機器共、1.5時間とする。もし、試験により故障が発見された場合は、修理を実施するが、その修理に要する平均時間は、バルブが7時間、ポンプが19時間、ディーゼル発電機が21時間であるとした。更にディーゼル発電機は試験中であっても、起動要請がある場合は、90%の確率で起動可能であるとした。

(2) GO-FLOW チャートによる表現

図5-30のブロック・ダイアグラムから、試験、修理条件を組み込み、GO-FLOW チャートを作成すると図5-32のようになる。図中、各々のオペレータの下に対応する機器名を記した。

タイプ37のオペレータは故障発生と修理をモデル化しており、タイプ39のオペレータは定期試験の実施をモデル化している。信号#16は時間経過量を与え、信号#17、#18、#19、#20は修理完了の信号を与

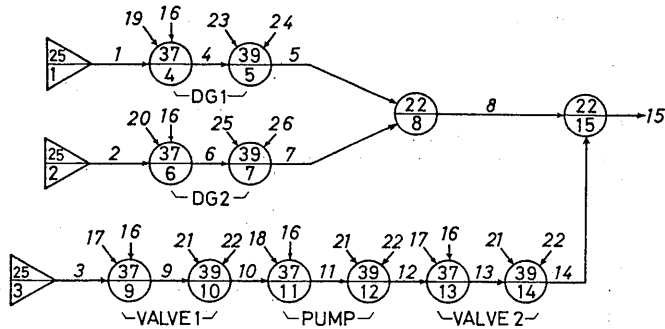


図5-32 GO-FLOW チャート (PWR 補助給水系)

えている。信号#21, #23, #25は定期試験の開始信号で、信号#22, #24, #26は定期試験の終了信号である。最終信号線は#15で系の動作可能状態に対応している。

表5-26に各オペレータに与えたデータ及び対応する機器、意味を記す。オペレータ#5, #7の P_c の値は0.1とし、ディーゼル発電機が試験中でも0.9の確率で起動可能な事をモデル化している。

タイム・ポイントは表5-27に示したように定義する。75日目までの試験、修理の実施に対応して30個のタイム・ポイントを定めた。タイム・ポイント1は初期時刻。タイム・ポイント2,3はどちらも360時間後に対応しており、同時刻であるが、タイム・ポイント

3はディーゼル発電機1の試験を開始した後の状態に対応し、タイム・ポイント2は、その直前の状態に対応する。その他の同一時刻に2つのタイム・ポイントが定義されている場合も同様のことをあらわす。

信号#16の強度は直前のタイム・ポイントからの時間経過量をあらわし、単位は「時間」である。信号#17~#20により修理完了をモデル化している。これらの信号は、故障発生をあらわすタイプ37のオペレータの副入力信号となっている。この信号線で今までの時間経過量をキャンセルする負の強度を入力することにより、故障の進展を初期状態へ戻している。すなわち、この方法により、修理完了をモデル化している。この信号強度の与え方から、本解析では、修理期

表5-26 オペレータに与えるデータ (PWR 補助給水系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~30)	DG1 起動可能状態
2	25	1.0(1~30)	DG2 起動可能状態
3	25	1.0(1~30)	ポンプ, バルブ系使用可能状態
4	37	$\lambda = 4.2 \times 10^{-5} / h$	DG1 故障, 修理
5	39	$P_o = 1.0, P_c = 0.1$	DG1 試験
6	37	$\lambda = 4.2 \times 10^{-5} / h$	DG2 故障, 修理
7	39	$P_o = 1.0, P_c = 0.1$	DG2 試験
8	22		OR ゲート
9	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-7} / h$	バルブ1 故障, 修理
10	39	$P_o = 1.0, P_c = 1.0$	バルブ1 試験
11	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-6} / h$	ポンプ故障, 修理
12	39	$P_o = 1.0, P_c = 1.0$	ポンプ, 試験
13	37	$\lambda = 3.0 \times 10^{-7} / h$	バルブ2 故障, 修理
14	39	$P_o = 1.0, P_c = 1.0$	バルブ2 試験
15	22		OR ゲート

表5-27 タイム・ポイントの定義 (PWR 補助給水系)

Time Points	Real Time (h)	Test and Repair	Intensity of Signal						
			16	17	18	19	20		
1	0.0								
2	360.0	Diesel generator 1 under test	360.0						
3									
4			1.5						
5	361.5	Diesel generator 1 under repair							
6			21.0						
7						-361.5			
8	720.0	Pump, valves under test	337.5						
9									
10			1.5						
11	721.5	Valves under repair							
12			7.0						
13					-721.5				
14	740.5	Pump under repair	12.0						
15									
16						-721.5			
17	1080.0	Diesel generator 2 under test	339.5						
18									
19			1.5						
20	1081.5	Diesel generator 2 under repair							
21			21.0						
22								-1081.5	
23	1440.0	Pump, valves under test	337.5						
24									
25			1.5						
26	1441.5	Valves under repair							
27			7.0						
28									
29	1448.5	Pump under repair							
30									
31	1460.5		12.0						
32									
33									
34	1800.0								
35									
36			339.5						

間でも新たな故障が発生し、それは検出不可能と考え、試験が終了した時点までの故障が修理完了時に直されるとしていることがわかる。

(3) 解析結果

解析の手順及び結果を表5-28に示す。表記方法は他の場合と異なり、タイム・ポイントを左端、縦に並べ、オペレータの表記を上端、横とした。

各タイム・ポイントにおける強度は、必要に応じて、有効数字8桁まで示した。強度の値の中で下線を付けたものは、この位置において、試験が修理を実施していることを意味している。

最終結果は信号#15の強度であり、系が動作可能である確率を意味している。

図5-33に系の動作不可能確率（アンアベイラビリティ）の時間経過による推移を示す。各タイム・ポイント間の実際の時間間隔は均一でないことに注意する必要がある。

なお、本節では示さなかったが、試験実施に伴い、一定確率で故障が発生する場合、及び故障検出率が100%より低い場合も既存のオペレータのみで取扱い

が可能であった。

本解析例で示したように、GO-FLOW手法により、Time Dependent Unavailabilityの解析が一度の計算で実施できることがわかり、GO-FLOW手法がこの種の解析においても有用な手段であることが確認された。

5.8 GO-FLOW手法まとめ

この節では、以上説明してきた、GO-FLOW手法について整理し、要点を記述することとする。

GO-FLOW手法とは、系の信頼性解析方法の一手法であり、特に配管系の解析に適した解析方法と言える。

GO-FLOW手法により、複数の時刻、状態における系の動作成功/失敗の確率値を一つのモデル（GO-FLOWチャート）により、一度の計算で求めることができる。

系を構成する機器は、GO-FLOW手法において定義されている標準オペレータにより表現する。冷却水の流れ、信号、情報の流れ等は信号線を伝わる信号により表現する。オペレータ及びそれらを結ぶ信号線からできていくGO-FLOWチャートにより、系の構成・機能をモデル化して表現する。

標準オペレータとしては、論理機能をあらわす種類〔タイプ22 (ORゲート), タイプ30 (ANDゲート)〕, 信号を発生する種類〔タイプ25〕, 機器の動作状態をあらわす種類〔タイプ21, 26, 27, 29〕, 時間経過に伴う故障をあらわす種類〔タイプ35, 37, 38〕, 信号処理を行う種類〔タイプ23, 24〕の合計12種類のタイプが定義されている。

オペレータには通常、入力信号と出力信号が接続しており、オペレータの機能に従い、入力信号を処理し、出力信号を発生する。

入力信号には、主入力信号と副入力信号の二種類がある。主入力信号は主として実在の流体の流れ（冷却水、電流、等）の存在を表わしている。副入力信号は機器の動作指令の存在、時間経過量等を表わす。

信号に付随して“強度”という量が存在する。主入力信号の場合は、強度は流体等の存在確率をあらわす。それ故、主入力信号の強度は必ず1.0以下の値である。副入力信号の強度は、指令が与えられる確率、時間経過量等をあらわすため、必ずしも1.0以下の値である必要はなく、時には負の値も取り得る。

異なった信号発生器（タイプ25）から発生した信号は相互に独立な信号として扱う。一つの信号が分岐し

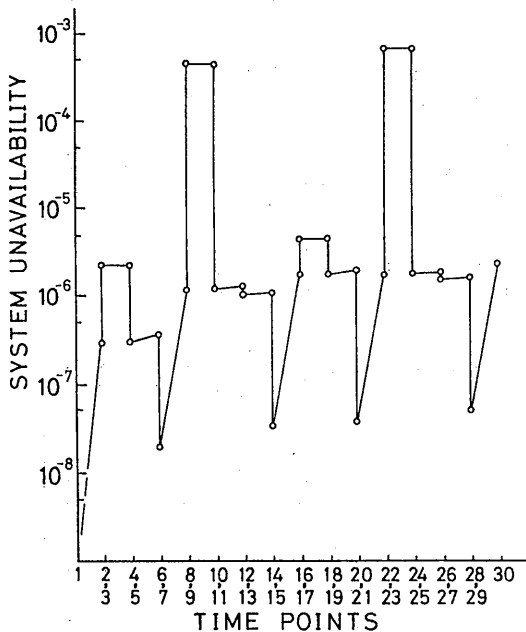


図5-33 解析結果（PWR 補助給水系）

表5-28 GO-DLOW 手法による計算手順 (PWR 補助給水系)

Operator	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Type	25	25	25	37	39	37	39	22	37	39	37	39	37	39	22
Signal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Time Point															
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.98488	.98488	.9997714	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.9999997
3	1.0	1.0	1.0	.98488	<u>.8864</u>	.98488	.98488	.99828	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999777
4	1.0	1.0	1.0	.98482	<u>.8863</u>	.98482	.98482	.998274	.9998915	.9998915	.998807	.998807	.998699	.998699	.99999775
5	1.0	1.0	1.0	.98482	.98482	.98482	.98482	.9997696	.9998915	.9998915	.998807	.998807	.998699	.998699	.9999997
6	1.0	1.0	1.0	.98393	.98393	.98393	.98393	.9997418	.9998852	.9998852	.998738	.998738	.998623	.998623	.9999964
7	1.0	1.0	1.0	<u>.999118</u>	.999118	.98393	.98393	.9999858	.9998852	.9998852	.998738	.998738	.998623	.998623	.99999998
8	1.0	1.0	1.0	.98494	.98494	.96976	.96976	.9995446	.999784	.999784	.997624	.997624	.997408	.997408	.99999882
9	1.0	1.0	1.0	.98494	.98494	.96976	.96976	.9995446	.999784	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999545
10	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.96970	.96970	.9995419	.9997835	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999542
11	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.96970	.96970	.9995419	.9997835	.9997835	.997619	.997619	.997403	.997403	.99999881
12	1.0	1.0	1.0	.98459	.98459	.96940	.96940	.9995285	.9997814	.9997814	.997596	.997596	.997377	.997377	.99999876
13	1.0	1.0	1.0	.98459	.98459	.96940	.96940	.9995285	<u>.9999979</u>	.9999979	.997812	.997812	<u>.997810</u>	.997810	.99999897
14	1.0	1.0	1.0	.98408	.98408	.96890	.96890	.9995049	.9999943	.9999943	.997777	.997777	.997771	.997771	.99999890
15	1.0	1.0	1.0	.98408	.98408	.996890	.96890	.9995049	.9999943	.9999943	<u>.9999373</u>	.9999373	.9999316	.9999316	.99999997
16	1.0	1.0	1.0	.96982	.96982	.95464	.95464	.998631	.9998924	.9998924	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999823
17	1.0	1.0	1.0	.96982	.96982	.95464	<u>.8592</u>	.995751	.9998852	.9998852	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999451
18	1.0	1.0	1.0	.96976	.96976	.95458	<u>.8591</u>	.995739	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999448
19	1.0	1.0	1.0	.96976	.96976	.95458	.95458	.998624	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999822
20	1.0	1.0	1.0	.96888	.96888	.95369	.95369	.998559	.9998857	.9998857	.998743	.998743	.998629	.998629	.99999802
21	1.0	1.0	1.0	.96888	.96888	<u>.999118</u>	.999118	.9999726	.9998857	.9998857	.998743	.998743	.998629	.998629	.99999996
22	1.0	1.0	1.0	.95470	.95470	.98494	.98494	.9993178	.9997844	.9997844	.997629	.997629	.997413	.997413	.99999824
23	1.0	1.0	1.0	.95470	.95470	.98494	.98494	.9993178	.9997844	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999318
24	1.0	1.0	1.0	.95464	.95464	.98488	.98488	.9993142	.9997840	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999314
25	1.0	1.0	1.0	.95464	.95464	.98488	.98488	.9993142	.9997840	.9997840	.997624	.997624	.997408	.997408	.99999822
26	1.0	1.0	1.0	.95435	.95435	.98459	.98459	.9992965	.9997819	.9997819	.997601	.997601	.997383	.997383	.99999816
27	1.0	1.0	1.0	.95435	.95435	.98459	.98459	.9992965	<u>.9999979</u>	.9999979	.997817	.997817	<u>.997815</u>	.997815	.99999846
28	1.0	1.0	1.0	.95384	.95384	.98408	.98408	.9992651	.9999943	.9999943	.997777	.997777	.997771	.997771	.99999836
29	1.0	1.0	1.0	.95384	.95384	.98408	.98408	.9992651	.9999943	.9999943	<u>.9999373</u>	.9999373	.9999316	.9999316	.99999995
30	1.0	1.0	1.0	.93958	.93958	.96982	.96982	.998177	.9998924	.9998924	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999765

て、別々のオペレータの入力信号となる場合は、それぞれのオペレータの出力信号の間には従属性がある。ただし、タイプ35, 37, 38の副入力信号は時間経過量を表現しているため、上記規則にもかかわらず、相互に独立な信号として扱うこととする。

GO-FLOW チャートを用いて、系の解析を実施するためには、まず機器の故障率データを基に個々のオペレータの動作モードに対して各々の発生率を与える。これは、フォールト・ツリー解析における基本事象の発生確率に対応している。

更に、系の動作モードに対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントを定義する。このタイム・ポイントは、1, 2, 3, …と番号づけられており、解析対象の動作モードをあらわすために必要な時間区切り数により、その総数は定まる。タイム・ポイントは単に時間の区切りをあらわすだけであるため、順序は実際の時刻順であるが、タイム・ポイント間の間隔は実時間において均一である必要はない。

計算は、信号発生オペレータ（タイプ25）から出発し、順次、入力信号の強度がすべて求められているオペレータについて、その出力信号の強度を求める。この手順を繰り返すことにより、すべての信号の強度がすべてのタイム・ポイントにおいて求まる。

最後に、系の解析の目的となる信号線の強度から、系の動作の成功/失敗確率が、各々の時刻、状態において求まる。

5.9 考 察

GO-FLOW 手法は、GO 手法を基本とし、その特長を生かしたまま、GO 手法解析における限界を克服するために開発した信頼性解析手法である。それ故、第7章の解析実施例からもわかるように、GO 手法あるいはフォールト・ツリー解析、等、従来の解析方法では実施が困難であった種類の解析も可能となり、信頼性解析の実際の系への適用における、有用な解析手法と言える。

GO 手法と同様に、解析対象の系をモデル化して表現する GO-FLOW チャートはシステムの P&I ダイアグラム、シーケンス・ダイアグラム等と視覚的に対応している。それ故、

- (1) GO-FLOW チャート作成が機械的に実行できる。
- (2) GO-FLOW チャート作成の際解析者の恣意が入りにくい。

(3) GO-FLOW チャート作成に要する時間が短い。

(4) GO-FLOW チャートの理解、再検討が容易で、チャートの正当性を確認しやすい。

(5) 解析対象の系の構造が変更になった場合容易に対応できる。
等の長所を保持している。

GO 手法解析の限界を克服した本解析方法の最大の特徴は、信号の意味を GO 手法とは異なったものに取り、それを基本的な出発点として解析手法の体系を組み立てた点にある。GO 手法においては、信号は、“On-to-Off” か “Off-to-On” の信号であり、状態の変化の発生をあらわしている。信号が存在することは、状態が変化することを意味し、信号が存在しないことは、一定の状態を継続することを意味する。これに対して、GO-FLOW 手法では、“信号の存在”とは実際の流体、情報の流れの存在あるいは存在する可能性を意味している。

信号の意味する所が GO 手法とは異なっているため GO 手法におけるオペレータの定義式は、タイプ5の信号発生器の様な一部オペレータを除いて、GO-FLOW 手法においては使用できない。それ故、新たに、GO-FLOW 手法におけるオペレータ群を定義した。これらの中には、タイプ23, 24, 35, 39等、GO-FLOW 手法特有なオペレータが存在する。

この新たな信号の意味、オペレータ群の定義から、更に信号の“強度”を定義し、タイム・ポイントの取り方を定めて作成したのが GO-FLOW 手法と言える。

GO-FLOW 手法の新たな信号を用いることにより、状態が Off→On→Off のような任意の変化をする系を取り扱うことが可能となった。GO 手法においては、信号は “On→to-Off” あるいは “Off-to-On” であったため、系の状態の変化としては Off→On あるいは On→Off の変化のような一方向の変化しか取り扱えなかった。この点が、GO 手法による解析の大きな制約となっていたわけである。

Off→On→Off の状態変化をする系としては、5.7、解析例(1)で示した原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系がある。この系は最初待機状態 (Off) に置かれ、起動指令により動作を開始する (On)。系の運転継続中に故障発生により機能停止 (Off) に致する。この解析例(1)では、各時刻における系の動作成功/失敗確率が一つの GO-FLOW チャートにより、一度の計算で得られることが示されている。

解析例(2)は沸騰水型原子炉非常用炉心冷却系で、解

析例(1)より更に複雑な動作が要求されている例である。これは、Phased Mission問題の例であり、時間経過に伴い要求される系の動作モードが順次変化していく。系は複数のサブ・システムより構成されており、各フェーズにおける動作モードでは、個々のサブ・システムあるいはそれらを組み合わせた動作が要求される。この解析例(2)により、このような複雑な動作をする系も容易に解析できることが示されている。

この解析例(2)では、各サブ・システムは一体化して取り扱っているため、対象とする系が比較的大きい割には少ないデータで解析が済んでいる。より実際の系に忠実にモデル化するためには、各サブ・システムを基本的構成機器に分解して取り扱えばよい。その場合は、GO-FLOWチャートを、各機器に対応したオペレータを用いて書きあらわせば良く、オペレータ数は増加するが、解析方法は基本的には変化しない。

解析例(3)は、船用炉非常炉心注入系の非常用電源系で、これは待機冗長系の例である。

この解析例では、バック・アップする機器が待機状態に置かれ、起動要求があった時点で動作を開始し、故障した機器の代りを務める。

バック・アップする機器の作動は、主機器の故障時であるため、時間経過と共に確率的に増大していく。このような作動中の故障発生をモデル化するために、タイプ35のオペレータの特徴が最大限生かされている。タイプ35オペレータは、機器が動作中の場合にのみ故障発生を計算し、一本の主入力線で、動作中の場合と非動作中の場合両方をまとめて処理することができる。このGO-FLOW手法特有のオペレータを用いることにより、待機冗長系の解析が容易に実施できることとなった。

解析例(4)は、加圧水型原子炉補助給水系を対象としており、定期試験、修理を考慮に入れた系のアン・アベイラビリティの求め方を示している。定期試験はタイプ39のオペレータによりモデル化しており、On状態、Off状態間を任意に遷移できるというGO-FLOW手法の特徴を用いている。修理はタイプ37の故障発生オペレータに複数の副入力信号を入力し、その中の一本の副入力信号で、時間経過量を打ち消す負の信号強度を与える。これにより、機器の故障状態を初期状態へ戻し、修理実施をモデル化している。

この解析例にみられるように、タイム・ポイントの取り方、信号線の工夫により、時間経過に伴う系のアン・アベイラビリティが一度の計算で得られることが

わかった。

以上の解析例より、まず、GO-FLOW手法は幅広い適用範囲を持っていることがわかる。更に、GO-FLOWチャートに表現できる系であれば原理的には解析可能であり、それにより大規模な系が複雑な動作モードを持つ場合も、個々のサブシステムに分割して解析するのではなく、一体として解析することが可能である。このことより、GO-FLOW手法は、特に実際の系を対象とした解析において威力を発揮すると言える。また一体として解析できるため、各サブシステム間の相互関連が系の機能に及ぼす影響も見落すことなく解析することが可能となる。

解析例に示したような幅広い解析を可能としたのは、信号の意味するところの変更だけではなく、機器が時間経過に伴い故障する現象をモデル化したオペレータ(タイプ35, 37, 38)を導入した点もある。

GO手法においては、故障の発生確率をデータとしてオペレータに与える。そのため、待機中や運転中の故障発生の取り扱いには、待機時間や運転時間を事前に定め、故障率との積から故障確率を求め、その値をオペレータのデータとして与える。その結果、GO手法の解析により得られるのは、事前に与えられた待機時間/運転時間が経過した時点の特定の時刻における系の動作成功/失敗確率となる。GO手法におけるタイム・ポイントは、それ故、実際の時間推移を表わすために用いることはできない。

これに対し、GO-FLOW手法では、故障率のデータをオペレータに与えておき、時間経過量は副入力信号の強度で与えるようになっている。そのことにより、GO-FLOW手法におけるタイム・ポイントは、実際の時間経過と共に系のアン・アベイラビリティ、等も一度の計算で解析できるようになった。

GO-FLOW手法において今後更に開発を要する項目として以下のことが考えられる。

まず、人間の動作をも含んだ、マン・マシン系も解析可能とする必要があるであろう。人間の動作をGO-FLOW手法に導入する場合は、人間の動作遅れを表現する遅延オペレータを導入する必要がある。本論文で示した解析例では遅延オペレータの必要がなかったため、特に遅延オペレータの定義は与えていない。遅延オペレータの導入の際に注意を要することは、一定の遅延時間の後に出てきた信号と、遅延がない他の信号との間の従属性、独立性を正しく扱う必要があることである。

また、現在の所、GO-FLOW手法では、フォールト・ツリー解析における点推定値に相当する値を得るだけであるが、これに不確実さ解析を加える必要がある。このための一方法としては、モンテ・カルロ法を用い直接的に多数回の解析を実施する方法が考えられる。他の方法としては、GO手法で実施しているように、特定の事象(特定の信号線出力)を構成するオペレータの状態を見出すプログラムを作成する方法がある。GO手法においては、Fault Set Finderとして与えられている。これにより、フォールト・ツリー解析におけるミニマル・カット・セットに相当するものが得られる。このフォールト・セットを用い、同じくモンテ・カルロ法により多数回の計算を繰り返し、不確実さ解析が実施できる。

更に、共通原因故障、外部事象誘起の故障、系内の機器間の故障の従属性、等の取り扱いを、GO-FLOW手法において実施する方法を開発することも、GO-FLOW手法の応用にとり重要と考えられる。

以上、これらの機能をGO-FLOW手法に付け加えることにより、GO-FLOW手法は更に適用範囲の広い、有用な信頼性解析手法となることが期待される。

5.10 結 論

本章において、GO手法を基本とし、その特徴を生かしたままGO手法における限界を克服するための新しい信頼性解析法GO-FLOW手法を提案し、その解析法の体系についての説明及び解析例を示した。

GO-FLOW手法は、GO手法と同様、チャートにより解析対象をモデル化し、信号の流れを追う解析方法であるが、信号の意味、タイム・ポイントの取り方、オペレータの機能はGO手法と本質的に異なっている。

GO-FLOW手法における信号は実際の流体、情報、指令等を意味している。「信号の存在」は実際に流体が流れている場合に加えて、流れる可能性を持っていることも意味すると定義した。信号には強度という量が伴っており、この強度により信号の存在確率あるいは、時間経過量が表せられる。

タイム・ポイントは、実際の時間順序に対応して、1から始まる離散的な値を解析者が定義して用いる。

オペレータにより、システム中の機器の機能・故障等がモデル化される。信号の意味、タイム・ポイントの取り方に基いて、GO-FLOW手法特有の機能を持ったオペレータを含む12種のオペレータを定義した。オ

ペレータに与えるデータはGO手法とは異なり故障率で与えるようになっている。

更に、信号の意味、オペレータの機能等を基として、解析手順、計算の細則を定義し、GO-FLOW手法の体系を完成させた。

このGO-FLOW手法の特徴としては以下の項目が挙げられる。

(1) 解析対象はGO-FLOWチャートと呼ばれるチャートにモデル化して表現される。

(2) GO-FLOWチャート中のオペレータが系の構成機器の機能を表現し、信号が冷却材の流れ、情報等を表現する。

(3) 一つのGO-FLOWチャートにより、一度の計算で系の動作成功/失敗の確率を複数の時刻において求めることができる。

(4) GO-FLOWチャートは系との対応が付け易く、チャートの作成、正当性の検証は容易である。

GO-FLOW手法の適用可能性を明らかにするため、本章で示した四例の解析を実施した結果、GO-FLOW手法により、待機安全防護系、Phased Mission Problem、待機冗長系、Time Dependent Unavailabilityの解析が容易に実施できることが示された。

以上の特徴を持つGO-FLOW手法により、従来のフォールト・ツリー、GO手法等では実施が困難な種類の解析も実施できることが示され、その有効性が確認された。

今後、このGO-FLOW手法は、原子力プラント等の現実に稼働している大規模工業プラントの信頼性解析において広く利用されることが期待される。

6. 結 論

6.1 総括的結論

本研究は確率論理的な安全評価の主要な部分を占める、システム信頼性解析法についての研究である。

RSSにおいては、システム信頼性解析として主としてイベント・ツリー、フォールト・ツリー解析が用いられた。RSS以降、システム信頼性解析についての研究が盛んとなり、現在、システムの信頼性を構成機器の故障率に基いて評価する手法は一応確立されたと言える。

しかしながら、システム信頼性解析法は十分に完成された技術とは言えず、なお一層の機能向上、簡便化、体系化が要求されている。本研究はこの方向に

沿ってのシステム信頼性解析法の改良，開発を目的としている。

第二章においては，船用炉非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を実施した。

この系は原子力船の安全防護系であることから，系の動作が要求される場合は何らかの意味で船体事故が発生していると考えられる。それ故，安全防護系の有効性の評価のためには通常運転条件下だけでなく，各種事故条件下における信頼性解析が重要となってくる。RSSに代表される従来の信頼性解析においては，事故条件，厳しい環境条件の影響は露には取り扱われていなかった。

この章において，異なった構成，類似の機能を持つ，原子力船むつの非常用崩壊熱除去系と原子力船サバナナの非常用海水冷却系を取り上げ，種々の厳しい環境条件下における信頼性解析を実施した。

環境条件としては10種の船体事故を選び出し，事故時同一室内に設置された機器は同一の環境条件に曝され，また，異なった区画への事故の伝播はないと仮定し，解析を実施した。解析の基本はフォールト・ツリー解析で，モンテ・カルロ法を用いたSAMPLEプログラムにより頂上事象発生確率分布を求めた。

基本事象発生確率の値はRSSのデータを用い，各種事故状態における基本事象発生確率のデータは現在の所整備されたものが存在しないため，各種文献を参考に工学的判断により推定した。

両システムについての解析を実施し，結果を比較，検討した結果以下の結論が得られた。

通常運転条件下においては両システムはほぼ同様の信頼性を示し，系の信頼度は故障確率の大きな機器により主として支配されている。

系の信頼度は，系の構成，系の置かれた環境条件にも依存しており，原子力船の安全防護系の有効性の評価には，この章で実施した，各種事故条件下における信頼性解析が必要となる。

第3章においては，故障原因，時間依存を考慮した機器故障モデルを提唱し，その故障モデルに基づく信頼性解析プログラムの開発及びその解析実施例を示した。

従来から集められている故障率データは通常の運転条件下における値であり，しかも故障率の値は一定値と考え，故障原因は露には考慮されていなかった。この章においては，機器の故障は，何らかの意味で原因により引き起されるとする考えを基本とし，機器の故

障確率が原因の種類，原因の程度，原因が作用する時間/回数，及び，故障モードの関数となっている故障モデルを提唱した。

機器に故障をもたらす原因としては，基本的な性質に着目し20種類の基本的原因を選定した。これらの原因を，作用の仕方により，連続的に作用する原因と，衝撃的に作用する原因とに分類して取り扱った。機器の故障モードに対しては待機中，運転中，起動時の故障に分類し，故障原因との6通りの組み合わせに対してそれぞれ故障確率を与える式を求めた。また連続的に作用する故障原因について時間依存性が t^α の場合の故障確率を与える式も求めた。既存の故障データとの比較より， α の値としては0～8の比較的広い範囲の値が得られた。

この故障モデルを応用した信頼性解析プログラムを開発した。このプログラムの基本はフォールト・ツリー解析で，対象とする系は安全防護系である。このプログラムは次の三つの機能を備えている。

- (1) 各種の事故状態下におけるフォールト・ツリー頂上事象発生確率の値が，事故条件を入力するだけでほぼ自動的に得られる。
- (2) 系を構成する機器の故障が他の機器の故障を誘発する事による2次的効果を定量的に算定する。
- (3) 頂上事象発生確率に重大な影響を及ぼす環境条件の探索を実行する。

本プログラムを原子力船むつの非常用崩壊熱除去系に対して適用し，解析を実施した結果，特に，環境条件の探索においては第二章で取り上げた船体事故条件が上位にリスト・アップされると共に，過電流，過電圧による制御系の故障も重要要因であることが示された。

第三章における研究の結果，提唱した故障モデルにより，機器の故障確率を与える式が比較的整理された形で得られ，これにより，各種環境条件下における故障確率に整合性のある値を与えることが可能となった。また，この故障モデルを用いた解析プログラムの開発により，事故条件下の頂上事象確率，二次的効果の算定，故障原因の探索が実行できるようになり，信頼性解析における新しい機能が得られた。

第四章においては高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発を実施した。

フォールト・ツリー解析はシステム信頼性解析において主要な位置を占めており，解析プログラムも多数開発され利用されている。しかし，必ずしも使い易い

ものが整備されているとは言えず、特に第三章の信頼性解析プログラムの開発のために、高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発が必要となった。

本プログラムの解析方法は Bottom-Up の方法で、フォールト・ツリーの末端から始めて順次可能な限り数値計算を実施し、頂上へと至る方法である。

フォールト・ツリー構造の表記方法としては、一次事象、ゲートを番号であらわし、解析プログラムの処理方法に適合するように工夫した。各ゲートにおいては、ブール代数に従い、和、積の演算を実施すると共に、一次事象の積の次数が指定次数より大きいもの、発生確率が指定値より小であるものを除去し、できるだけ早い時点で不要な情報を除くようになっている。

また、同一の一次事象がフォールト・ツリー中に複数存在する場合は、その一次事象（反復事象）を含んだカット・セット間の和は各ゲートでは実施せず、頂上事象発生確率を計算する最終段階で実行する。

頂上事象発生確率の計算方法として、計算プログラム内部のデータ授受に対応した近似方法を与えた。

本プログラムでは最小カット・セットを求める事も可能で、その場合は、各一次事象を反復事象と同様に取り扱って計算を進める。

本解析プログラムの解析実施例として6種のフォールト・ツリーを選び解析を行った。それと同時に、WAM-BAN, WAM-CUT コードによる解析も実施し、比較を行った。また、頂上事象計算のための近似方法の精度についても検討を行った。

以上、高速フォールト・ツリー解析プログラム開発に関する研究の結果、開発したプログラムは、BAM, CUT コードと比較し、1000~10倍の高速で、頂上事象発生確率、最小カット・セットが得られ、頂上事象の値も実用上十分な精度で得られることが示された。

本プログラムの開発により、フォールト・ツリー解析が高速・大型計算機システムを用いずとも手軽に実施できるようになり、第3章で示した信頼性解析も実現可能となった。

第5章においては、GO-FLOW 手法の開発を実施した。

システム信頼性解析の中心を占めるものは、フォールト・ツリー解析であると言える。しかし、フォールト・ツリー解析には限界点もあり必ずしも使い易いとは言えない。この点を補う方法として GO 手法があり、近年、原子力の分野においても使用される様になってきた。この GO 手法は種々の利点にもかかわら

ず、なお不十分な点があることが判明した。

そこで、GO 手法を基本とし、その特徴を生かしたまま GO 手法における限界を克服する目的で、GO-FLOW 手法を開発した。

GO-FLOW 手法は、チャートによる解析対象のモデル化、信号の流れを追う解析方法という点で GO 手法と類似してしているが、信号の意味、タイム・ポイントの取り方、オペレータの機能は GO 手法とは本質的に異なっている。

GO-FLOW 手法における信号は、実際の流体の流れ、電流、情報、指令等を意味している。「信号の存在」は、実際に流体が流れている場合に加えて、流れる可能性を持っていることも意味すると定義されている。また、信号の強度により、信号の存在確率あるいは時間経過量をあらわしている。実際の時間経過の順序に対応して離散的なタイム・ポイントが定義される。

GO-FLOW 手法においては、12種のオペレータが定義されており、それぞれ機器の動作・故障等をモデル化している。その中には、弁の開閉動作をモデル化したような、GO-FLOW 手法特有のオペレータもいくつか含まれている。

この GO-FLOW 手法の特徴としては以下の項目が挙げられる。

- (1) 解析対象は GO-FLOW チャートと呼ばれるチャートにモデル化して表現される。
- (2) GO-FLOW チャート中のオペレータが系の構成機器の機能を表現し、信号が冷却材の流れ、情報等を表現する。
- (3) 一つの GO-FLOW チャートにより、一度の計算で系の動作成功/失敗の確率を複数の時刻において求めることができる。
- (4) GO-FLOW チャートは系との対応が付け易く、チャートの作成、正当性の検証は容易である。

GO-FLOW 手法の適用可能性を明らかにするために四種の系についての解析を実施した。その結果、GO-FLOW 手法により、待機安全防護系、Phased Mission Problem, 待機冗長系、Time Dependent Unavailability の解析が容易に実施できることが示された。

本研究において提唱した GO-FLOW 手法は、従来のフォールト・ツリー、GO 手法等では実施が困難な種類の解析も実施できることが示され、その有効性が確認された。今後この GO-FLOW 手法が実プラントの信頼性解析において広く利用されることが期待され

る。

本研究で示した、各種事故条件下の信頼性解析、故障モデル、信頼性解析プログラム、フォールト・ツリー解析プログラム、GO-FLOW手法は相互に深く関連を持ち、全体として、確率論的安全評価におけるシステム信頼性解析の分野において重要な役割を担うものと言える。

6.2 今後の課題

本研究の成果を第一章第二節で述べたシステム信頼性解析の問題点の観点から見なおし、今後の課題について議論を進め、将来の研究の展望について考察する。

本研究により、種々の問題点の中のある種の問題点に対しては、しかるべき解答が与えられたと考えられるが、なお多くの問題点に対しては十分な解答が得られていないばかりか、まったく手が付けられなかった問題点もある、本研究を更に発展させることによるこれら問題点の解決の可能性を中心に検討して行くこととする。

第二章では、各種事故状態あるいは環境条件下における信頼性解析が安全防護系の有効性の評価にとり重要であることを示し、その解析手順を示した。本研究で示した解析は、この種の解析の最初の試みと言えるため、事故状態等のモデル化においては各種の仮定を置き単純化している。今後、より現実に近い条件を考慮した解析を実施するために、各種モデルの改善、現実化が必要となってくる。また、この種の解析が容易に実施できるためには、解析手順をより整備された形にまとめ、標準マニュアル化することが望ましい。故障率データは本解析の最も重要な課題であり、データの蓄積が望まれるが、第三章の故障確率モデルを援用した工学的判断も有効な方法と考えられる。

第三章故障モデルでは、故障を引き起す原因を考え、従来からの故障率一定の考えを見直した点に特徴がある。この故障モデル自体には整合性があり、第二章で示した工学的判断による故障率の値の推定に有用である。この故障モデルの真の意味での実証のためには現実のデータとの比較が必要となるが、既存のデータには十分なものは存在しない。それ故、逆に、この故障モデルの考えに基づいた故障データの収集を積極的に実施し、まず、二、三の故障モードについて、この故障モデルの検討、改良を行い、より現実に即したモデルとする必要がある。

また、この故障モデルは原因を明確に考慮しているため、共通原因故障の取り扱いが直接的な形で実施できる可能性を持っている。信頼性解析プログラムでは、故障原因探索の機能が実現されているが、この機能を発展させることにより、共通原因故障の探索及び定量的評価が実現できると考えられる。

第四章の高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発は、従来大型計算機に頼り、解析プログラムの高速化にはあまり目の向いていなかった傾向に対する異なったアプローチと言える。フォールト・ツリー解析は信頼性解析において重要な位置を占めており、系のモデル化という意味から考えると単なる道具以上のものである。このフォールト・ツリー解析が高速で実施できることにより、第三章信頼性解析プログラムで示した新たな三種類の機能が実現できた。

この高速解析プログラムの応用により、(信頼性解析の分野における)更に異なった機能の実現が可能と考えられ、この方向での研究が重要となる。なお、本論文で示した解析プログラムは更に機能を向上させる余地が残されているため、その面の研究の実施も合わせて必要である。

第五章 GO-FLOW手法では、主として、GO-FLOW手法の体系の説明とその適用可能性を示した。今後より多様な対象について解析を実施することにより、GO-FLOW手法をより洗練された手法とし、その適用範囲を拡大することが可能と考えられる。

Phased Mission Problemの取り扱いでは、従来の解析と同様、各フェーズの持続時間は決定論的に定まっているとして解析した。しかし、各フェーズの遷移に確率的要素を加えた解析を、GO-FLOW手法により実施することが考えられる。

保守・点検の解析においても、スケジュールは決定論的に定まっている例を解析した。この場合も、保守に要する時間長さを確率的に与えることは、GO-FLOW手法においては容易と考えられ、この機能がGO-FLOW手法に加わえられれば、定期点検スケジュールの評価が実施できる。つまり、一定の定期点検の条件下において、GO-FLOW手法による解析を多数回繰り返す(モンテ・カルロ法により保守時間の長さをランダムに与える。)、アンアベイラビリティの確率分布を求め、それにより点検計画を評価する。

人的要因は、本論文では扱われなかったが、新たな種類のオペレータの付加により、人的要因の取り扱いを可能とし、GO-FLOW手法をより現実に即した解析

手法にすることができる。

共通原因故障の GO-FLOW 手法への組み込みは比較的容易と考える。現に EPRI では GO 手法により共通原因故障を取り扱う方法を開発したと伝えられる。共通原因故障はその探索、評価がより重要と考えられ、第三章の信頼性解析プログラムの機能を向上させ、GO-FLOW 手法と組み合わせて用いる方向が有望である。

以上、これらの今後の課題に沿った研究を進めることにより、本研究で示したシステム信頼性解析方法をより充実・発展させ、実用的な手法とし、確率論的安全評価の普及において積極的に活用していきたいと考えている。

7. 参考文献

- (1) USAEC Report WASH-740 : Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants (March 1957)
- (2) F.R.Farmer : Reactor Safety and Siting : A Proposed Risk Criterion, Nuclear Safety, Vol.8 pp. 539-548 (1967)
- (3) U.S.Nuclear Regulatory Commission : Reactor Safety Study : An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400 (NUREG-75/014) (1975)
- (4) J.G.Kemeny : Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, Washington, US Government Printing Office, (Oct. 1979)
- (5) M.Rogovin : Three Mile Island, a Report to the Commissioners and to the Public, Washington, Nuclear Regulatory Commission Special Inquiry Group, (Jan. 1980)
- (6) A.Bayer and F.W.Heuser : Basic Aspects and Results of German Risk Study, Nuclear Safety, Vol.22 pp. 695-709 (1981)
- (7) M.Llory, et al. : The program to Study the Reliability of Safety Systems in the Paluel 1300MWe Power Plant : Organization, Methodology, First Conclusions, International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety -Chicago-USA (August 29-September 2, 1982)
- (8) J.B.Fussell : Nuclear Power System Reliability : A Historical Perspective, IEEE Trans. on Reliability Vol.R-33 pp.41-47 (1984)
- (9) NUREG/CR-2815 : Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide, (Jan.1984)
- (10) NUREG/CR-2300, PRA Procedures Guide (1983)
- (11) J.B.Fussell & J.S.Arendt : System Reliability Engineering Methodology : A Discussion of the State of the Art, Nuclear Safety, Vol. 20 pp. 541-550 (1979)
- (12) K.Terpstra : Phased Mission Analysis of Maintained Systems : A Study in Reliability and Risk Analysis, ECN-158 (Sept. 1984)
- (13) T.Matsuoka, An Application of a Reliability Analysis to the Emergency Sea Water Cooling System of the Nuclear Ship Savannah, Pap. Ship Res. Inst. No.67 (May 1982)
- (14) 立川潤次 他 : 船用原子炉系統の信頼性解析, 電力供給系統及び余熱除去系統を例として, 日本原子力学会誌 19巻 pp. 842-852 (1977)
- (15) N.S.Savannah Safety Assessment Vol.1., Engineering and Construction, Babcoch & Wilcox Co., Atomic Energy Div. ; (Aug. 1960)
- (16) N.S.Savannah Safety Assessment, Vol.2., Operations, State Marine Lines. (Aug. 1961)
- (17) 原子力船第一船むつ, 石川島播磨重工技報(1970年8月)
- (18) IEEE Trial-Use Guide : General Principles for Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems, IEEE Std 352-1972 (1972)
- (19) WASH-1400, Appendix II, Fault Tree Methodology, (1975)
- (20) WASH-1400, Appendix III, Failure Data, (1975)
- (21) A.F.Green and A.J.Bourne : Reliability Technology, Wiley-Intersci., New York (1972)
- (22) WASH-1400, Appendix IV, Common Mode Failures : Bounding Techniques and Special Techniques, (1975)
- (23) T.Matsuoka : Reliability Analysis of Emergency Decay Heat Removal System of Nuclear Ship under Various Accident Conditions, Comparison between Nuclear Ship 'Mutsu' and

- Nuclear Ship 'Savannah', Journal of Nuclear Science and Technology Vol.21. pp.266-278 (1984).
- (24) T.Matsuoka : Component Failure Model dependent on Time and Causes, Nuclear Engineering and Design, Vol.75, pp.109-116 (1983)
- (25) K.N.Fleming et al. : AIPA Risk Assessment Methodology, in HTGR Accident Initiation and Progression Analysis Status Report, General Atomics GA-A 13617 (Oct. 1975)
- (26) D.Rasmuson et al. : Common Cause Failure Analysis Techniques : a Review and Comparative Evaluation, Idaho National Engineering Laboratory, TREE-1349 (1979)
- (27) G.T.Edwards and I.A.Watson : A Study of Common-Mode Failures, United Kingdom Atomic Energy Authority, SRD R 146 (July 1979)
- (28) D.Rasmuson et al. : COMCAN II -A -A Computer Program for Automated Common Cause Failure Analysis, Idaho National Engineering Laboratory, TREE-1361 (1979)
- (29) K.Boesebeck and P.Homke : Failure Data Collection and Analysis in the Federal Republic of Germany, in : Failure Date and Failure Analysis in Power and Processing Industries, ed. A.C.Gangadharan and S.J. Brown, Jr. (The American Society of Mechanical Engineering, New York, 1977) pp.7-19
- (30) François F.Behmann : Satellite Travelling Wave Tubes Reliability Controls, 1982 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.193-198 (1982)
- (31) A.Dey Kieron : Statistical Analysis of Noisy and Incomplete Failure Data, 1982 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.246-251 (1982)
- (32) M.Kobayashi : Reliability of Soldered Connections in Single Ended Circuit Components, Welded Research Supplement 363 (Oct. 1975)
- (33) R.G.Lambert : Mechanical Reliability for Low Cycle Fatigue, 1978 Annual Reliability and Maintainability Symposium pp.179-183 (1978)
- (34) T.Matsuoka : A Computer Program for Automated Reliability Analysis under Extreme Environmental Conditions, American Nuclear Society Trans. Vol.44 pp.363-364 (1983)
- (35) T.Matsuoka : FFTA : a Fast Fault Tree Analysis Program, Nuclear Engineering and Design, Vol.91 pp.93-101 (1986)
- (36) 渡辺憲夫 他 : フォールト・ツリー解析における点推定と不確実さ解析 JAERI-M82-215 (1983)
- (37) R.B.Worrell and D.W.Stack : A SETS User's Manual for Fault Tree Analyst, NUREG/CR-0465 SAND 77-2051 (1978)
- (38) 石神努 他 : フォールト・ツリー解析コードシステム : FAT-J 使用手引, JAERI-M83-169 (1983)
- (39) F.L.Levereng and H.R.Kirch : User's Guide for the WAM-BAM Computer Code, EPRI-217-2-5 (1976)
- (40) F.L.Levereng and H.R.Kirch : WAMCUT-A Computer Code for Fault Tree Evaluation, EPRI-NP-803 (1978)
- (41) W.V.Gately and R.L.Williams : GO Methodology Overview, EPRI-NP-765 (1978)
- (42) 松岡猛, 小林道幸 : GO 手法による信頼性解析, 昭和59年日本原子力学会秋の分科会 (1984)
- (43) T.Matsuoka and M.Kobayashi : GO-FLOW : A Reliability Analysis Methodology Applicable to Piping System, International ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Safety Methods and Applications, San Fransisco U.S.A. Paper NO. 175 (February 24-March 1, 1985)
- (44) KAMAN SCIENCES CORPORATION, 1500 Garden of the Gods Road, P.O.Box 7463, Colorado Springs, Colo. 80933, U.S.A.
- (45) J.A.Wenger and R.L.Williams : Sequoyah Residual Heat Removal System Reliability Evaluation, K-81-42U(R), Kaman Sciences Corporation (1981)
- (46) G.R.Burdick et al. : Phased Mission Analysis : A Review of New Developments and An Application, IEEE Transactions on Reliability, Vol.R-26 pp.43-49 (1977)
- (47) W.E.Vesely and F.F.Goldberg : FRANTIC-A Computer Code for Time Dependent Unavailability Analysis, NUREG-0193 (Oct. 1977)

(48) B.Gateley : An Introduction to GO, K-75-94U
(R), Kaman Sciences Corporation (1975)

8. 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、本研究の遂行に際し御指導、御協力を戴いた関係者に感謝の意を表します。

東京大学工学部原子力工学科近藤駿介教授には本研究の遂行に関して終始温い御指導並びに有益なる御助言を賜り深く感謝の意を表わす次第であります。

日本原子力研究所リスク評価解析室飛岡利明室長はじめ研究室の皆様方には、多くの計算プログラムの使用の機会を与えて下さると共に、貴重な助言を数多く賜りましたことに深く感謝の意を表します。

筑波大学構造工学系成合英樹教授には、筆者がこの分野での研究に携る端緒を与えて下さり、今日に至るまで親身に御指導とお励ましを戴きましたことに心からお礼申し上げます。

船舶技術研究所原子力技術部小林道幸室長には、本研究実施の環境を長年にわたり整えて下さると共に、御指導を賜りました事厚く感謝致します。同部稲坂富士夫研究官には、数多くの計算プログラムを実際に動かすに当り助力をいただきました事厚くお礼申し上げます。また、原子力船部前部長中田正也博士及び原子力技術部部長布施卓嘉氏には、本研究遂行にあたり種々御援助戴いたこと御礼申し上げます。

付録1 GO手法における標準オペレータ

GO手法の概略は既に第二章「GO手法の特徴及び限界」において説明されているので、ここでは、GO手法において定義されている標準オペレータについて説明する。標準オペレータは、タイプ1～17の16種類(タイプ4は欠番)が定義されている。

以下一般的説明、オペレータの機能、その他のコメントを与える。GOチャートにおける記号表現はまとめて図付-1に示す。また以下の説明において共通に使用されている記号には次のものがある。

S : 入力信号

R : 出力信号

P_g : 正常動作する確率

P_p : 早まって作動する確率

P_f : 作動失敗する確率

∞ : タイム・ポイント値の最大値

付1.1 オペレータ・タイプ1

このオペレータは、最も一般的なタイプのオペレータで、二つの状態を記述したい時に用いる。即ち、オペレータ自体は信号を発しないが、信号を通すか否かといった機能を持っている。機器の正常/故障状態をモデル化したオペレータである。

表付-1にオペレータの機能を示す。オペレータに与えるデータは、 P_g 、 P_f の値である。

表付-1 タイプ1オペレータ

入力信号 タイム・ポイント	出力信号	
	タイム・ポイント	確率
∞	∞	1.0
$t < \infty$	t	P_g
	∞	P_f

適用コンポーネント例としては、抵抗(正常、断線)、電球(正常、断線)、配管(正常、閉塞)等がある。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ21である。

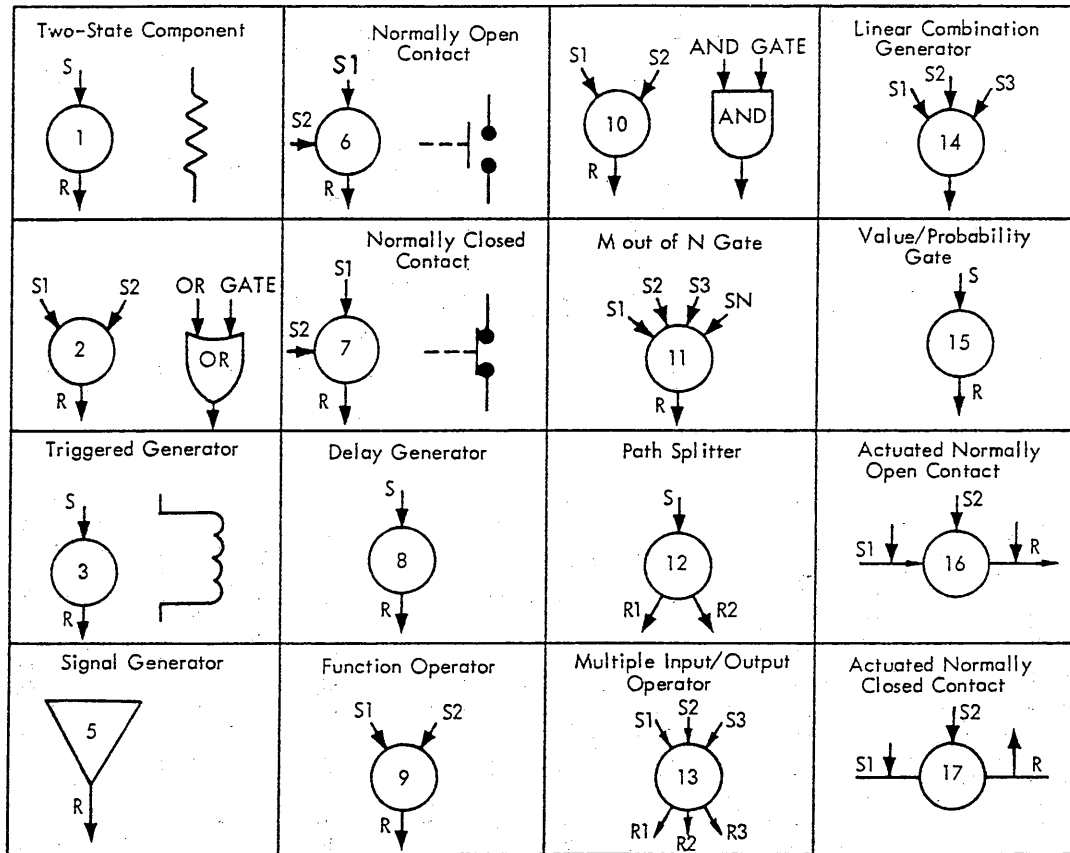
付1.2 オペレータ・タイプ2

このオペレータは複数の入力信号のうちタイム・ポイント値の最小のものを出力信号のタイム・ポイント値として取る。つまり、いくつかの信号のうち最も早く到達した信号により出力が決定される。フォールト・ツリーで用いられるORゲートに相当する。

このオペレータの機能を具体的な例について見てみると次のようになる。入力信号 S_1, S_2 共に“0”, “1”, “2”のタイム・ポイントにおいてそれぞれ、0.25, 0.5, 0.25の確率で信号が来るとする。出力信号Rが各タイム・ポイントにおいて存在する確率は、表付-2の様になる。

表付-2 タイプ2オペレータの機能の数値による説明例

出力信号 タイム・ポイント	確率	計算方法
0	0.4375	$0.25 + 0.25 - 0.25 \times 0.25$
1	0.5000	$1.0 - R(0) - R(2)$
2	0.0625	0.25×0.25



図付-1 GO手法におけるオペレータ

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ22である。

付1.3 オペレータ・タイプ3

このオペレータは、一つの入力信号に対し、出力信号を1つ発する。オペレータの動作モードによっては入力信号がなくとも、出力信号を発することもある。これは熱、衝撃等により、機器が作動してしまうことをモデル化している。

表付-3にオペレータの機能を示す。このオペレータにおいて、 $P_p=0.0$ の場合は、タイプ1のオペレータと同じ機能となる。オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

表付-3 タイプ3オペレータ

入力信号 タイム・ポイント	出力信号	
	タイム・ポイント	確率
∞	0	P_p
	∞	P_g+P_f
0	0	P_g+P_p
	∞	P_f
$0 < t < \infty$	0	P_p
	t	P_g
	∞	P_f

付1.4 オペレータ・タイプ5

このオペレータは、信号発生器をモデル化している。解析対象とするシステムの外部入力信号に用いることが多い。GOチャート中に、二つ以上このオペレータが存在する場合は、各々、独立した信号を出す。

オペレータに与えるデータは、各タイム・ポイントにおける信号発生確率である。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ25である。

付1.5 オペレータ・タイプ6

このオペレータは通常開いているスイッチが入力信号 S_2 が到達した時に閉じ、入力信号 S_1 をRへと伝達する事をモデル化している。

表付-4にオペレータの機能を示す。入力信号 S_1 と S_2 とでは、表付-4よりわかるように役割が異なっている。又、入出力信号としては、Off-to-On信号を考えている。

このオペレータは、通常閉状態のバルブが指令により開かれる場合も表現できる。

オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ26である。

付1.6 オペレータ・タイプ7

このオペレータは、タイプ6の逆で、通常は閉じているスイッチが、入力信号 S_2 が到達した時に開き、 S_1 の通路が不通になるという働きをモデル化している。

表付-5にオペレータの機能を示す。表の機能を理解するためには、信号はOff-to-On信号であり、各タイム・ポイントにおける確率とは、信号がそのタイム・ポイントにおいて到達する確率であることを念頭に置く必要がある。

表付-4 タイプ6オペレータ

入力信号 S_1 タイム・ポイントt	入力信号 S_2 タイム・ポイントt'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
∞	any	∞	1.0
t < ∞	∞	t	P_p
		∞	P_g+P_f
	t' ≤ t	t	P_g+P_p
		∞	P_f
	t < t' < ∞	t	P_p
		t'	P_g
∞		P_f	

表付-5 タイプ7オペレータ

入力信号 S_1 タイム・ポイント t	入力信号 S_2 タイム・ポイント t'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
∞	any	∞	1.0
$t < \infty$	$t' < t$	t	P_f
		∞	$P_g + P_p$
	$t \leq t'$	t	$P_g + P_f$
		∞	P_p

このオペレータは、通常開状態のバルブが指令により閉じる場合も表現できる。

オペレータに与えるデータは、 P_g 、 P_f 、 P_p の値である。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ27である。

付1.7 オペレータ・タイプ8

このオペレータは、通常、機器の応答の遅れをモデル化するのに用いられる。信号がタイム・ポイント T において入力されると、確率 P_i で、“ $T + D_i$ ”のタイム・ポイント（ D_i の遅れ）において出力信号が出る。

遅れ時間 D_i は、システムで定義されたタイム・ポイントの単位で測られたものであり、実際の遅れ時間とは必ずしも対応しない。

このオペレータは、他に人間の反応をモデル化する場合にも使用できる。

オペレータに与えるデータは、遅れ時間 D_i とそれに対応する確率値 P_i の組合せである。

付1.8 オペレータ・タイプ9

このオペレータは複雑なタイミングを取り扱う場合に使用する汎用オペレータである。

このオペレータの働きにより、入力信号 S_1 が、タイム・ポイント T に入力した後、 X_1 だけ遅れて入力信号 S_2 が入力した場合、タイムポイント“ $T + f(X_1)$ ”において、出力信号 R が得られる。

オペレータに与えるデータは、 X_1 の値とそれに対応する $f(X_1)$ の値の組である。

付1.9 オペレータ・タイプ10

このオペレータは入力される信号の中の最大のタイム・ポイントの値において出力信号を出す。フォール

ト・ツリーにおけるANDゲートに相当する。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ30である。

付1.10 オペレータ・タイプ11

このオペレータは、2個以上の入力信号をそのタイム・ポイントの小さい順から数えた場合の m 番目のタイム・ポイント値において、出力信号を出す。これはフォールト・ツリーにおける m out of n Gateに相当する。

$m=1$ の場合はORゲートとなり、タイプ2のオペレータと同じとなる。 $m=n$ の場合はANDゲートとなり、タイプ10のオペレータと同じとなる。

オペレータに与えるデータは、入力信号線の数 n 及び m の値である。

付1.11 オペレータ・タイプ12

このオペレータは一つの入力信号に対して、 m 個の出力信号線を持つ。あるタイム・ポイントにおいて入力した信号は、このオペレータにより、 m 個の出力信号線の中のどれか一つの信号線から確率 P_i で信号が、入力信号と同一のタイム・ポイントにおいて出て行く。ここで P_i は、1.0の確率の入力信号があった場合 i 番目の信号線から信号が出る確率である。

すべての信号線について P_i を加え合わせた結果が1.0以下である場合は、 $1.0 - \sum P_i$ の確率で、オペレータは信号を出力しないことをあらわす。その場合は、すべての信号線が、同時にタイム・ポイント“ ∞ ”において信号を出す確率が $1.0 - \sum P_i$ である。

オペレータに与えるデータは、各信号線が信号を出す確率 P_i の値である。

付1.12 オペレータ・タイプ13

このオペレータは従属事象を表現する場合に用いら

れる。入力信号、出力信号共複数個ある。

オペレータに対するデータとして、事前に、特定の入力信号のタイム・ポイントの組合せに対応して出力信号のタイム・ポイントの組合せ及び確率Pを与えておく。例えば、 $(S_1, S_2, S_3) = (0, 1, 2)$ に対して $(R_1, R_2) = (2, 0)$ 、 $P=0.8$ を与えておくと、入力信号1, 2, 3にそれぞれタイム・ポイント0, 1, 2に信号があった場合、出力信号1, 2にそれぞれタイム・ポイント2, 0で信号が出て行く確率が0.8となる。

もし、入力信号が事前に定義された組合せの中にはない場合は、出力信号はすべて“∞”のタイム・ポイント値において出て行く。

付1.13 オペレータ・タイプ14

このオペレータは複数の入力信号線と、一本の出力信号線を持っている。

入力信号のタイム・ポイント値に対して、線型結合の結果得られる値により、出力信号のタイム・ポイント値が決定される。入力信号のタイム・ポイント値を $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ とすると、

$$A = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times T_i$$

の式により得られる値Aを用いて、出力信号のタイム・ポイント値 T_R は

$$T_R = \max(0, \min(A, \infty))$$

により与えられる。出力信号の確率は、入力信号のタイム・ポイントが、 T_1, T_2, \dots, T_n の値を取る場合の確率に等しい。

オペレータに与えるデータは、 a_0, a_1, a_n の値である。

付1.14 オペレータ・タイプ15

このオペレータは、入力信号に対するゲートの役割を果している。入力信号があるタイム・ポイントの間 ($T_3 \sim T_4$) に到着し、なおかつ、入力信号の確率が $P_1 \sim P_2$ の間の値を取る時、出力信号はタイム・ポイント T_1 において確率 P_s (入力信号の有する確率値) の値を持つ。入力信号が上記条件を満たさない場合は、出力信号はタイム・ポイント T_2 において確率 P_s の値を持つ。

オペレータに与えるデータは、 $T_1, T_2, T_3, T_4, P_1, P_2$ の値である。もし、 T_1 の値として負の値を与えた場合は、出力信号のタイム・ポイント値は入力信号のタイム・ポイント値と同一となる。

付1.15 オペレータ・タイプ16

このオペレータは On-to-Off 信号を扱う系において閉じていたスイッチが開く場合をモデル化したものである。入力信号1は On-to-Off 信号、つまり「信号の停止」を知らせるものでなくてはならない。入力信号2は On-to-Off 信号でも Off-to-On 信号でも良い。出力信号も On-to-Off 信号である。

表付-6にこのオペレータの機能を示す。この表において、 P_g は正常動作する確率、 P_f は作動失敗する確率で、タイム・ポイント0においてスイッチが開いてしまう確率、 P_p は早まって動作する確率で、スイッチが閉じたままである確率をあらわす。

オペレータに与えるデータは P_g, P_f, P_p の値である。

このオペレータにより、開状態のバルブが閉じる場合、作動中のポンプが停止する場合等も表現できる。

表付-6 タイプ16オペレータ

入力信号S ₁ タイム・ポイント t	入力信号S ₂ タイム・ポイント t'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
0	any	0	1.0
t > 0	t' ≤ t	0	P _f
		t	P _p
		t'	P _g
	t' > t	0	P _f
t		P _g +P _p	

付1.16 オペレータ・タイプ17

このオペレータは開いていたスイッチが閉じる場合をモデル化したものである。入力信号1は On-to-Off 信号であり、入力信号2は On-to-Off 信号でも、Off-to-On 信号でも良い。出力信号は Off-to-On 信号である。この点は、タイプ16とは異なり、On-to-Off の入力信号が Off-to-On の出力信号へと変換されている。

表付-7 にこのオペレータの機能を示す。表において、 P_f は作動失敗する確率で、スイッチがタイム・ポイント0から閉じてしまっている確率、 P_p は早まった動作する確率で、スイッチが開いたままである確率をあらわす。

オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

表付-7 タイプ17オペレータ

入力信号S ₁ タイム・ポイントt	入力信号S ₂ タイム・ポイントt'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
0	any	∞	1.0
t > 0	t > t'	0	P_f
		∞	P_p
		t'	P_g
	t ≤ t'	0	P_f
		∞	$P_g + P_p$

付録2 GO手法による解析例

ここではGO手法による具体的な解析例2例を示す。GO-FLOW手法との比較も考慮して、解析対象としては、第六章において使用したサンプル問題(1)及び第七章において解析を実施した原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系を選んだ。

付2.1 サンプル問題

付2.1.1 GOチャートによる表現

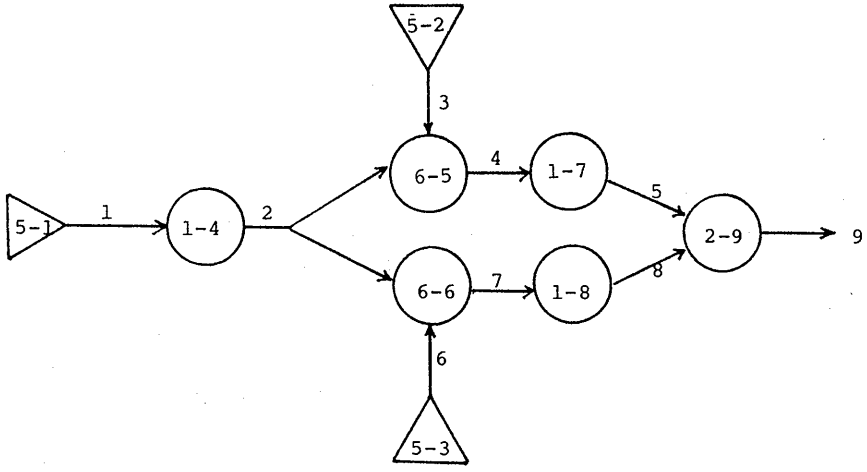
対象とする系は、第五章において使用した電気回路であり、図5-1にその回路図が示されている。

図5-1の回路をGOチャートに表現すると図付-2のようになる。図中、オペレータの円内の最初の数字はオペレータ・タイプを示し、後の数字はオペレータ番号を示す。表付-8に、各オペレータに与えたデータ及び、オペレータの意味、対応機器を示す。

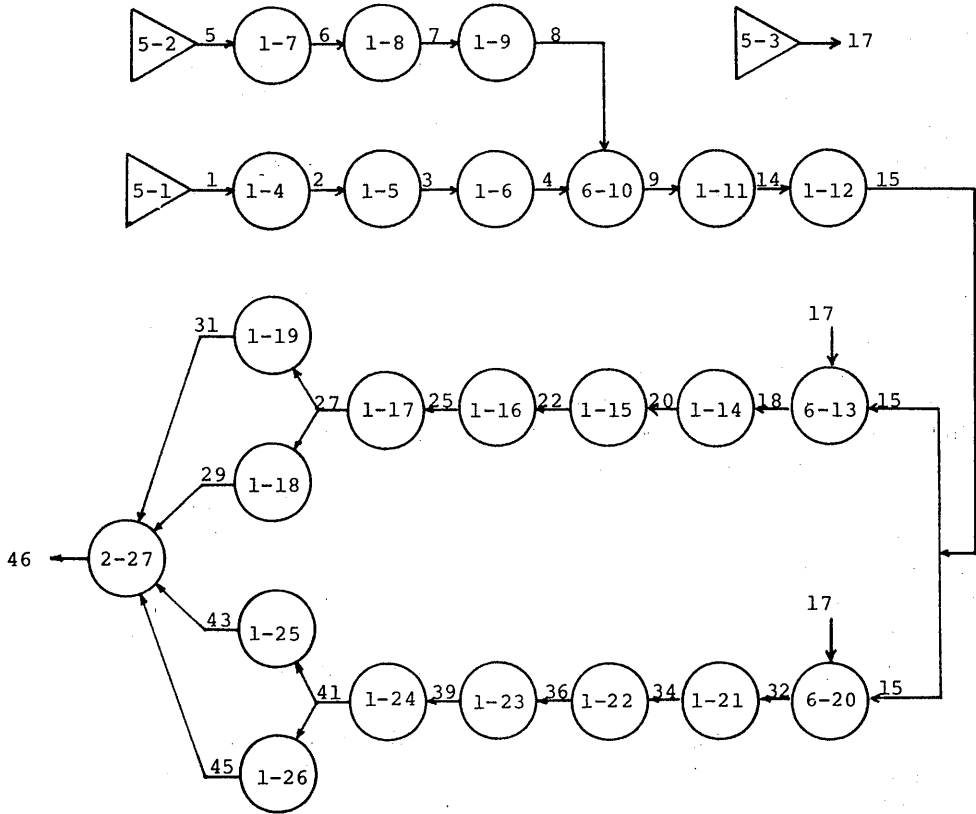
解析実施結果の出力を図付-4~6に示す。

表付-8 オペレータに与えるデータ (サンプル問題1)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	5	R=1.0(1)	電源接続
2	5	R=1.0(2)	スイッチ1閉指令
3	5	R=1.0(3)	スイッチ2閉指令
4	1	$P_g=0.9, P_f=0.1$	電源
5	6	$P_g=0.7, P_f=0.2, P_p=0.1$	スイッチ1
6	6	$P_g=0.7, P_f=0.2, P_p=0.1$	スイッチ2
7	1	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ1
8	1	$P_g=0.8, P_f=0.2$	ランプ2
9	2	-	ORゲート



図付-2 GO チャート (サンプル問題1)



図付-3 GO チャート (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

付2.1.2 GO1 ステップ

図付-4 は GO1 ステップの実施結果で、対象とする系を GO チャートに表現した場合の構造、タイム・ポイントの取り方、が示されている。

第4行目から15行目は、オペレータに関する情報である。第1列はオペレータ番号、第2列はオペレータ・タイプ、第3列はカインド番号である。カインド番号はオペレータにデータを与える時用いる。第4列目以降は入出力信号線の番号である。

例えば、第11行目においては、5番のオペレータは、タイプ6のオペレータであり、カインド番号は5番、入力信号は、2番と3番で、出力信号は4番であることを示している。

第16行目は最終信号線の番号を示す。

第17行目～24行目はタイム・ポイントの定義である。

第25行目～37行目は信号線の連結状態を示している。第1列は信号線番号、第2列は、信号線が出るオペレータの番号、第3,4列は、そのオペレータのタイプ、カインド番号である。第5列以降は信号の到達するオペレータの番号である。

付2.1.3 GO2 ステップ

図付-5 は GO2 ステップの実施結果で、オペレータに与えた、動作確率のデータが示されている。

第1,2行目は GO2 ステップのタイトル、実行実施年月日時刻を示す。第3,4行目は、GO1 ステップの結果を参照することを示す。

第5行目～第16行目にオペレータに与えたデータが示されている。第1列は行番号、第2列はオペレータのカインド番号、第3列はオペレータ・タイプを示す。第4列以降は動作確率の値である。例えば、第7行目タイプ5のオペレータの場合は、信号発生は1つのタイム・ポイントにおいてあり、タイム・ポイント1において、1.0の確率で信号が出ることを意味している。第10行目、タイプ1のオペレータの場合は、 $P_g = 0.9$ 、 $P_f = 0.1$ の値が与えられていることを示す。第11行目タイプ6のオペレータの場合は、 $P_g = 0.7$ 、 $P_f = 0.2$ 、 $P_p = 0.1$ の値が与えられていることを示す。

第15行目は、入力データの終了を示している。

第17行目以降は、以上のデータの要約である。

付2.1.4 GO3 ステップ

図付-6 は GO3 ステップの実施結果で、計算の途中過程及び結果が示されている。

第9行目～12行目は、計算実施時の条件である。

第13行目～65行目は、計算の途中経過の記録である。

第16行目は、1番のタイプ5のオペレータを示す。

第17行目は、上記オペレータの動作の結果1番の信号がタイム・ポイント1において発生する確率が1.0であることを示している。

第22行目は、4番のタイプ1のオペレータを示す。

第23行目は、4番のオペレータの動作の結果、2番の信号がタイム・ポイント4において存在し、3番の信号がタイム・ポイント2において存在し、さらに6番の信号がタイム・ポイント3において存在している場合の確率が、 1.0×10^{-1} であることを示している。

同様に、第61行目は、9番のタイプ2のオペレータを示している。第62～65行目は、9番の信号がそれぞれ1～4のタイム・ポイントにおいて存在する確率を示している。

第66～76行目は、最終信号線9番の存在確率値の再掲である。

第78行目は計算結果の誤差を示している。これは計算過程において、端数の取り扱いに起因して発生する誤差である。

第79行目～85行目に、タイム・ポイント値の順に最終信号の存在確率を示したもので、解析の最終結果である。

付2.1.5 解析結果

本解析結果の意味は次のようになる。

最終信号9番の存在は、少なくとも1つのランプが点灯状態になることを意味している。それ故、最後の結果は、

電源接続時(タイム・ポイント1)に少なくとも1つのランプが点灯する確率が 1.3824×10^{-1} 、

スイッチ1を閉じる指令を出した時(タイム・ポイント2)に少なくとも1つのランプが、点灯状態になる確率が 4.6368×10^{-1} 、

スイッチ2を閉じる指令を出した時(タイム・ポイント3)に少なくとも1つのランプが、点灯状態になる確率が 1.8144×10^{-1} 、

どちらのランプも点灯しない(タイム・ポイント4)確率が 2.1664×10^{-1} 、

なお、本解析例では FF コード群による出力結果は省略した。

SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO1

GO1 RUN DATE AT 84-04-23 TIME AT 15:46: 4

VALUES = 5, BIAS = 5000, OPS = 1, SIGNAL = 1, ERRORS = 25

OPERATOR DATA

OP	DATA
1	5,1,1*
2	5,2,3*
3	5,3,6*
4	1,4,1,2*
5	6,5,2,3,4*
6	6,6,2,6,7*
7	1,7,4,5*
8	1,8,7,8*
9	2,0,2,5,8,9*
////	0,9*

TIME POINT DESCRIPTION ? (IF ANY)

VAL. TIME POINT DESCRIPTION

---	-----
0	REPRESENTING
1	THE BATTERY IS INSTALLED
2	S1 IS CLOSED
3	S2 IS CLOSED
4	NEVER

SIGNAL DATA

SOURCE OPER.

SIGNAL NUM TYPE KIND USING OPERATORS (- IF DELETED AT)

---	---	---	---	-----
1	1	5	1	-4
2	4	1	4	5 -6

図付-4(1) GO1 ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

3	2	5	2	-5
4	5	6	5	-7
5	7	1	7	-9
6	3	5	3	-6
7	6	6	6	-8
8	8	1	8	-9
9	9	2	0	

NUMBER OF OPERATORS = 9
NUMBER OF SIGNALS = 9
MAX NUMBER ACTIVE = 3
MAX SIGNAL LIST SIZE = 3
NUMBER OF SIGNAL VALUES = 5
NUMBER OF SIGNALS/WORD = 10
NUMBER OF WORDS/TERM = 1

FINAL SIGNALS = 9

GO1 PROCESS END

図付-4(2) GO1 ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO2
 GO2 RUN DATE AT 84-04-23 TIME AT 15:48:17

OPERATOR FILE --- (84-04-23 15:46: 4)
 SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO1

RECORD KIND DATA

```
-----
 1  1,5,1,1,1.0*
 2  2,5,1,2,1.0*
 3  3,5,1,3,1.0*
 4  4,1,0.9,0.1*
 5  5,6,0.7,0.2,0.1*
 6  6,6,0.7,0.2,0.1*
 7  7,1,0.8,0.2*
 8  8,1,0.8,0.2*
 9  *
```

USE SUMMARY TABLE. ENTRY = KIND/TYPE(FREQUENCY)
 (FREQUENCY IS NEGATIVE FOR PERFECT KINDS.)

1/ 5(1)	2/ 5(1)	3/ 5(1)	4/ 1(1)	5/ 6(1)
6/ 6(1)	7/ 1(1)	8/ 1(1)		

NUMBER OF KINDS INPUT----- 8
 NUMBER USED - NONPERFECT-- 8
 NUMBER USED - PERFECT----- 0

GO2 PROCESS END

図付-5 GO2 ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO3
 GO3 RUN DATE AT 84-04-23 TIME AT 15:50:57

OPERATOR FILE --- (84-04-23 15:46: 4)
 SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO1
 KIND FILE ----- (84-04-23 15:48:17)
 SAMPLE PROBLEM K-75-94U(R) GO2

MAXIMUM SIGNAL VALUE (INFINITY) IS 4
 MAXIMUM DISTRIBUTION SIZE IS 6000

RUN NUMBER 1
 PMIN =0.0
 NEW = 0, INTER = 1, SAVE = 1
 FIRST = 1, LAST = 9, TRACE = 0.0

ANALYSIS DETAILS

OP	TYPE	KIND	SIZE
1	5	1	1
1.00000E+00		1(1)	
2	5	2	1
1.00000E+00		1(1)	3(2)
3	5	3	1
1.00000E+00		1(1)	3(2) 6(3)
4	1	4	2
1.00000E-01		2(4)	3(2) 6(3)
9.00000E-01		2(1)	3(2) 6(3)

図付-6(1) GO3 ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

5	6	5	4
1.00000E-01		2(4)	4(4) 6(3)
1.80000E-01		2(1)	4(4) 6(3)
6.30000E-01		2(1)	4(2) 6(3)
8.99999E-02		2(1)	4(1) 6(3)

6	6	6	9
1.36000E-01		7(4)	4(4)
1.26000E-01		7(3)	4(4)
1.80000E-02		7(1)	4(4)
1.26000E-01		7(4)	4(2)
4.41000E-01		7(3)	4(2)
6.30000E-02		7(1)	4(2)
1.80000E-02		7(4)	4(1)
6.29999E-02		7(3)	4(1)
8.99998E-03		7(1)	4(1)

7	1	7	9
1.64800E-01		7(4)	5(4)
2.26800E-01		7(3)	5(4)
3.24000E-02		7(1)	5(4)
1.00800E-01		7(4)	5(2)
3.52800E-01		7(3)	5(2)
5.04000E-02		7(1)	5(2)
1.44000E-02		7(4)	5(1)
5.03999E-02		7(3)	5(1)
7.19998E-03		7(1)	5(1)

8	1	8	9
2.16640E-01		8(4)	5(4)
1.81440E-01		8(3)	5(4)
2.59200E-02		8(1)	5(4)
1.81440E-01		8(4)	5(2)
2.82240E-01		8(3)	5(2)
4.03200E-02		8(1)	5(2)

図付-6(2) GO3ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

```

2.59200E-02      8( 4)      5( 1)
4.03199E-02      8( 3)      5( 1)
5.75998E-03      8( 1)      5( 1)
          9      2      0      4
2.16640E-01      9( 4)
1.81440E-01      9( 3)
1.38240E-01      9( 1)
4.63680E-01      9( 2)

```

FINAL EVENT TABLE (INFINITY = 4)

SIGNALS AND THEIR VALUES

```

-----
PROBABILITY      9
-----
1.38240E-01      1
1.81440E-01      3
2.16640E-01      4
4.63680E-01      2
-----

```

TOTAL PROBABILITY = 9.99999E-01

TOTAL ERROR = 1.13240E-06

INDIVIDUAL SIGNAL PROBABILITY DISTRIBUTIONS

```

VAL.              9
-----
1      1.38240E-01
2      4.63680E-01
3      1.81440E-01
4      2.16640E-01

```

GO3 PROCESS END

図付-6(3) GO3 ステップ計算結果出力 (サンプル問題1)

付2.2 原子力船“むつ”非常用崩壊熱除去系

付2.2.1 GOチャートによる表現

対象とする系は、第六章において説明されており、そのシステム図は図6-1に示されている。

図6-1のシステムをGOチャートに表現すると、図付-3のようになる。ここでは、GO手法の制約から、待機状態にある本系が指令により作動を開始する場合の成功/失敗確率を求める場合のGOチャートを示す。各オペレータの表現方法は図付-2と同様である。

各オペレータに与えたデータ及び、オペレータの意

味、対応機器を表付-9に示す。

付2.2.2 解析結果

解析実施の結果の出力を図付-7~9に示す。図付-7~9の表記方法は図付-4~6と同様であるため、説明は省略する。

最終信号46番の存在は、系が作動状態にあることを意味している。最終結果は図付-9(6)に示されており、作動開始指令時(タイム・ポイント3)において、系が作動する確率は、 9.64862×10^{-1} であり、起動失敗(タイム・ポイント4)の確率が、 3.51339×10^{-2} である事を示している。

表付-9 オペレータに与えるデータ (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	5	1.0(1)	タンク接続
2	5	1.0(2)	非常用発電機始動指令
3	5	1.0(3)	V4, V5 開指令
4	1	$P_f = 1.2 \times 10^{-7}$	非常用水タンク
5	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V1
6	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V2
7	1	$P_f = 3.0 \times 10^{-2}$	非常用発電機起動
8	1	$P_f = 2.0 \times 10^{-3}$	スイッチ
9	1	$P_f = 2.0 \times 10^{-3}$	ブレーカー
10	6	$P_p = 0.0, P_f = 1.0 \times 10^{-3}$	崩壊熱除去ポンプ始動
11	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V3
12	1	$P_f = 7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
13	6	$P_p = 0.0, P_f = 1.0 \times 10^{-3}$	V4 開失敗
14	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V6
15	1	$P_f = 7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
16	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V8
17	1	$P_f = 3.6 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
18	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-5}$	V10
19	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V12
20	6	$P_p = 0.0, P_f = 1.0 \times 10^{-3}$	V5 開失敗
21	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V7
22	1	$P_f = 7.2 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
23	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V9
24	1	$P_f = 3.6 \times 10^{-7}$	二次側パイプ破裂
25	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-5}$	V11
26	1	$P_f = 1.0 \times 10^{-4}$	V13

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM -- GO1 --
 GO1 RUN DATE AT 84-07-23 TIME AT 16:13:59
 VALUES = 5, BIAS = 5000, OPS = 1, SIGNAL = 1, ERRORS = 25

OPERATOR DATA

OP	DATA
1	5,1,1*
2	5,2,5*
3	5,3,17*
4	1,5,1,2*
5	1,6,2,3*
6	1,7,3,4*
7	1,8,5,6*
8	1,9,6,7*
9	1,10,7,8*
10	6,11,4,8,9*
11	1,15,9,14*
12	1,16,14,15*
13	6,18,15,17,18*
14	1,20,18,20*
15	1,22,20,22*
16	1,25,22,25*
17	1,27,25,27*
18	1,29,27,29*
19	1,31,27,31*
20	6,32,15,17,32*
21	1,34,32,34*
22	1,36,34,36*
23	1,39,36,39*
24	1,41,39,41*
25	1,43,41,43*
26	1,45,41,45*
27	2,0,4,29,31,43,45,46*
////	0,46*

図付-7(1) GO1 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

TIME POINT DESCRIPTION ? (IF ANY) -

VAL. TIME POINT DESCRIPTION

0	REPRESENTING
1	TANK STAND-BY
2	PUMP, DG START
3	VALVE EC-006 OPEN
4	NEVER

SIGNAL DATA

SOURCE OPER.				
SIGNAL	NUM	TYPE	KIND	USING OPERATORS (- IF DELETED AT)

1	1	5	1	-4
2	4	1	5	-5
3	5	1	6	-6
4	6	1	7	-10
5	2	5	2	-7
6	7	1	8	-8
7	8	1	9	-9
8	9	1	10	-10
9	10	6	11	-11
14	11	1	15	-12
15	12	1	16	13 -20
17	3	5	3	13 -20
18	13	6	18	-14
20	14	1	20	-15
22	15	1	22	-16
25	16	1	25	-17
27	17	1	27	18 -19
29	18	1	29	-27
31	19	1	31	-27
32	20	6	32	-21
34	21	1	34	-22

図付-7(2) GO1 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

36	22	1	36	-23	
39	23	1	39	-24	
41	24	1	41	25	-26
43	25	1	43	-27	
45	26	1	45	-27	
46	27	2	0		

NUMBER OF OPERATORS = 27
NUMBER OF SIGNALS = 27
MAX NUMBER ACTIVE = 4
MAX SIGNAL LIST SIZE = 4
NUMBER OF SIGNAL VALUES = 5
NUMBER OF SIGNALS/WORD = 10
NUMBER OF WORDS/TERM = 1

FINAL SIGNALS = 46

GO1 PROCESS END

図付-7(3) GO1 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM --- GO2 ---
 GO2 RUN DATE AT 84-07-23 TIME AT 16:15:48

OPERATOR FILE --- (84-07-23 16:13:59)

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM -- GO1 --

RECORD KIND DATA

```

-----
1  1,5,1,1,1.0*
2  2,5,1,2,1.0*
3  3,5,1,3,1.0*
4  5,1,.99999988,0.00000012*
5  6,1,.9999,0.0001*
6  7,1,.9999,0.0001*
7  8,1,.97,0.03*
8  9,1,.998,0.002*
9  10,1,.998,0.002*
10 11,6,.999,0.001,0.0*
11 15,1,.9999,0.0001*
12 16,1,.99999928,.00000072*
13 18,6,.999,0.001,0.0*
14 20,1,.9999,0.0001*
15 22,1,.99999928,0.00000072*
16 25,1,.9999,0.0001*
17 27,1,.99999964,0.00000036*
18 29,1,.99999,0.00001*
19 31,1,.9999,0.0001*
20 32,6,.999,0.001,0.0*
21 34,1,.9999,0.0001*
22 36,1,.99999928,0.00000072*
23 39,1,.9999,0.0001*
24 41,1,.99999964,0.00000036*
25 43,1,.99999,0.00001*
26 45,1,.9999,0.0001*
29  *
-----

```

図付-8(1) GO2 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

USE SUMMARY TABLE ENTRY = KIND/TYPE(FREQUENCY)
 (FREQUENCY IS NEGATIVE FOR PERFECT KINDS.)

1/ 5(1)	2/ 5(1)	3/ 5(1)	4/ 5(1)	5/ 1(1)	6/ 1(1)
7/ 1(1)	8/ 1(1)	9/ 1(1)	10/ 1(1)		
11/ 6(1)	15/ 1(1)	16/ 1(1)	18/ 6(1)	20/ 1(1)	
22/ 1(1)	25/ 1(1)	27/ 1(1)	29/ 1(1)		
31/ 1(1)	32/ 6(1)	34/ 1(1)	36/ 1(1)	39/ 1(1)	
41/ 1(1)	43/ 1(1)	45/ 1(1)			

NUMBER OF KINDS INPUT----- 26
 NUMBER USED - NONPERFECT-- 26
 NUMBER USED - PERFECT----- 0

GO2 PROCESS END

図付-8(2) GO2 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM --- GO3 --
 GO3 RUN DATE AT 84-07-23 TIME AT 16:17:49

OPERATOR FILE --- (84-07-23 16:13:59)

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM --- GO1 --
 KIND FILE ----- (84-07-23 16:15:48)

MUTSU - EMERGENCY DECAY HEAT REMOVAL SYSTEM --- GO2 --

MAXIMUM SIGNAL VALUE (INFINITY) IS 4

MAXIMUM DISTRIBUTION SIZE IS 6000

RUN NUMBER 1

PMIN =0.0

NEW = 0, INTER = 1, SAVE = 1

FIRST = 1, LAST = 46, TRACE = 0.0

ANALYSIS DETAILS

OP	TYPE	KIND	SIZE
1	5	1	1
1.00000E+00		1(1)	
2	5	2	1
1.00000E+00		1(1) 5(2)	
3	5	3	1
1.00000E+00		1(1) 5(2) 17(3)	
4	1	5	2
1.20000E-07		2(4) 5(2) 17(3)	
1.00000E+00		2(1) 5(2) 17(3)	
5	1	6	2
1.00120E-04		3(4) 5(2) 17(3)	
9.99899E-01		3(1) 5(2) 17(3)	

図付-9(1) GO3ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

6			
2.00110E-04	4(4)	5(2)	17(3)
9.99799E-01	4(1)	5(2)	17(3)
7			
6.00330E-06	4(4)	6(4)	17(3)
1.94107E-04	4(4)	6(2)	17(3)
2.99940E-02	4(1)	6(4)	17(3)
9.69805E-01	4(1)	6(2)	17(3)
8			
6.39151E-06	4(4)	7(4)	17(3)
1.93718E-04	4(4)	7(2)	17(3)
3.19336E-02	4(1)	7(4)	17(3)
9.67866E-01	4(1)	7(2)	17(3)
9			
6.77894E-06	4(4)	8(4)	17(3)
1.93331E-04	4(4)	8(2)	17(3)
3.38693E-02	4(1)	8(4)	17(3)
9.65930E-01	4(1)	8(2)	17(3)
10			
3.50353E-02	9(4)	0(0)	17(3)
9.64964E-01	9(2)	0(0)	17(3)
11			
3.51318E-02	14(4)	0(0)	17(3)
9.64867E-01	14(2)	0(0)	17(3)
12			
3.51325E-02	15(4)	0(0)	17(3)
9.64866E-01	15(2)	0(0)	17(3)

図付-9(2) GO3 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

13	6	18	3			
3.51325E-02		15(4)	18(4)	17(3)		
9.64866E-04		15(2)	18(4)	17(3)		
9.63901E-01		15(2)	18(3)	17(3)		
14	1	20	3			
3.51325E-02		15(4)	20(4)	17(3)		
1.06126E-03		15(2)	20(4)	17(3)		
9.63804E-01		15(2)	20(3)	17(3)		
15	1	22	3			
3.51325E-02		15(4)	22(4)	17(3)		
1.06195E-03		15(2)	22(4)	17(3)		
9.63803E-01		15(2)	22(3)	17(3)		
16	1	25	3			
3.51325E-02		15(4)	25(4)	17(3)		
1.15833E-03		15(2)	25(4)	17(3)		
9.63707E-01		15(2)	25(3)	17(3)		
17	1	27	3			
3.51325E-02		15(4)	27(4)	17(3)		
1.15868E-03		15(2)	27(4)	17(3)		
9.63706E-01		15(2)	27(3)	17(3)		
18	1	29	4			
3.51325E-02		15(4)	27(4)	17(3)	29(4)	
1.15868E-03		15(2)	27(4)	17(3)	29(4)	
9.63706E-06		15(2)	27(3)	17(3)	29(4)	
9.63696E-01		15(2)	27(3)	17(3)	29(3)	
19	1	31	5			
3.51325E-02		15(4)	31(4)	17(3)	29(4)	
1.15868E-03		15(2)	31(4)	17(3)	29(4)	
9.63610E-06		15(2)	31(3)	17(3)	29(4)	
9.63695E-05		15(2)	31(4)	17(3)	29(3)	
9.63600E-01		15(2)	31(3)	17(3)	29(3)	

図付-9(3) GO3ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

20	6	32	8		
3.51337E-02		32 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.15752E-03		32 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
9.63609E-09		32 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
9.62646E-06		32 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
9.63696E-08		32 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
9.62732E-05		32 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
9.63600E-04		32 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (3)
9.62636E-01		32 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (3)

21	1	34	8		
3.51338E-03		34 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.15740E-03		34 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.05987E-08		34 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
9.62549E-06		34 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
1.05997E-07		34 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
9.62636E-05		34 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
1.05986E-03		34 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (3)
9.62540E-01		34 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (3)

22	1	36	8		
3.51338E-02		36 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.15740E-03		36 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.06057E-08		36 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
9.62548E-06		36 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
1.06066E-07		36 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
9.62635E-05		36 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (3)
1.06056E-03		36 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (3)
9.62539E-01		36 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (3)

23	1	39	8		
3.51339E-02		39 (4)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.15729E-03		39 (3)	31 (4)	0 (0)	29 (4)
1.15682E-08		39 (4)	31 (3)	0 (0)	29 (4)
9.62452E-06		39 (3)	31 (3)	0 (0)	29 (4)

図付-9(4) GO3 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

1.15693E-07	39(4)	31(4)	0(0)	29(3)
9.62538E-05	39(3)	31(4)	0(0)	29(3)
1.15681E-03	39(4)	31(3)	0(0)	29(3)
9.62442E-01	39(3)	31(3)	0(0)	29(3)
24	1	41	8	
3.51339E-02	41(4)	31(4)	0(0)	29(4)
1.15728E-03	41(3)	31(4)	0(0)	29(4)
1.15717E-08	41(4)	31(3)	0(0)	29(4)
9.62451E-06	41(3)	31(3)	0(0)	29(4)
1.15727E-07	41(4)	31(4)	0(0)	29(3)
9.62538E-05	41(3)	31(4)	0(0)	29(3)
1.15716E-03	41(4)	31(3)	0(0)	29(3)
9.62442E-01	41(3)	31(3)	0(0)	29(3)
25	1	43	12	
3.51339E-02	41(4)	31(4)	43(4)	29(4)
1.15728E-08	41(3)	31(4)	43(4)	29(4)
1.15727E-03	41(3)	31(4)	43(3)	29(4)
1.15717E-08	41(4)	31(3)	43(4)	29(4)
9.62451E-11	41(3)	31(3)	43(4)	29(4)
9.62441E-06	41(3)	31(3)	43(3)	29(4)
1.15727E-07	41(4)	31(4)	43(4)	29(3)
9.62537E-10	41(3)	31(4)	43(4)	29(3)
9.62528E-05	41(3)	31(4)	43(3)	29(3)
1.15716E-03	41(4)	31(3)	43(4)	29(3)
9.62441E-06	41(3)	31(3)	43(4)	29(3)
9.62432E-01	41(3)	31(3)	43(3)	29(3)
26	1	45	16	
3.51339E-02	45(4)	31(4)	43(4)	29(4)
1.15717E-08	45(3)	31(4)	43(4)	29(4)
1.15727E-07	45(4)	31(4)	43(3)	29(4)
1.15716E-03	45(3)	31(4)	43(3)	29(4)
1.15717E-08	45(4)	31(3)	43(4)	29(4)

図付-9(5) GO3ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)

9.62355E-11	45 (3)	31 (3)	43 (4)	29 (4)
9.62441E-10	45 (4)	31 (3)	43 (3)	29 (4)
9.62345E-06	45 (3)	31 (3)	43 (3)	29 (4)
1.15727E-07	45 (4)	31 (4)	43 (4)	29 (3)
9.62441E-10	45 (3)	31 (4)	43 (4)	29 (3)
9.62527E-09	45 (4)	31 (4)	43 (3)	29 (3)
9.62431E-05	45 (3)	31 (4)	43 (3)	29 (3)
1.15716E-03	45 (4)	31 (3)	43 (4)	29 (3)
9.62345E-06	45 (3)	31 (3)	43 (4)	29 (3)
9.62432E-05	45 (4)	31 (3)	43 (3)	29 (3)
9.62335E-01	45 (3)	31 (3)	43 (3)	29 (3)
27	2	0	2	
3.51339E-02	46 (4)			
9.64862E-01	46 (3)			

 FINAL EVENT TABLE (INFINITY = 4)

SIGNALS AND THEIR VALUES

PROBABILITY	46
-----	-----
3.51339E-02	4
9.64862E-01	3

 TOTAL PROBABILITY = 9.99995E-01

TOTAL ERROR = 4.52995E-06

INDIVIDUAL SIGNAL PROBABILITY DISTRIBUTIONS

VAL.	46
-----	-----

3	9.64862E-01
4	3.51339E-02

GO3 PROCESS END

図付-9(6) GO3 ステップ計算結果出力 (原子力船むつ非常用崩壊熱除去系)