

原子炉システムの信頼性解析手法GO-FLOWの開発研究

松岡 猛*、小林 道幸**

Development of the GO-FLOW Reliability Analysis Methodology for Nuclear Reactor System by Takeshi MATSUOKA and Michiyuki KOBAYASHI

Abstract

Probabilistic Safety Assessment (PSA) is important in the safety analysis of technological systems and processes, such as, nuclear plants, chemical and petroleum facilities, aerospace systems.

Event trees and fault trees are the basic analytical tools that have been most frequently used for PSAs. Several system analysis methods can be used in addition to, or in support of, the event- and fault-tree analysis. The need for more advanced methods of system reliability analysis has grown with the increased complexity of engineered systems.

The Ship Research Institute has been developing a new reliability analysis methodology, GO-FLOW, which is a success-oriented system analysis technique, and is capable of evaluating a large system with complex operational sequences. The research has been supported by the special research fund for Nuclear Technology, Science and Technology Agency, from 1989 to 1994.

This paper describes the concept of the Probabilistic Safety Assessment (PSA), an overview of various system analysis techniques, an overview of the GO-FLOW methodology, the GO-FLOW analysis support system, procedure of treating a phased mission problem, a function of common cause failure analysis, a function of uncertainty analysis, a function of common cause failure analysis with uncertainty, and printing out system of the results of GO-FLOW analysis in the form of figure or table. Above functions are explained by analyzing sample systems, such as PWR AFWS, BWR ECCS.

In the appendices, the structure of the GO-FLOW analysis programs and the meaning of the main variables defined in the GO-FLOW programs are described.

The GO-FLOW methodology is a valuable and useful tool for system reliability analysis, and has a wide range of applications. With the development of the total system of the GO-FLOW, this methodology has become a powerful tool in a living PSA.

* システム技術部

** 原子力技術部

原稿受付 平成6年12月1日

審査済 平成6年12月22日

目次

1. 序論	1
2. 確率論的安全評価 (PSA)	3
3. 事故シーケンスの定量化	3
4. システム信頼性解析手法	5
5. GO-FLOW手法開発の経緯	6
6. GO-FLOW手法の概要	6
6.1 信号の意味	6
6.2 タイム・ポイント	7
6.3 オペレータ機能概略	7
6.4 信号の強度	8
6.5 解析手順	8
6.6 サンプル問題による解析手順の理解	8
6.7 信号線間の従属性の取り扱い	12
7. GO-FLOW解析支援システム	13
7.1 GO-FLOWチャート・エディター	13
7.2 GO-FLOWチャート図化プログラム	15
8. フェイズド・ミッション問題	16
8.1 タイプ40オペレータ	16
8.2 解析実施例	17
9. 共通原因故障解析機能	28
9.1 共通原因故障	28
9.2 共通原因故障のモデル化	28
9.2.1 明示的方法	28
9.2.2 パラメトリックな方法	28
9.3 共通原因故障データ	30
9.4 GO-FLOW手法における共通原因故障の取り扱い	32
9.5 解析プログラムにおける共通原因故障解析方法	34
9.5.1 各オペレータにおける故障率等の取り扱い	34
9.6 解析実施例	37
10. 不確かさ解析機能	41
10.1 故障確率の分布型	42
10.2 解析実施例	44
11. 共通原因故障を考慮した不確かさ解析機能	50
11.1 解析実施例	51
12. GO-FLOW解析プログラムの体系	54
13. GO-FLOW解析結果表示プログラム	55
13.1 解析結果総合表示	55
13.2 不確かさ解析結果	62
14. まとめ	65
参考文献	65
付録	68
付1. 解析プログラムの構成	68
付2. GO-FLOWプログラム内の主要変数の意味	73

1. 序論

船舶技術研究所においては、原子力船の基礎的研究を原子力開発長期利用計画（昭和62年6月22日原子力委員会決定）に沿って実施してきている。原子力船に関する技術開発においては、実用化に適切に対応しうる様に技術、知見、経験等の蓄積を図ることが重要であり、船用炉のような複雑な動作モードを持つ大規模システムの信頼性解析手法を開発することは、合理的なシステム設計による経済性・安全性の向上、合理的な安全規制のためにも重要な研究として捉えられている。

1975年のラスムッセン報告¹⁾の刊行以来、確率論的安全評価手法 (PSA)²⁾が原子力の分野に本格的に導入され、その重要性が認識されている。ラスムッセン報告は、フォールト・ツリー解析手法により、陸上の原子力発電プラント・システムの信頼性解析を行ったものである。しかし、フォールト・ツリー (FT) 解析手法³⁾は、FT作成に熟練を要する、作成されたFTに論理的な欠陥がないかを確認する事が困難、複雑な動作モードを持つ系への適用や、時間経過に伴う故障発生算出に膨大な作業を必要とする等の問題点を残している。

これらの問題を解決し、船用炉システムを始めとする複雑・大規模な系への適用が可能な新たな解析方法として船舶技術研究所ではGO-FLOW手法⁴⁾を提案し、開発を進めてきた。本研究は、GO-FLOW手法の基本的枠組みを基とし、実用性に優れたシステム信頼性解析方法としての体系を完成させる事を目的とし、次の四つの項目について、平成元年度より原子力試験研究費により五か年計画で開発を進めて来た。

1. GO-FLOW手法の性能・使用性の向上の研究
2. フェイズド・ミッション、回復操作、保守点検を考慮した評価の取り扱い方法の研究
3. 共通原因故障、外的事象、人的要因の取り扱い方法の研究
4. 不確かさ解析機能の整備

この信頼性解析手法GO-FLOWの解析体系は、船用炉システムばかりでなく陸上発電プラントへの適用も十分可能である。例えば、陸上炉でも問題となっているフェイズド・ミッション問題⁵⁾の解析、システム間相互作用の取り扱い、共通原因故障⁶⁾のより正確な取り扱いが可能となり、小リーク事故から炉心溶融という重大事故に至る様な、長時間にわたり炉心内状態が順次変化してゆく事故解析におけるシステム信頼性解析においても重要な役割を担う事が出来る。

なお、本「GO-FLOW手法の開発研究」は原子力安全委員会の原子力施設等安全研究年次計画の中でも当面実施すべき重要な研究課題とされてきた。

2. 確率論的安全評価 (PSA)

工学システムを設計・建設・運転する際には、そのシステムが公衆や運転員に被害を与える恐れが無い様、事前の十分な検討が要求される。被害の程度がそれほど大きくないと想定されるシステムの場合は厳密な事前の検討よりも、使用経験の蓄積により安全性が判断され、安全確保のための様々な工夫がなされていく。しかし、原子力プラント、化学プラントに代表される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。

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安全確保のための工夫がどの様に機能するかを解析し、安全が確保されていることを確認する方法がとられている。しかし、完璧な工学システムというものには主張できないという観点に立つと何重にも装備された安全防護系でも次々に故障してしまう多重故障を評価しなくてはならなくなる。そのような目的のため確率論的安全評価手法 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) が導入されてきた。

確率論的安全評価では、被害発生の可能性の程度を明らかにする。そのためには、被害に到る事象の組み合わせ (事故シーケンス)、その発生確率 (Pi)、被害の大きさ (Ci) を全て調べ上げ、Pi・Ciの総和でもってシステムのもたらすリスクを表す。

原子力分野における安全性の議論においては、1960年代に、F.R.Farmer⁷⁾により公衆のリスクを定量的に研究すべきだとの指摘がなされた。その後、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、MITラスマッセン教授を主査とするReactor Safety Study (RSS)¹¹⁾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、確率論的安全評価の考え方を確立した研究であると言える。この研究では種々の安全解析手法が生み出され、今日世界各国で実施されているPSAは、ほとんど全てがこのときに確立された方法論を基礎にしているといつて良い。

原子炉施設のPSAは、炉心に内臓されている放射性物質が周辺環境に放出され被害を及ぼすまでの経路のどこに注目するかにより、レベル1からレベル3の3段階に分類されている⁸⁾。レベル1では、炉心の重大な損傷を取り上げてその発生確率を求める。レベル2では、炉心損傷に引き続く格納容器の破損により環境中に放出される放射性物質の種類、量、放出時刻等を求める。レベル3では放射性物質放出シナリオ、その発生確率、周辺住民の人口分布、事故時避難計画、風向・風速・降雨等の気象条件をもとに公衆の個人及び集団のリスクを評価する。

解析においては、こうした被害をもたらすに到る事故の

引金になる事象、起因事象を全て考慮しなくてはならないが、発生確率が非常に小さく、無視し得るものは解析から除外される。起因事象には、プラントを構成する機器・系統に発生する内的事象と、地震⁹⁾、洪水、航空機落下等のプラント外部で発生する事象 (外的事象)⁶⁾とに分けて考えられる。一般に、外的事象の方が発生頻度は小であるが、解析において考慮すべき事項は多く、解析は複雑となる。

確率論的安全評価はリスクを定量的に推定する唯一の手段と捉えられている。新規技術、複雑なシステムにおいて、安全性を人々に説明するのは難しい作業となるが、定量的なリスクという指標は、公衆とシステム設計者との間の重要な接点となりうる。更に、PSAの結果は、原子炉施設のリスク管理に係わる意志決定プロセス、安全性向上のための効果的な手段の同定、安全確保のための運転管理方法の策定、規制活動等にも重要な情報を提供する。

3. 事故シーケンスの定量化

事故の発生頻度の評価は、起因事象の発生頻度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、例えば主給水系ポンプの停止、だけでは大事故には至らない。システム中の安全装置がすべて作動しない場合に限って原子炉が危険な状態になり大事故が発生するといえる。つまり、システム中の安全機能の異常・故障の様々な組み合わせを体系的に分析する必要がある。

この分析手段としてラスマッセン報告ではイベント・ツリー¹⁰⁾及びフォールト・ツリー¹¹⁾が用いられた。

イベント・ツリーは炉心損傷につながり得る複雑なプラント内の事故シーケンスの展開に適した解析方法で図-1に示す様なツリー構造を持っている。左端に起因事象が置かれ、順次各種安全機能/安全システムを表す見出し (ヘディング) が上部に書かれている。各ヘディングにおける機能の成否に対応して事故のシーケンスが上下に分岐して行く。この様にして、論理的に起こり得る全ての事故シーケンスを同定することができる。

イベント・ツリーの作成においては、ヘディングの選択、並べる順序が重要となる。論理的に不要なヘディング、まとめられるヘディングを検討し、簡明なイベント・ツリーを作成する必要がある。また、ヘディングの順序としては、①システムが機能/動作する時間の順に並べる。②システムAが機能するためにシステムBの動作が必要な場合はシステムB、Aの順に並べる。③ある故障が必然的に他の故障を引き起こす様な従属関係にある場合は従属しているシステムを後ろへ置く。

このイベント・ツリーにより得られる各事故シーケンスを定量的に評価するためには、起因事象の発生頻度と合わせて各ヘディングに対応したシステムの成功/失敗確率を求める必要がある。このための解析手法として、ラスマッセン報告ではフォールト・ツリー (FT) を採用している。FTはシステム全体の故障を構成機器の故障に分解して分析する解析手法で、図-2に示す様なツリー構造を持って

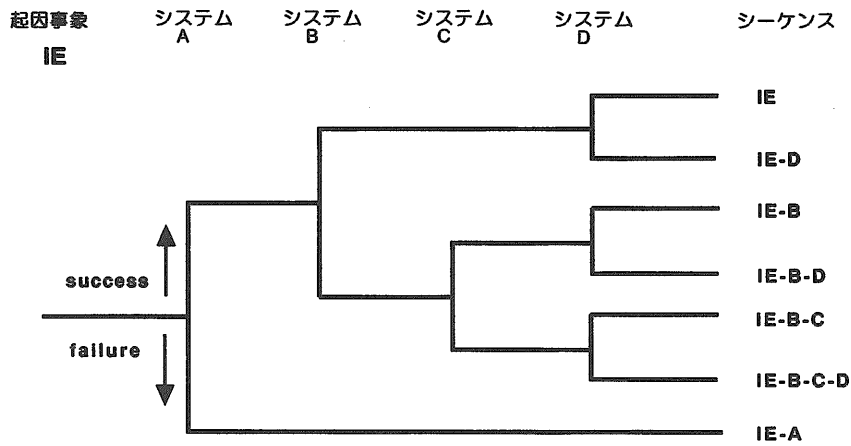


図-1 イベント・ツリーの例

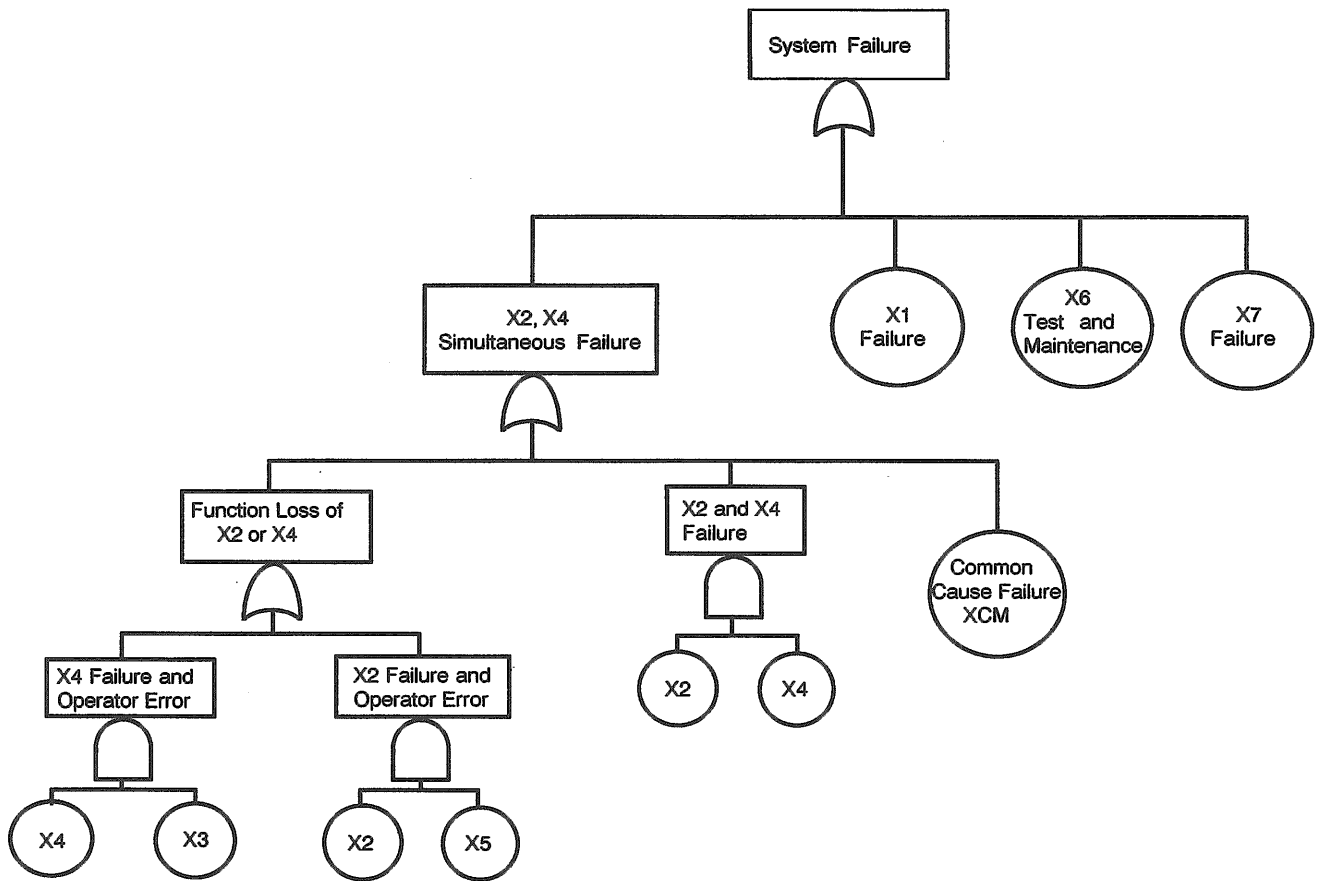


図-2 フォールト・ツリーの例

いる事からフォールト・ツリー（故障木）と呼ばれている。

イベント・ツリー、フォールト・ツリーの組み合わせで解析を進める際、支援系（サポートシステム）の動作の成否をイベント・ツリーのヘディングに全て取り上げる方法

と、フォールト・ツリーの中に記す方法がある。前者の場合大規模なイベント・ツリーと小規模なフォールト・ツリーとなる。後者の場合は逆にフォールト・ツリーが大規模となる。

4. システム信頼性解析手法

システム信頼性解析手法としてはフォールト・ツリーをはじめとして種々の手法がある。本節では主な手法についてそれぞれの特徴を述べることにする。

(1) FMEA

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 法¹²⁾は、機器の故障モードとその故障が他の機器、系統に及ぼす影響を調べる方法である。各機器についてその本来の機能、故障モード、故障のメカニズム、系への影響、故障の検出方法等の項目を徹底的に調べ表の形にまとめる。これは定性的な解析方法であり、単独では定量的解析とはならず、フォールト・ツリーの解析や起因事象の選定に先立つ予備的な解析として実施される。

(2) 信頼性ブロック・ダイアグラム¹³⁾

解析対象の系を、構成機器あるいは機器の集合まで分解してそれらをブロックで表現し、系の動作経路に従ってブロック間の関係を結んだ図形式の表現である。この方法はプラントやシステム等の信頼性を評価する際に用いられており、各ブロックに動作確率の値を割り当てて定量的解析を行う。また、フォールト・ツリーの定量的解析の確認としても用いられている。

(3) フォールト・ツリー³⁾

フォールト・ツリー解析手法は、航空機産業界における20年以上の経験及びピラスムッセン報告に採用されて以来の原子力産業界における使用経験がある。

フォールト・ツリーは図-2に示す構造をしており、頂上事象をAND、OR等の論理ゲートを通じてより基本的な事象に分解した場合の論理的なつながりを図式化したものである。フォールト・ツリーの末端には基事象と分解不可能な事象が存在する。基事象は発生確率のデータが入手可能か、物理的モデルから推定が容易な事象である。分解不可能な事象は、これ以上分解出来ない、あるいは分解する必要のない事象である。

このようにして、頂上事象(故障発生)を、より単純な事象の組み合わせによる合成として表現し、頂上事象の発生確率値を求めることがフォールト・ツリーの解析と言える。

(4) マルコフ解析¹⁴⁾

各機器の成功/失敗の状態間の遷移をマルコフ過程を応用した確率的な現象としてモデル化し、定量的な解析を行う。この方法では、機器の点検、補修をも考慮に入れた系の状態の時間的推移を評価できる。しかし、系が少しでも大きくなると、たちどころに解析の複雑さが増大してしまう。そのために、この方法は単純な系に対してのみしか適用できない。

(5) GO手法

GO手法¹⁵⁾はフォールト・ツリー解析とは異なり、成功経路を追う解析方法である。この手法はもともと1960年代から電気回路の解析のため開発・利用されて、その後原子

力分野でも使用されるようになってきた。GO手法においては、系の構成や機能をモデル化するためにGOチャートを作成する。GOチャートは、16種類の標準オペレータおよび必要に応じて解析者の定義したオペレータと、それらを結ぶ信号線より成り立っている。標準オペレータは、AND、ORの論理ゲート、機器の故障・動作等を表している。最終信号線のLikelihoodの値により系の動作成功確率等の解析の目標とする結果が得られる。

GO手法の特徴としては、GOチャートと対象とする系の構成との対応が明確である。そのため、GOチャートの作成が容易であり、再チェック、正当性の評価、修正も容易に実施できる。また、一つのGOチャートによりシステムの複数の状態も解析できる。さらに、フォールト・ツリーの最小切断集合(MCS: ミニマル・カット・セット)に対応したフォールト・セットも得られる。一方、GOチャートには故障モードが記述されない、フェーズド・ミッションのような時間依存性を取り扱うのが容易ではない等の弱点もある。

(6) ベトリ・ネット¹⁶⁾

離散事象システムのモデル化をグラフ的な方法で行い事象の連鎖を解析する手法である。システムの並行性、競合、相互排他、先行関係、非決定性等のモデル化が容易である。また、モデルから離散事象シミュレーションが駆動できる。これによりシステム全体の時間的な挙動、望ましくない性質をチェックする事ができる。主に分散処理システムの設計評価に使われているが、最近PSAへの応用も試みられてきた¹⁷⁾。

(7) ダイグラフ・マトリックス¹⁸⁾

大規模システム解析のため開発された手法で、フォールト・ツリーとベトリ・ネット解析に基礎を置くグラフ理論を結合したものである。この解析においてもシステム構成に対応したチャートを作成する。

(8) ダイナミック・イベント・ツリー¹⁹⁾

ダイナミック・イベント・ツリーはプラントのハードシステムの状態、プロセス変数、運転員の状態の時間的変化を取り扱える。このイベント・ツリーにおいては、異なった時刻における分岐が起こり得るようになっており、システム状態の全ての組み合わせを考えるため事故シーケンス数は膨大なものになってしまう。そのため、適当な近似が必要となる。この手法はすでに苛酷事故解析²⁰⁾において使用されているが、手法の完成までには今後の研究が必要である。

(9) ダイナミック・ゴール・ツリー²¹⁾

成功状態に着目してシステムの論理構造を表現し、フォールト・ツリーに似たツリーを作成する。まず頂上に成功目標を置き、これを順次機器レベルまで分解していく。このツリーに時間依存の論理を組み込むことによりシステムの動的な挙動が解析できる。

(10) 連続イベント・ツリー²²⁾

従来のイベント・ツリーでは、あらかじめ設定された時

刻、順番に事象の遷移・分岐が起こる。本手法では、物理的状態・機器状態・時間の相空間を考え、その中での軌跡において任意の時刻に遷移が起こり得るとした解析方法である。状態の記述、理論的基礎としては式による表現が多用されている。

(11) ディスクリート・イベント・シミュレーション²³⁾

動的システムをリスク評価において取り扱える手法である。モンテカルロ・シミュレーションを応用した方法で、次のDYLAMとは異なり全ての可能な事故シナリオをあらわには追跡していない。そのため、逆に膨大な数の事故シナリオを取り扱える。システムの状態変化は任意の時刻で起こり得るモデルとなっている。

(12) DYLAM^{24) 25)}

計算機シミュレーションによるプラントの決定論的モデルと機器信頼度の確率モデルを結合した解析手法である。時間経過に伴うシステムの動的な信頼性解析が実施できる。頂上条件として複数の設定が可能である。モデル化においては、まず機器の正常/故障状態等における物理量を与える式を作成する。次に系統の各分岐点における連続の式、配管に沿っての圧力損失の式等を求める。これら一群の式によりシステム全体の挙動が記述される。一方、各機器の状態の発生確率値を与え、初期状態から始め、設定時間間隔毎にシステムの状態を計算して行く。全ての可能な機器状態の組み合わせ、解析対象とする時間長について計算が終了するまで解析を行う。DYLAMは解析対象毎に特有のモデル化、解析手法が必要となる。また、物理的挙動のシミュレーションを実施しているため機器数が多くなると長大な計算時間を必要とする。

5. GO-FLOW手法開発の経緯

システム信頼性解析手法としてはフォールト・ツリー解析が広く用いられて来ている。著者らも、フォールト・ツリーを用いた各種解析²⁶⁾を実施してきたが、フォールト・ツリー解析では頂上事象としてシステムの特定の事象一つしか選定できない、フォールト・ツリー作成には解析者の熟練を必要とする、作成されたフォールト・ツリーに論理的な欠陥が無いことを確認するのが難しい、対象システムの変更に伴うフォールト・ツリーの修正が難しい等の問題点が出てきた。

これらの問題点を補う解析方法としてGO手法が有望であると考えられ、GO手法を原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系に適用して解析²⁷⁾を実施してみたが、なお問題点の残る事が判明した。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、まず動作要求時に正常に起動するかどうか問題となり、次に動作開始後時間経過とともに故障により動作が停止してしまう事が問題となる。システムの状態としてはOff→On→Offと推移する事象を取り扱う必要がある。この

推移はGO手法においては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回繰り返す必要があり手間がかかる。

そこで、GO手法を基本としてその特長を生かしたまま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²⁸⁾。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体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ことからGO-FLOW手法と呼ぶこととした。

6. GO-FLOW手法の概要

GO-FLOW手法の基本についての詳細は既に船舶技術研究所報告²⁹⁾に報告されているので、本節においては概要を述べる事とする。

GO-FLOW手法は成功確率を追うシステム信頼性解析手法であり、システム信頼度・アベイラビリティの評価が行える。解析対象とするシステムの構成、機能をモデル化するためGO-FLOWチャートと呼ばれる、信号線とオペレータから構成される図を作成する。オペレータの動作モード・故障に対して発生確率をデータとして与え、オペレータの定義に基づき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。

6.1 信号の意味

GO-FLOW手法における信号は、配管中の流れ、電流、情報、指令、時間経過量等を意味しており、GO手法における状態の変化(On-to-Off信号あるいはOff-to-On信号)とは異なる。信号が物理的な流れをあらわしている場合は、“信号の存在”とは“物理的な流れの存在”を意味する事になるが、GO-FLOWにおいては“物理的な流れの存在”を次の様に拡張して考える。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事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時に電流が流れることをも意味する。つまり“信号の存在”とは、GO-FLOWにおいては、実際に流体なり電流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意味している。

例えば、直列配管の途中の一ヶ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(弁を開けば流体は流れる能力を持っている)”と考え、下

流側においては“信号は存在しない(さらに下流にある弁を開いても流体は流れない)”と考える。

6.2 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付けられている。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す。タイム・ポイントの総数は、解析対象の動作モードを表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。

6.3 オペレータ機能概略

オペレータは基本的には、主入力信号S、副入力信号P、出力信号Rの三種類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(タイプ22)、ANDゲート(タイプ30)等の論理ゲートは主入力信号と出力信号のみを持っている様に、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 $R(t)$ のみに影響する。
- (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 以降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。

現在までに図-3に示す14種類の標準オペレータが定義されている。表-1に、これら標準オペレータの機能の定義式を示す。表中で使用されている記号は以下の意味を持っている。

- $R(t)$: 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_x : 機器が正常に動作する確率

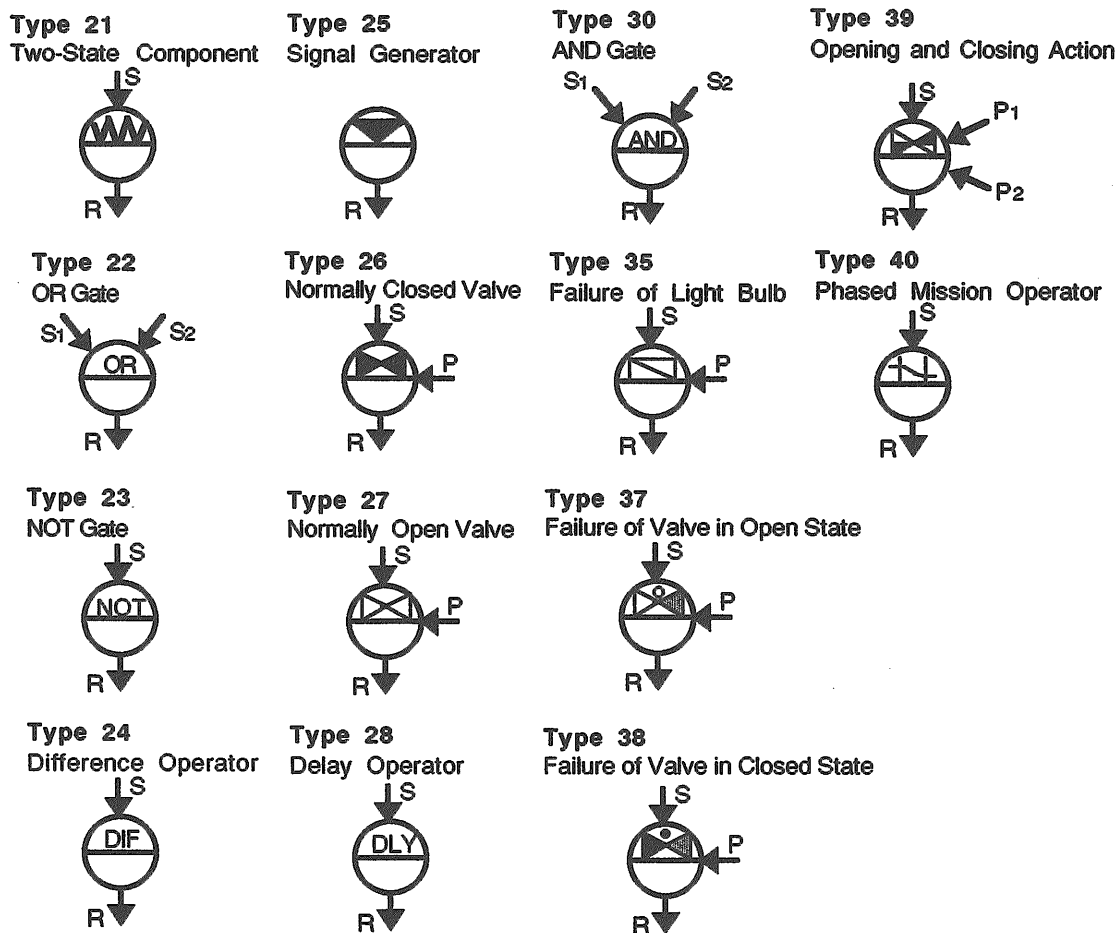


図-3 GO-FLOW手法における標準オペレータ

表- I GO-FLOWオペレータの機能定義表

Operator Type	Main Input Signal Intensity	Subinput 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
25	---	---	Probability of a demand or time duration
26	$S(t)$	$P(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t), \quad O(t_1) = P_p,$ $O(t) = O(t') + [1.0 - O(t')] \cdot P(t) \cdot P_g$
27	$S(t)$	$P(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t), \quad O(t_1) = 1.0 - P_p,$ $O(t) = O(t') \cdot [1.0 - P(t) \cdot P_g]$
30	$S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$	---	Probability that all the input signals exist
35	$S(t_1), S(t_2), \dots, S(t)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots, P_2(t_n)$...	$R(t) = S(t) \cdot \exp \left\{ -\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \min [1.0, S(t_k) / S(t)] \right\}$
37	$S(t)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots, P_2(t_n)$...	$R(t) = S(t) \cdot \exp \left[-\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \right]$
38	$S(t)$	$P_1(t_1), \dots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \dots, P_2(t_n)$	$R(t) = S(t) \cdot \left\{ 1.0 - \exp \left[-\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \right] \right\}$
39	$S(t)$	$P_1(t)$ $P_2(t)$	$R(t) = S(t) \cdot O(t),$ $O(t) = O(t') + [1.0 - O(t')] \cdot P_1(t) \cdot P,$ $R(t) = S(t) \cdot O(t), \quad O(t) = O(t') \cdot [1.0 - P_2(t) \cdot P_c]$
40	$S(t)$	---	$R(t) = 1.0 \quad (t < t_1)$ $R(t) = S(t) \quad (t_1 \leq t \leq t_2)$ $R(t) = S(t_2) \quad (t > t_2)$

P_p = probability for premature operation

P_g = probability for successful operation

t' = time point immediately before the time point t

P_o = probability for valve successfully open

P_c = probability for valve successfully close.

$O(t)$ = probability for valve in open state

- P_i : 機器が動作失敗する確率
 λ : 機器の故障率
 P_p : 機器が早まって動作する確率
 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

また、タイプ35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。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。ある時刻 t において機器が故障状態にある確率は t 以前における全ての主入力信号 S の関数となる。これは、上記オペレータ機能の三原則の例外となっている。

6.4 信号の強度

信号線には“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。

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すために用いられているため、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。

6.5 解析手順

解析の手順は、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）の全ての時刻（タイム・ポイント）における強度が求まる。

6.6 サンプル問題による解析手順の理解

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説明しよう。サンプル問題としては図-4に示す簡単な電気回路を取り上げる。この

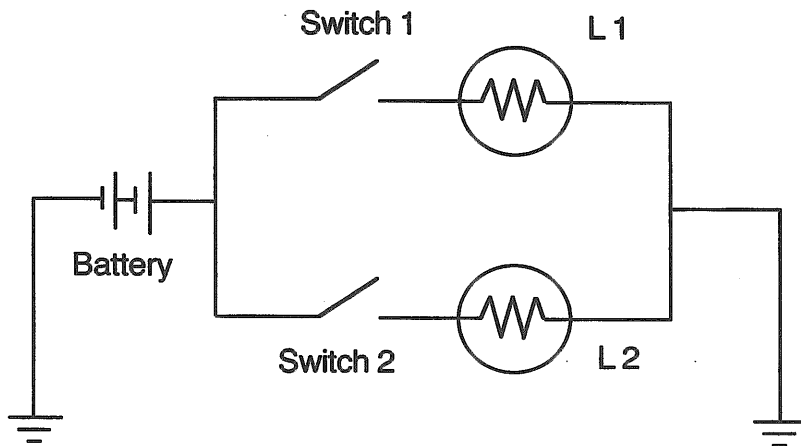


図-4 サンプル問題

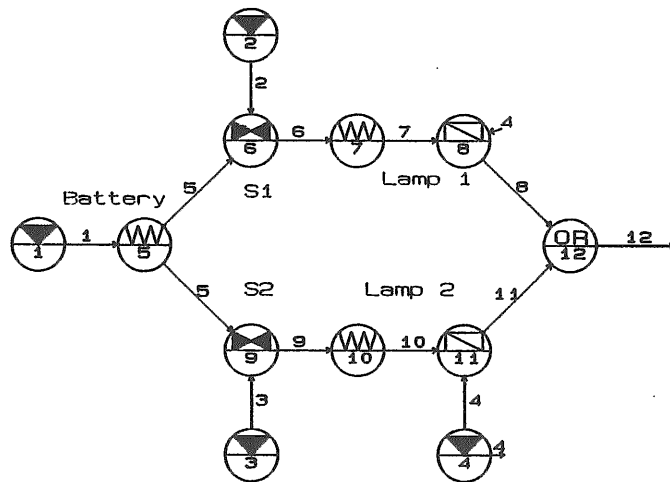


図-5 サンプル問題のGO-FLOWチャート

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、さらにスイッチ2が閉じられるとする。ここで求める事柄は各時刻において少なくとも1つのランプが点灯している確率である。なお、ランプの点灯中の故障も考慮することとする。

図-4の電気回路をGO-FLOWチャートに表現すると図-5の様になる。図中オペレータ記号の中に記した番号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線番号である。図-4と図-5の比較から推測がつく様に、5番のオペレータはバッテリー、6、9番はスイッチ1、2を、7、10番はランプを表している。8、11番はランプの点灯中の故障をモデル化している。12番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、バッテリーの接続、スイッチ1、2を閉じる指令を発するための信号発生器である。オペレータ4番は時間経過量を与える信号を出しており、タイプ35オペレータの副入力信号となっている。

タイム・ポイントは表-IIの様定義する。タイム・ポイント2、3及び4、5は実時間においてはそれぞれ同一の時刻に対応している。タイム・ポイント2は電源を接続した時点を表し、タイム・ポイント3はその直後にスイッチ1を閉じた状態を調べるため設定されている。同様に、タイム・ポイント4、5はスイッチ1を閉じてから10時間後の状態とともにスイッチ2を閉じた状態を調べるため同一時刻に対して2個のタイム・ポイントを設定してある。

各信号線の意味を表-IIIに示す。表-IVには各オペレー

表-II タイム・ポイントの定義 (サンプル問題)

タイム・ポイント	意味
1	初期状態の時刻
2	バッテリー接続 (2、3は同一時刻)
3	スイッチ1を閉じる
4	10時間後 (4、5は同一時刻)
5	スイッチ2を閉じる
6	20時間後

表-III 各信号線の意味 (サンプル問題)

信号線	意味
1	バッテリーの接続
2	スイッチ1の閉指令
3	スイッチ2の閉指令
4	時間経過量
5	バッテリーが十分な電力を両方の系統に供給
6	ランプ1に電力が供給
7	ランプ1点灯 (点灯中の故障を考慮しない場合)
8	ランプ1点灯
9	ランプ2に電力が供給
10	ランプ2点灯 (点灯中の故障を考慮しない場合)
11	ランプ2点灯
12	ランプ1か2、あるいは両方点灯 (最終信号線)

表-IV オペレータの意味、データ (サンプル問題)

オペレータ		意味	データ
番号	タイプ		
1	25	バッテリーの接続信号発生	$R(1)=0.0, R(2)\sim R(6)=1.0$
2	25	スイッチ1閉指令発生	$R(2)=1.0, \text{その他}=0.0$
3	25	スイッチ2閉指令発生	$R(5)=1.0, \text{その他}=0.0$
4	25	時間経過量生成	$R(4)=10.0, R(6)=10.0, \text{その他}=0.0$
5	21	バッテリーの機能正常	$P_g=0.9$
6	26	スイッチ1の正常動作確率	$P_p=0.1, P_g=0.7$
7	21	ランプ1の点灯時の正常確率	$P_g=0.8$
8	35	ランプ1の点灯中の故障発生	$\lambda=0.001/h$
9	26	スイッチ2の正常動作確率	$P_p=0.1, P_g=0.7$
10	21	ランプ2の点灯時の正常確率	$P_g=0.8$
11	35	ランプ2の点灯中の故障発生	$\lambda=0.001/h$
12	22	ORゲート	なし

タに与えたデータを示す。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と与える。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な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1の閉指令で、オペレータ3の出力信号はスイッチ2の閉指令である。オペレータ4の出

力信号は時間経過量を表し、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。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、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1000時間を仮定し、オペレータ8

と11の故障率データとして0.001/時間を与えた。

以上の解析条件に対応した計算プログラムの入力データは図-6に示すようになる。

第1行目は表題、第2行目から13行目まではオペレータの定義、接続関係の記述である。例えば、7行目(6 26 1 6 1 5 1 2)は第6番目のオペレータはタイプ26であり、その種類(Kind:故障データを参照するために定める)は1、出力信号線番号は6番、主入力信号線の数1個で5番、副入力信号線の数1個で2番とすることを意味している。13行目の(12 22 0 12 2 8 11)では、第12番目のオペレータはタイプ22(ORゲート)で、故障データを必要としないため種類(Kind)には0が与えられている。出力信号線番号は12番、主入力

信号線の数2個で8番と11番であることを意味している。その次の行の 0 はオペレータに関する入力終了したことを示す区切り情報である。

次の4行は故障データ等に関する入力である。例えば、(21 1 0.8 0 0)はタイプ21オペレータの種類1には正常動作確率 $P_e=0.8$ を割り当てる事を意味している。(26 1 0.1 0.7 0)ではタイプ26オペレータの種類1に、事前開確率 $P_p=0.1$ 、正常動作確率 $P_e=0.7$ を割り当てる。

区切り情報0の後に、タイム・ポイント数6、各々のタイム・ポイントの意味に関するデータが並び、その次に信号線強度のデータが並ぶ。タイプ25の信号発生器の出力信号線の強度は事前に解析条件として与えて置く。例えば、

標題									
SAMPLE	PROBLEM	出力信号線番号							
1	25	0	1						
2	25	0	2						
オペレータ番号	3	25	0	3					
	4	25	0	4					
	5	21	2	5	1	1	主入力線番号		
	6	26	1	6	1	5	1	2	副入力線番号
オペレータ・タイプ	7	21	1	7	1	6			
	8	35	1	8	1	7	1	4	
	9	26	1	9	1	5	1	3	
	10	21	1	10	1	9			
	11	35	1	11	1	10	1	4	
	12	22	0	12	2	8	11	オペレータ情報終了の区切り	
0									
	21	1			0.8		0	0	故障データ
	21	2			0.9		0	0	
オペレータ・タイプ	26	1			0.1		0.7	0	
	35	1			0.001		0	0	
0									
区切り情報									
	6	オペレータ種類番号							
タイム・ポイント数	1	Initial Time.							
	2	The Battery is connected.							
	3	Switch S1 is demanded to close.							
	4	10h after time point 3.							
	5	Switch S2 is demanded to close.							
	6	10h after time point 5.							
タイム・ポイントの定義									
信号線番号	1	信号線強度							
	1	0.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	
	2	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
	3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
	4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+01	0.000E+00	1.000E+01	0.000E+00	
0									
区切り情報									
最終信号線番号									

図-6 GO-FLOW解析入力データ (サンプル問題)

1 番の信号線はタイム・ポイント 1 において強度 0.0 で、タイム・ポイント 2 以降 6 まで、強度 1.0 となっている。

区切り情報 0 の後に、解析において着目する最終信号線番号が与えられる。複数個の指定が可能であるが、今の場合 12 番のみが指定されている。

図-7 に解析手順を示したプログラムの出力を示す。各信号線の強度が、各タイム・ポイント毎に記された表の形式となっている。

解析結果である信号線 12 番の強度の意味は次の様になる。ランプ 1 か 2 の少なくともいずれかが点灯している確率は、電源接続前 (タイム・ポイント 1) には 0.0 である。電源接続時 (タイム・ポイント 2) には 0.13824 である。これはスイッチ 1 及びスイッチ 2 の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うからである。スイッチ 1 の閉指令が出された時 (タイム・ポイント 3) 0.555552 の確率で少なくとも 1 個のランプが点灯している。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 0.5504383 へと減少する。スイッチ 2 の閉指令が出された時点 (タイム・ポイント 5) では、0.7417704 の確率で少なくとも 1 個のランプが点灯している。さらにその 10 時間後 (タイム・ポイント 6) には点灯している確率は

0.7373795 へと減少する。

6.7 信号線間の従属性の取り扱い

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、ORゲートで結合される場合は、分岐した信号線の情報 (番号および強度) をそれぞれの系統の下流に位置するオペレータの出力信号線に付加しておく必要がある。これにより、それぞれの信号相互間の存在確率の従属性を正しく扱うことができる。

例えば AND/ORゲートの入力信号線が 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、次の式でそれぞれの出力信号強度を求める必要がある。

$$\begin{aligned} \text{ANDゲート} & : I(C) \times [I(A) / I(C)] \times [I(B) / I(C)] \\ \text{ORゲート} & : I(C) \times \{I(A) / I(C) + I(B) / I(C) \\ & \quad - [I(A) / I(C)] \times [I(B) / I(C)]\} \end{aligned}$$

ここで、I(A) は信号 A の強度を表している。

上記のサンプル問題における信号線 5 番は分岐して 6 番と 9 番のオペレータの入力信号となっており、この場合に当てはまる。それ故、図-7 の解析手順の出力表においては SHARED SIGNAL (共有信号線) として信号線 5 番の情報が以降の信号線に与えられており、12 番の信号線強度を

===== RESULTS OF THE ANALYSIS =====

-----<< SIGNAL INTENSITIES AT ALL TIME POINTS >>-----

SIGNAL NUMBER	INCLUDED SHARED SIGNAL	TIME POINTS					
		1	2	3	4	5	6
1	-	.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
2	-	.0000000	.0000000	1.0000000	.0000000	.0000000	.0000000
3	-	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	1.0000000	.0000000
4	-	.0000000	.0000000	.0000000	10.0000000	.0000000	10.0000000
5	5,	.0000000	.9000000	.9000000	.9000000	.9000000	.9000000
6	5,	.0000000	.0900000	.6570000	.6570000	.6570000	.6570000
7	5,	.0000000	.0720000	.5256000	.5256000	.5256000	.5256000
8	5,	.0000000	.0720000	.5256000	.5203702	.5203702	.5151924
9	5,	.0000000	.0900000	.0900000	.0900000	.6570000	.6570000
10	5,	.0000000	.0720000	.0720000	.0720000	.5256000	.5256000
11	5,	.0000000	.0720000	.0720000	.0712836	.5248805	.5196579
12	5,	.0000000	.1382400	.5555520	.5504383	.7417704	.7373795

図-7 解析結果の出力リスト (計算手順部分)

計算する際、上式の取り扱いが行われている。

なお、タイプ35、37、38の副入力信号は時間経過量を表しており、時間経過は全てのオペレータにとり、暗のうちに1.0の確率で存在していると考えられるので、この様な取り扱いは不要となる。

7. GO-FLOW解析支援システム³⁰⁾

前節で示した様にGO-FLOW解析は、解析対象をGO-FLOWチャートへモデル化できれば、後は解析プログラムを実行するだけである。しかし、解析対象とするシステムの規模が大きくなると、GO-FLOWチャートの作成、解析のための入力データの作成、解析結果の解釈、解析結果の図・表形式での表示、整理等に多大な労力が必要となってくる。そこで、これらの作業を支援するシステムをパーソナル・コンピュータを中心として構築し、実用性・使用性に優れたシステム信頼性解析方法としての体系を作成する開発研究を原子力試験研究費により平成元年度より実施した。

本解析支援システムは、図-8に示す様にPC-98上に構築された種々のプログラム群よりなり、大容量メモリー、高速演算を必要とするGO-FLOW解析本体の計算はメイン・フレームで行い、メイン・フレームとPCとはイーサ・ネットで接続されている。

GO-FLOWチャートはCRT画面上でGO-FLOWチャート・エディターの支援により解析者が作成する。作成されたチャートはハード・コピーあるいはプロッターによる作画が可能である。また、記憶装置に図面に関するデータ・ファイルが保存しておける。GO-FLOWチャートからメイン・フレームによる解析のための入力データが自動生成され、イーサ・ネットを通じて中央計算機へ転送される。GO-FLOW解析プログラムはPCからの指令により中央計算機において起動させられる。解析結果はライン・プリンターによる出力の他に、再びイーサ・ネットを通じてPC側へ転送され、解析結果総合表示プログラムによりレーザー・プリンターから報告書の図表として使用可能な品質のものを得ることができる。

この構成により、GO-FLOWチャートの作成から解析結果の整理に至るまでの一連の解析が机上の1台のパソコンを操作するだけで実施でき、Living PSA³¹⁾を実施する際の有力な解析ツールとして本解析支援システムが活用できる様になった。

さらに、従来からの基本解析機能に加えて、共通原因故障解析機能、不確実さ解析機能、共通原因故障を考慮した不確実さ解析機能の整備も併せて実施した。

7.1 GO-FLOWチャート・エディター

本エディターはPC98上で動作するプログラムでC言語に

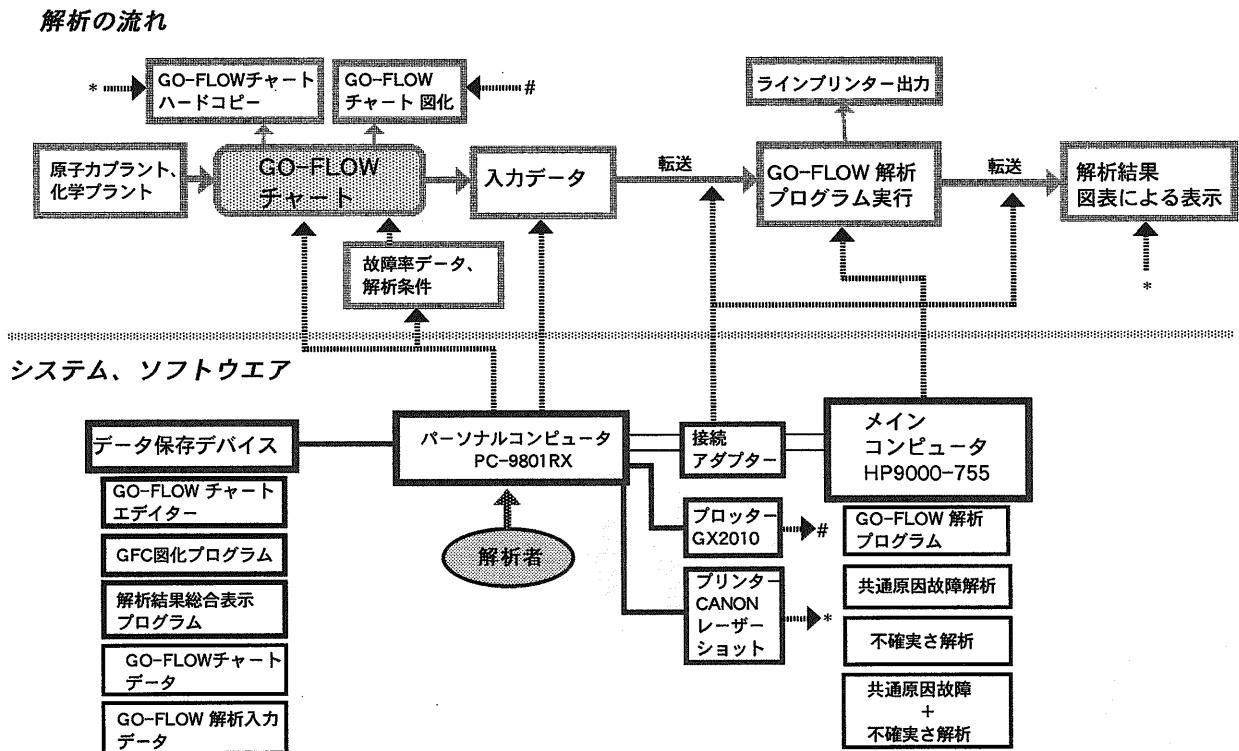


図-8 GO-FLOW解析支援システムの体系

より記述されている。オペレータ及びそれらを結ぶ信号線をメニュー画面に従いマウスの右・左クリックにより次々と作画していく方式となっている。チャート作成時に、各オペレータの故障率データ、タイム・ポイントの定義、コメント等を入力していく事ができる。更にチャート作成が終了した時点で、GO-FLOW解析（中央計算機、ワークステーション等で実施）のための入力データの自動生成が行える。また、チャート・データは次のGO-FLOWチャート図化プログラムのデータとしても用いられる。

図-9にCRT画面の表示例を示す。画面はカラー表示であり、大、小、2つのウィンドウ、右上のメニュー表示部、チャート・データを保存するファイル名（この図の場合 "SAMPLE2.DAT"）、及びタイトル名 ("SAMPLE PROBLEM-2 FROM CADGFC DATA") の表示部より成り立っている。アクティブ・ウィンドウの設定はマウスの左クリックにより行い、枠を明るい黄色とすることにより識別する。チャートに対する作成・編集はアクティブ・ウィンドウ内のみで可能である。

図-10にメニュー表示の詳細を示す。メニューはプルダウン方式となっており、マウスでメニュー項目をクリックする事により順次サブメニューが現れる。以下メニューに沿って、開発したGO-FLOWチャート・エディターの機能

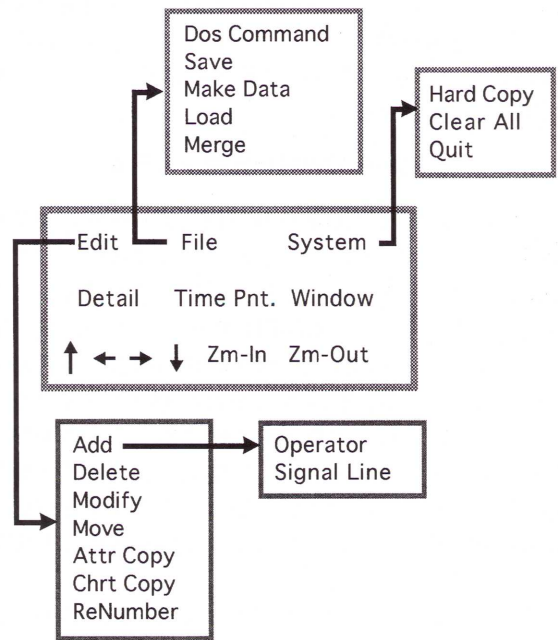


図-10 チャート・エディターのメニュー

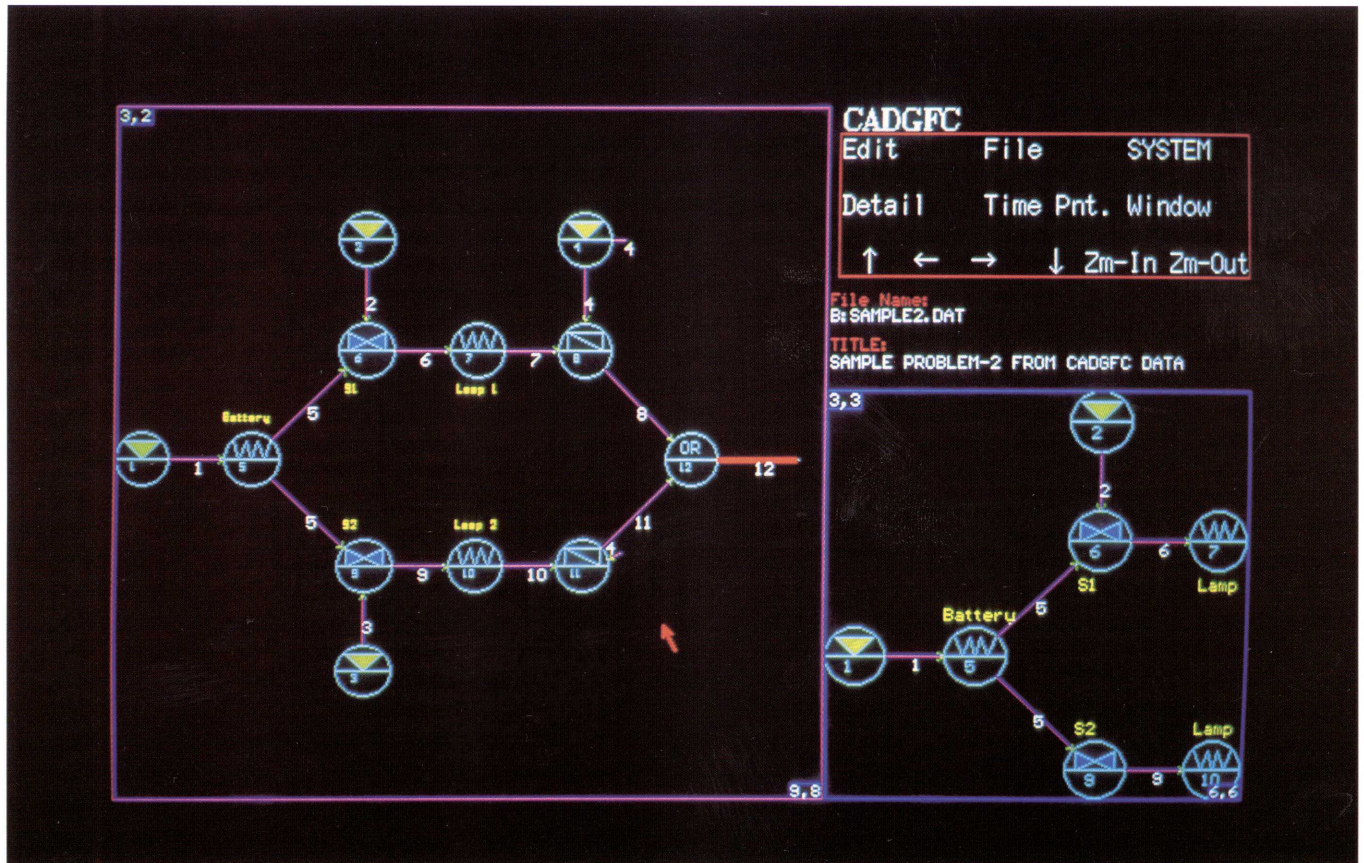


図-9 GO-FLOWチャート・エディターのCRT画面

の説明を行う。

"Edit"モードにおいてオペレータ・信号線の書き込み・修正・消去を行う。

"Add"→ "Operator"においてオペレーターを画面内の空き場所に設置する。

"Signal Line"により任意の2つのオペレーター間に信号線を引く。

"Delete"によりオペレータ、信号線の消去が行われる。

"Modify"において、オペレータ・タイプ、故障率/動作確率データ、機器名、コメント等の定義・修正を行う。更に、信号線の方向、属性(主入力/副入力の区別、最終信号線)、信号線強度の設定も行える。

"Move"によりオペレータを別の位置に移動させる。また、信号線の接続先を変更することもできる。

"Attr Copy"コマンドにおいてオペレータ・タイプ、故障率データ、コメント等のオペレータ属性を一括して他のオペレータへ複写できる。これにより、類似の機器が多数存在するシステムのチャート作成の作業効率が向上する。

"Chrt Copy"コマンドにより、チャート内の一部分あるいは全部を同一チャート内の他の場所へ一括複写することができる。この機能により、冗長系の様な類似のサブ・システムが複数存在する場合のチャート作成が容易となる。

"ReNumber"コマンド。チャート修正時にオペレータ・信号線の追加・挿入を行っていくと番号の割付が乱れたものになってしまう。これを直すために、オペレータ・信号線の接続順に番号を振り直す機能を与えた。その際、あらかじめ指定したオペレータ(複数個も可能)については、その番号を保持することもできる。これにより、基準となる特定の番号については番号再割り付けの時にも不変となるようにできる。複写機能を実施した場合は、重複した番号が発生しない様に自動的に番号再割り付けを行う。

"File"モードにより、作成されたGO-FLOWチャートの保存、読み出し等ファイル作業に関する事を行う。

"DOS Command"によりMS-DOSのコマンドが実行できる。

"Save"コマンドによりチャート・データをファイルに保存する。その時、ファイル名を問いかけてくるので、キー入力する(修正・上書きのときはファイル名を確認してくる)。ファイル名は*.GCDと拡張子を付けておく。

"Make Data"により作成されたチャートからGO-FLOW解析プログラムのための入力データの自動生成を行い、ファイルに書き出す。そのとき、作成するファイル名を問いかけてくるので、キー入力を行う。ファイル名は*.ACDと拡張子を付けておく。

この機能により、第6章サンプル問題で示した、解析プログラムのためのデータ入力フォーマットを意識することなくGO-FLOW解析が実施できるようになった。

"Load"により既に作成されているチャート・データを読み込む。

"Merge"コマンドにより、作成中のGO-FLOWチャートに既に作成保存済みのチャートデータを結合する事が出来る。これにより、大規模システムをいくつかのサブ・システムに分解し、検討・解析を行い、その後に全てのサブ・システムを結合した全システムの解析を行う事ができる。

"System"で動作をシステム側にもどし、ハード・コピー出力、プログラム終了等が行える。

"Detail"において指定したオペレータや信号線についての各種詳細情報及び置かれた座標位置が表示される。

"Time Pnt."において、タイム・ポイント数、各タイム・ポイントの意味についてのコメントを入力する。

"Window"により、アクティブ・ウインドウの表示領域を決める。これは、画面の左上と右下位置の座標値を与えることにより指定する。

"↑←→↑"により、アクティブ・ウインドウの表示領域を矢印方向に移動する。

"Zm-In Zm-Out"により、画面の拡大、縮小を行う。拡大、縮小率は200倍程度まで可能である。

なお、オペレータや信号線の属性情報の定義・変更等を行う際には、メニューとは異なるダイアログ・ボックスが表示され、選択項目の選択あるいは入力フィールド内へのキー入力を行なう方式となっている。

また、動作環境の諸元は以下の様である。

○PC9801シリーズのパソコンでCPUが80286または80386。

○RAM640Kバイト以上実装。

○バスマウス。

○640x400ドット表示のディスプレイ。

○数値演算プロセッサ。

○MS-DOS Ver.3.1以上。

○環境設定ファイル"CONFIG.SYS"内にプリンター・ドライバー、マウス・ドライバー、RS-232Cドライバーを組み込んで置く。

7.2 GO-FLOWチャート図化プログラム

GO-FLOWチャート・エディターで作成したチャートをペンプロッターで作図するプログラムの開発を行った。このプログラムはGO-FLOWチャート・エディターと一体化されており、チャート・エディター終了後すぐに起動することができ、パソコンと接続されたプロッターによる作図が行える。

初期画面はGO-FLOWチャート・エディターと類似で大小2つのウインドウ及び図-11に示すメニュー部分を持っている。

"Load"によりチャート・エディターで作成されたGO-

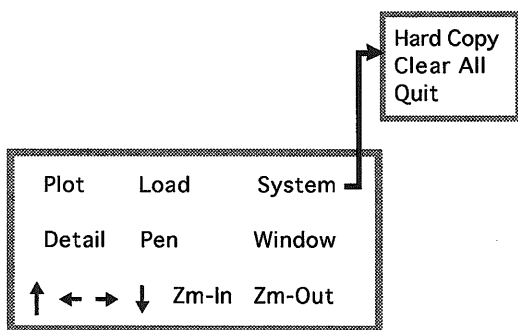


図-11 チャート図化プログラムのメニュー

FLOWチャートのデータを読み込むとパソコン画面上にチャートが表示される。

"Pen"によりペンの種類を選択する。オペレータの円、記号、番号、信号線、最終信号線、信号線番号、オペレータ脇のコメント毎に別々のペンを割り当てる事ができる。プロッター本体のペン置きにどのような色、太さのペンを置くかはユーザーの選択となる。

"Plot"コマンドにおいては、ダイアログ・ボックスが表示され、用紙サイズ、プロットモード、属性の三項目について選択を行う。

用紙サイズではA0からA4までの選択が可能であるが、プロッター側の制約も考慮する必要がある。

プロット・モードには自動スケールと固定スケールがある。自動スケールでは選択された用紙サイズ内にチャート全体が収まるように自動的にスケーリングを行う。固定スケールではオペレータの直径を10mmとして作画する。そのため、用紙サイズに応じた赤枠が表示されるのでマウスを用いて領域を指定する。

属性においては、オペレータが持つ故障率データ、番号付け換えの可否を図中に書き込むか否かの選択を行う。

以上のダイアログ・ボックスの選択を終え、リターン・キーを押すと、すぐに作画が始まる。

プロッターは現在の所、グラフテック社のGX2110Rを用いており、シート紙の場合最大A1サイズまで、ロール紙の場合最大A1サイズ5枚分の連続作画が出来る。HP-GLコマンドを用いた作画方法を取っている。図-12に、本システムによる作画例を示す。

8. フェイズド・ミッション問題

フェイズド・ミッション問題⁵⁾とは、時間経過と共にシステムに要求される機能が順次変化していく場合におけるシステムの機能成功確率を評価することである。システムに要求される機能によって経過時間がいくつかのフェイズに区切られるためフェイズド・ミッション問題と言われる。フェイズにより要求される機能が変化するため、使用される機器も異なってくるが、複数のフェイズにまたがって共通に使用される機器もあれば、特定のフェイズにおい

ただけ使用される機器もある。それ故、各フェイズにおける機能成功確率間の従属性が複雑な形で存在する事となる。更に、あるフェイズにおけるシステムの機能成功とは先行する全てのフェイズにおいて機能が成功していることが条件となっている。

8.1 タイプ40オペレータ³²⁾

先行している全てのフェイズの機能成功が条件と云う事は、異なったフェイズにおける成功確率間の積を計算する必要がある事になる。それぞれが互いに独立事象であれば、単純に数値の積で良い。しかし、上に述べた理由により互いの従属性を考慮した積を計算する必要がある。つまり、それぞれのフェイズにおける成功確率は種々の機器類の動作成功確率の積・和によって構成されているので、同一の機器が複数のフェイズに含まれている場合それらの包含関係を正しく取り扱わなくてはならない。

GO-FLOW手法では、第6章に示した様に同一タイム・ポイント内では信号線間の従属性を正しく処理できる様になっている。しかし、フェイズド・ミッション問題では異なったフェイズ間の積をとる必要がある。つまり、異なったタイム・ポイント間の信号線の積を求める必要がある。

そこで、図-13に示す機能を持ったタイプ40オペレータを導入した。図において点線が入力信号線の強度で、実線が出力信号線の強度である。タイム・ポイント t_i で指定された特定の時刻以前においては出力信号線強度は入力信号線の強度に拘らず1.0となる。一方、時刻 t_j 以降は信号線強度は t_j の時の値が凍結されて保持される。着目するフェイズにおける機能成功確率を表現する信号線を入力信号線としたタイプ40オペレータの出力信号線を考えて見る。タイプ40オペレータにより変換された各フェイズの信号線間の積をとると、フェイズ間の積が正しく得られる。つまり、特定のタイム・ポイントに着目して考えると、過去のフェイズとなった信号線はフェイズ終了時の機能成功確率値を持っており、現在のフェイズの信号線はまさに変化しつつある機能成功確率値を、未だ機能要求されていない信号線は確率1.0の値を持っている。

このようにして、同一のタイム・ポイント間の積をとるという従来のGO-FLOW手法の枠組みでフェイズ間の積を求めることができる。

しかし、タイプ40オペレータの入力信号線が、より上流の信号線の積/和（種々の機器類の動作成功確率の積・和）により構成されている場合このオペレータの出力信号線を構成する信号線の番号をそのままにしておくと矛盾が出てくる。つまり、同一の信号線に2種類の信号線強度（確率値）が割り当てられてしまう。そこで、タイプ40オペレータの出力信号線においては構成信号線の番号を新たに付け直す様にプログラムされている。

その結果、異なった信号線間でも従属関係が存在する場合がでてくる。その従属性を判定するため、元となった信号線番号を情報として保持させている。

同一の信号線から作られた信号線を A' 、 A'' とすると、

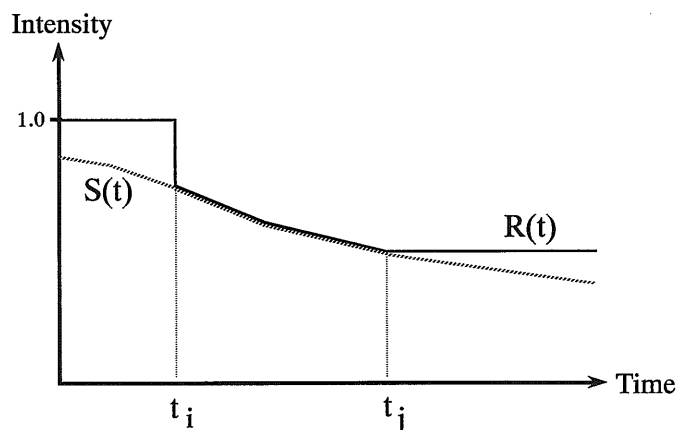


図-13 タイプ40オペレータの機能

それらの間におけるブール代数式は以下の様になる。

$$A' + A'' = A' ; P(A') > P(A'') \dots\dots\dots (1)$$

$$A' \times A'' = A'' ; P(A') > P(A'') \dots\dots\dots (2)$$

ここでP(A')は信号A'の強度を意味している。

8.2 解析実施例

具体的な例として沸騰水型原子炉の非常用冷却系を多少変更したサンプル・システム³³⁾を取り上げてみる。システムの構成は図-14の様になっており、高圧炉心スプレイ系(HPCS)、低圧炉心スプレイ系(LPCS)、低圧炉心注入系(LPCI)2系統、自動減圧系(ADS)、圧力逃がし弁(RV)、熱交換器(Hx)2基等が備えられている。非常用炉心冷却系は冷却水喪失事故(LOCA)が発生した時、炉心から速やかに除熱し、更に炉が安全に冷却するまで冷却水を循環し続ける必要がある。

LOCA発生後に要求される冷却機能により次の3つのフェイズが同定されている。

1. 初期炉心冷却 (0.0~0.5時間)
HPCS OR LPCS*ADS
2. サプレッション・プール冷却 (0.5~36.5時間)
(ADS OR RV)
* (LPCI-A*Hx-A OR LPCI-B*Hx-B)
* (HPCS OR LPCS)

3. 崩壊熱除去 (36.5~120.5時間)

$$LPCI-A*Hx-A \text{ OR } LPCI-B*Hx-B$$

フェイズ1においては、HPCSが作動するか、あるいはADSとLPCSの作動が要求される。

フェイズ2においてはまずADSかRVが圧力増加を防ぐために必要とされ、熱交換器1基と対応する低圧注入系LPCIが除熱のため必要となる。更に、HPCSかLPCSのどれかの最低一系統がサプレッション・プールの冷却水を炉心へ循環させるために必要となる。

フェイズ3においては、配管の破断部分は修理あるいは隔離されLOCAは収束されたと仮定する。崩壊熱除去のため熱交換器1基と対応するLPCIが必要となる。これらの機器の使用状況をまとめたのが図-15である。図中○印は機器の運転開始(起動)を必要とすることを意味する。従って○印のない直線は、特に起動動作を必要とせずに使用できる機器を意味している。なお、フェイズ間の移行は瞬時になされるものとする。

この系をGO-FLOWチャートにモデル化すると図-16の様になる。主要な機器、サブ・システムの名称がオペレータの脇に記されている。信号線番号18、33、36がそれぞれ他のフェイズの成否を考慮しない時のフェイズ1、2、3の機能成功確率を表している。それらの信号線をタイプ40オペレータにより39、40、41番の信号線に変換し、ANDオペレータの入力とし積を求める。最終信号線42の信号線強度を求めることによりフェイズド・ミッション問題が解ける。

表-Vにタイム・ポイントの定義を与える。各オペレータに与えたデータ、意味を表-VIに示す。信号線7、8は時間経過量を与えるために定義され、タイプ35、37オペレータの副入力信号となっている。

以上の条件を記述した入力データは図-17の様になる。

図-18は解析結果の出力リストのうちの信号線算出過程の部分である。この例では同一の信号線が分岐し複数のオペレータの入力信号となり、後に再びAND/ORにより結合される例が多数ある。例えば、17番のANDオペレータは14番と16番が入力信号になっているが、出力信号を構成する信号線情報を"INCLUDED SHARED SIGNAL"として保持している。18番のORオペレータでは数値計算を実行

表-V タイム・ポイント (フェイズド・ミッション問題)

タイム・ポイント	実時間 (h)	意味
1		初期時刻
2	0	フェイズ1開始
3	0.5	フェイズ1終了時
4	0.5	フェイズ2開始
5	5.5	フェイズ2の途中
6	36.5	フェイズ2終了時
7	36.5	フェイズ3開始
8	120.5	フェイズ3終了時

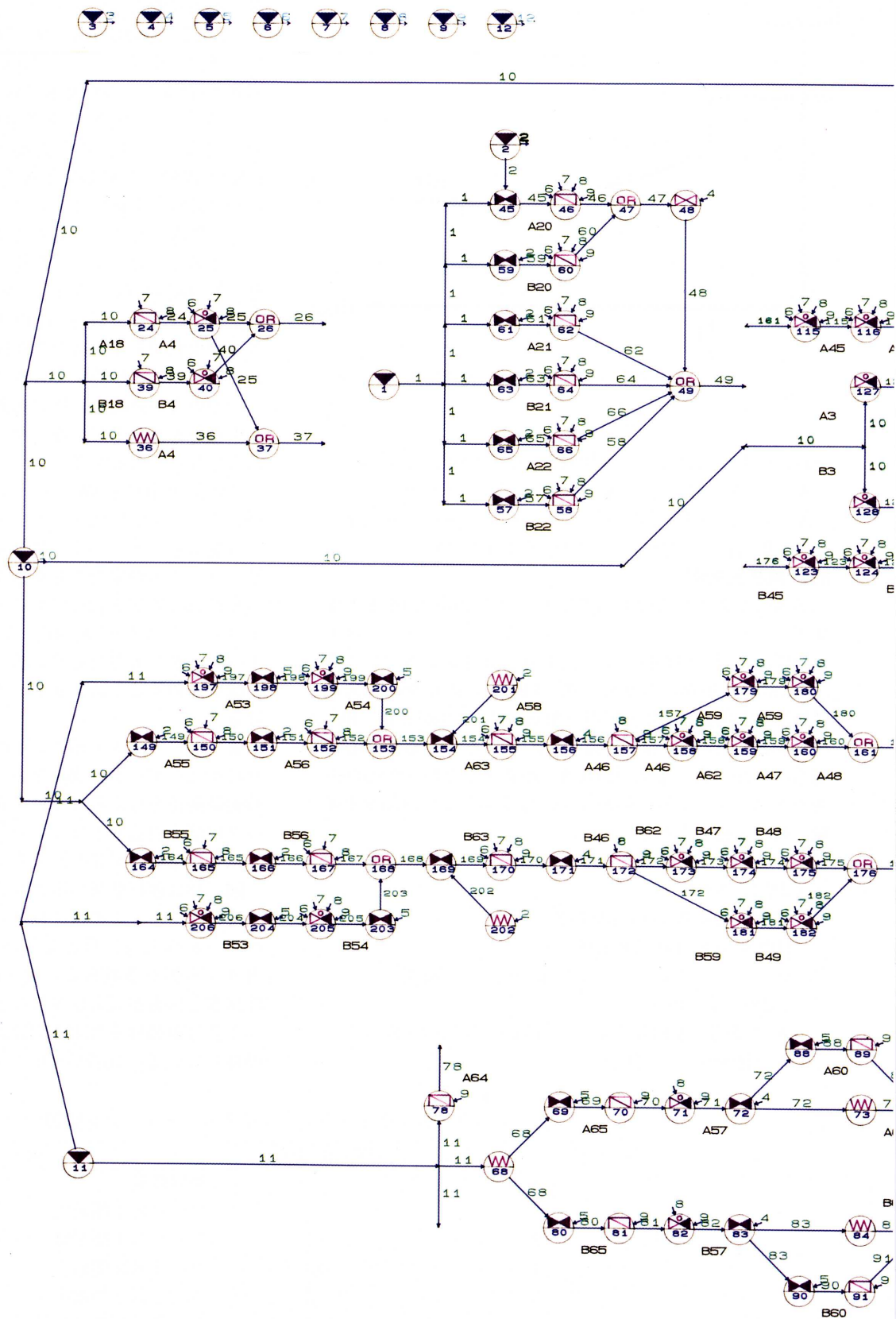
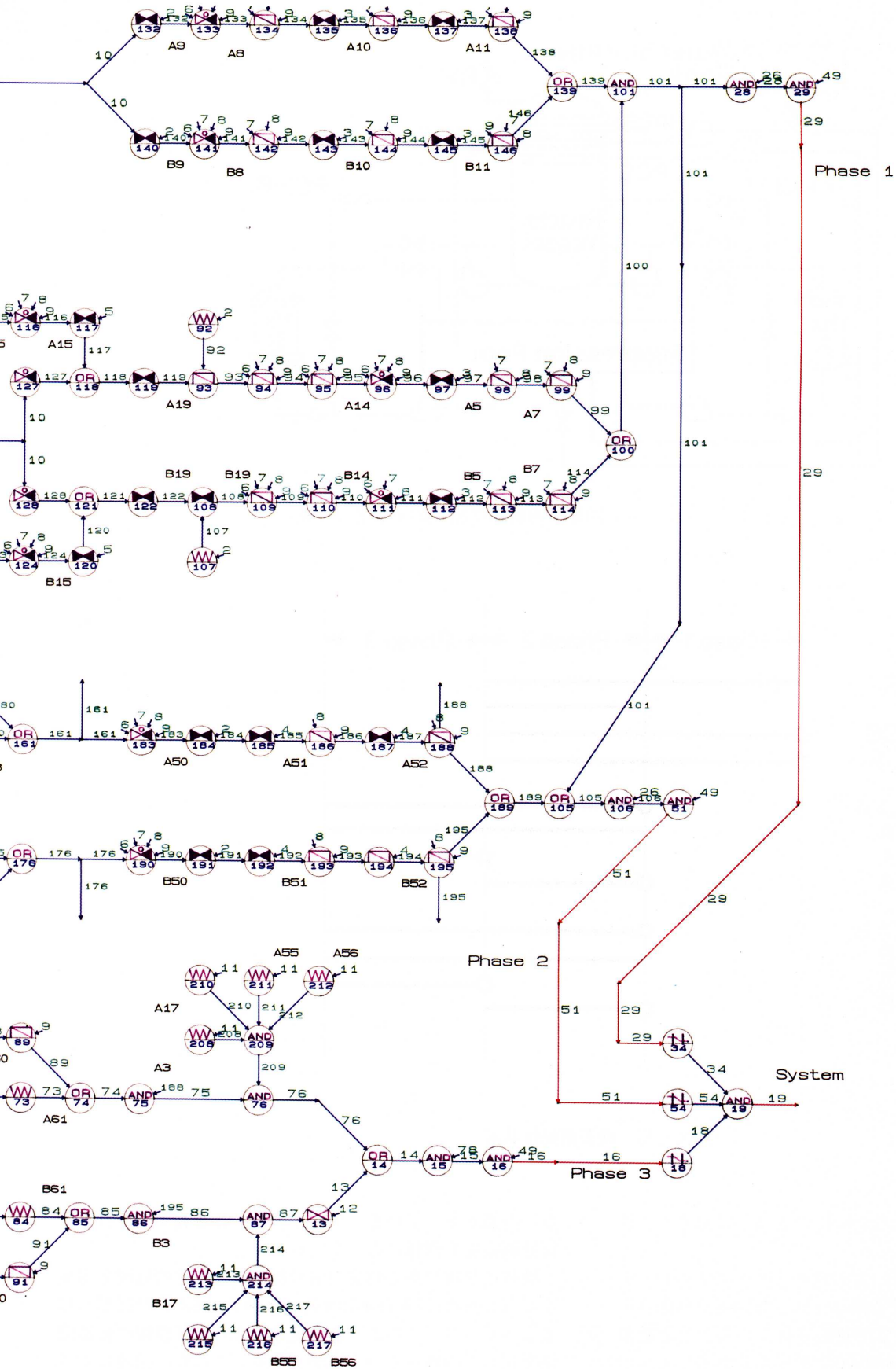


図-12 チャート図化プログラムによる作図例



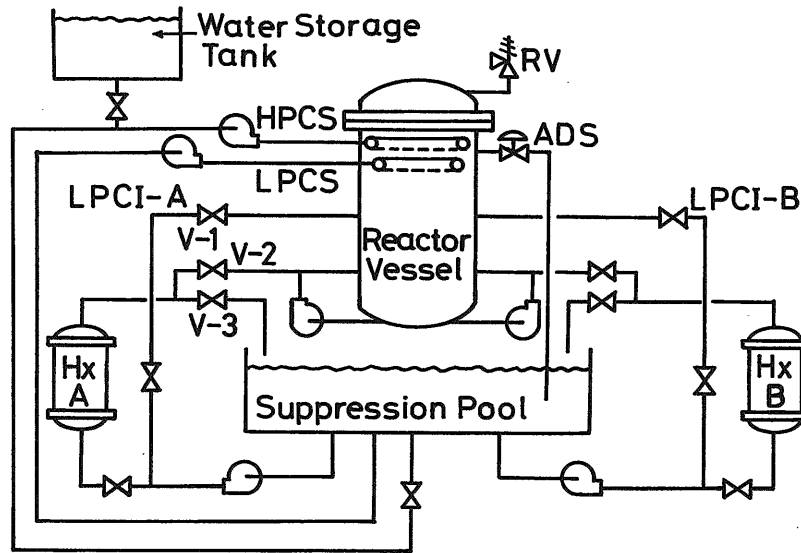


図-14 フェイズド・ミッション問題 (沸騰水型原子炉非常用冷却系)

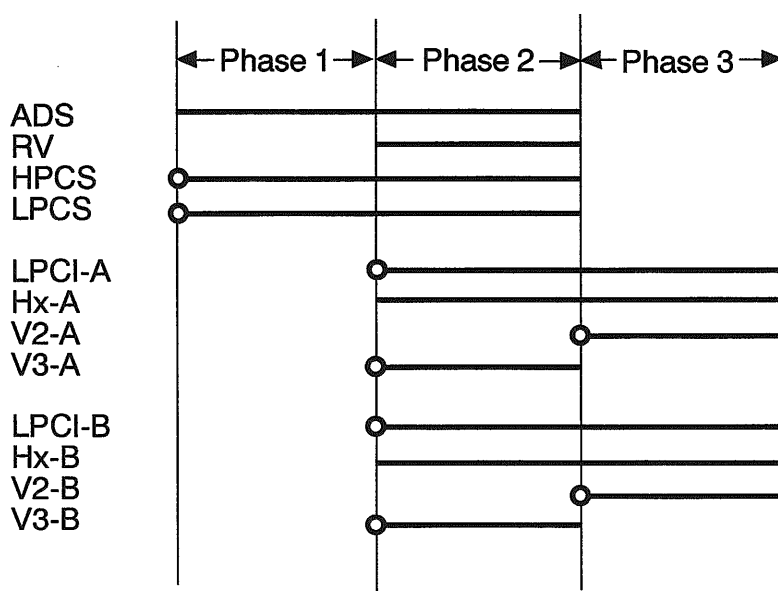


図-15 機器類動作状況

せず、出力信号線は"13"と"14*16"の和として記述し、以降並列に処理していく。

また、18番 (フェイズ1) 信号線をタイプ40オペレータ (39番) で変換後の出力信号線は"13"、"14*16"の番号を付け直した"58"、"59*60"より構成されている。信号線強度は、タイム・ポイント1は1.0でタイム・ポイント4以降8まではタイム・ポイント3 (フェイズ1の終わりの時

点) の値となっている。フェイズ2、3を表す40、41番の信号線強度も同様になっている。

最終信号線である42番の信号線は、上記並列処理を実施してきたため"77*78*79*80*69*71*63"等の32項の和となっている。このような手続きにより信号線間の従属関係を正しく処理していく事ができる。これらの記述はすべて成功確率値で行われている。

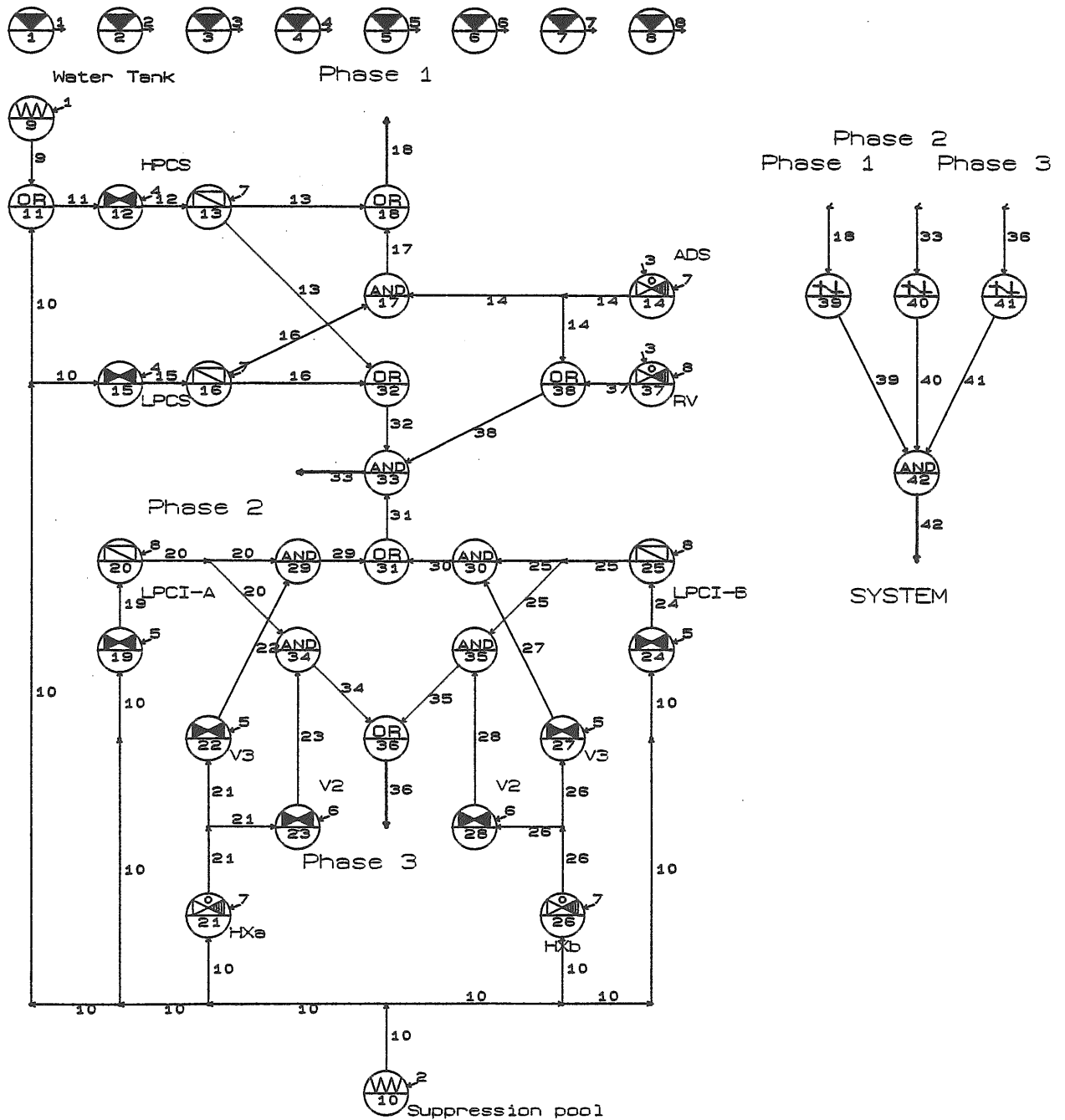


図-16 フェイズド・ミッション問題のGO-FLOWチャート

故障確率値への変換は、フォールト・ツリー解析におけるMCS (ミニマル・カット・セット) から頂上事象を求めると同様な計算方法³⁴⁾によりプログラム内にて実施され、表-VIIに示す様な解析結果が得られる。

18番の信号線はフェイズ1における動作状況を表しているが、表においてタイム・ポイント4以降の値は仮にそのまま動作が要求されていた場合の動作失敗確率を表している。タイプ40オペレータで変換後の39番の信号線ではタイ

ム・ポイント4以降はタイム・ポイント3 (フェイズ1の終わり) における動作失敗確率となっている。

33番の信号線 (フェイズ2の動作状況) を見ると、タイム・ポイント2、3 (フェイズ1) においては動作失敗確率1.00となっているが、これはフェイズ1においては起動されていないことを意味している。タイム・ポイント7、8の値は18番と同様動作要求が継続されていたとした時の失敗確率である。タイプ40オペレータで変換後の40番の信

表-VI フェイズド・ミッション問題におけるオペレータの意味、データ

オペレータ		意味	データ
番号	タイプ		
1	25	水タンク内の水	$R(t) = 1.0; t = 1 \sim 8$
2	25	サプレッションプール内の水	$R(t) = 1.0; t = 1 \sim 8$
3	25	蒸気流量	$R(1) = 0.0, R(t) = 1.0; t = 2 \sim 8$
4	25	フェイズ1開始信号	$R(2) = 1.0, \text{その他} = 0.0$
5	25	フェイズ2開始信号	$R(4) = 1.0, \text{その他} = 0.0$
6	25	フェイズ3開始信号	$R(7) = 1.0, \text{その他} = 0.0$
7	25	時間経過量	$R(3) = 0.5, R(5) = 5, R(7) = 31,$ $R(8) = 84, \text{その他} = 0.0$
8	25	時間経過量(フェイズ2以降)	$R(5) = 5, R(7) = 31, R(8) = 84,$
9	21	水タンク	$P_g = 1.0$
10	21	サプレッション・プール	$P_g = 1.0$
11	22	ORゲート	-
12	26	HPCSの起動	$P_g = 0.97$
13	35	HPCSの使用中の故障発生	$\lambda = 0.0003/h$
14	37	ADSの故障	$\lambda = 0.001/h$
15	26	LPCSの起動	$P_g = 0.97$
16	35	LPCSの使用中の故障発生	$\lambda = 0.0001/h$
17	30	ANDゲート	-
18	22	ORゲート	-
19	26	LPCI-Aの起動	$P_g = 0.98$
20	35	LPCI-A使用中の故障発生	$\lambda = 0.0001/h$
21	37	熱交換器Aの故障発生	$\lambda = 0.0001/h$
22	26	弁3Aの開操作	$P_g = 0.99$
23	26	弁2Aの開操作	$P_g = 0.97$
24	26	LPCI-Bの起動	$P_g = 0.98$
25	35	LPCI-B使用中の故障発生	$\lambda = 0.0001/h$
26	37	熱交換器Bの故障発生	$\lambda = 0.0001/h$
27	26	弁3Bの開操作	$P_g = 0.99$
28	26	弁2Bの開操作	$P_g = 0.97$
29	30	ANDゲート	-
30	30	ANDゲート	-
31	22	ORゲート	-
32	22	ORゲート	-
33	30	ANDゲート	-
34	30	ANDゲート	-
35	30	ANDゲート	-
36	22	ORゲート	-
37	37	逃がし弁の故障	$\lambda = 0.001/h$
38	25	時間経過量生成	$R(4) = 10.0, R(6) = 10.0, \text{その他} = 0.0$
39	40	フェイズ1	$t_i = 2, t_j = 3$
40	40	フェイズ2	$t_i = 4, t_j = 6$
41	40	フェイズ3	$t_i = 7, t_j = 8$
42	30	ANDゲート	-

PHASED MISSION PROBLEM (BWR ECCS SYSTEM)									
1	25	0	1						
2	25	0	2						
3	25	0	3						
4	25	0	4						
5	25	0	5						
6	25	0	6						
7	25	0	7						
8	25	0	8						
9	21	1	9	1	1				
10	21	1	10	1	2				
11	22	0	11	2	9	10			
12	26	1	12	1	11	1	4		
13	35	1	13	1	12	1	7		
14	37	2	14	1	3	1	7		
15	26	1	15	1	10	1	4		
16	35	3	16	1	15	1	7		
17	30	0	17	2	14	16			
18	22	0	18	2	13	17			
19	26	2	19	1	10	1	5		
20	35	3	20	1	19	1	8		
21	37	3	21	1	10	1	7		
22	26	3	22	1	21	1	5		
23	26	1	23	1	21	1	6		
24	26	2	24	1	10	1	5		
25	35	3	25	1	24	1	8		
26	37	3	26	1	10	1	7		
27	26	3	27	1	26	1	5		
28	26	1	28	1	26	1	6		
29	30	0	29	2	20	22			
30	30	0	30	2	25	27			
31	22	0	31	2	29	30			
32	22	0	32	2	13	16			
33	30	0	33	3	31	32	38		
34	30	0	34	2	20	23			
35	30	0	35	2	25	28			
36	22	0	36	2	34	35			
37	37	2	37	1	3	1	8		
38	22	0	38	2	14	37			
39	40	1	39	1	18				
40	40	2	40	1	33				
41	40	3	41	1	36				
42	30	0	42	3	39	40	41		
0									
21	1			1.0		0		0	
26	1			0		0.97		0	
26	2			0		0.98		0	
26	3			0		0.99		0	
35	1			0.0003		0		0	
35	2			0.001		0		0	
35	3			0.0001		0		0	
37	1			0.0003		0		0	
37	2			0.001		0		0	
37	3			0.0001		0		0	
40	1					2.0		3.0	0
40	2					4.0		6.0	0
40	3					7.0		8.0	0
0									
8									
1	STAND BY								
2	PHASE 1 STARTS								
3	0.5 HOURS AFTER THE PHASE 1								
4	PHASE 2 STARTS								
5	5 HOURS AFTER PHASE 2 STARTS								
6	36 HOURS AFTER PHASE 2 STARTS								
7	PHASE 3 STARTS								
8	84 HOURS AFTER PHASE 3 STARTS								
1	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
2	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
3	0.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
4	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.500E+00	0.000E+00	5.000E+00	3.100E+01	0.000E+00	8.400E+01	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.000E+00	3.100E+01	0.000E+00	8.400E+01	0.000E+00
0									
18	33	36	39	40	41	42			

図-17 GO-FLOW解析入力データ (フェイズド・ミッション問題)

===== RESULTS OF THE ANALYSIS =====

-----<< SIGNAL INTENSITIES AT ALL TIME POINTS >>-----

SIGNAL NUMBER	INCLUDED SHARED SIGNAL	TIME POINTS							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
2	-	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
3	-	.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
4	-	.000000	1.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
5	-	.000000	.000000	.000000	1.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
6	-	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	1.000000	.000000
7	-	.000000	.000000	.500000	.000000	5.000000	31.000000	.000000	84.000000
8	-	.000000	.000000	.000000	.000000	5.000000	31.000000	.000000	84.000000
9	-	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
10	-	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
11	-	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
12	-	.000000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000
13	13,	.000000	.970000	.9698545	.9698545	.9684008	.9594365	.9594365	.9355608
14	14,	.000000	1.000000	.9995001	.9995001	.9945151	.9641581	.9641581	.8864771
15	-	.000000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000	.970000
16	16,	.000000	.970000	.9699515	.9699515	.9694667	.9664660	.9664660	.9583817
17	14, 16,	.000000	.970000	.9694666	.9694666	.9641493	.9318261	.9318261	.8495833
18	13, 14, 16,	.000000 .000000	.970000 .970000	.9698545 .9694666	.9698545 .9694666	.9684008 .9641493	.9594365 .9318261	.9594365 .9318261	.9355608 .8495833
19	-	.000000	.000000	.000000	.980000	.980000	.980000	.980000	.980000
20	20,	.000000	.000000	.000000	.980000	.9795101	.9764783	.9764783	.9683103
21	21,	1.000000	1.000000	.9999500	.9999500	.9994501	.9963567	.9963567	.9880223
22	21,	.000000	.000000	.000000	.9899505	.9894556	.9863931	.9863931	.9781421
23	21,	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.9664660	.9583817
24	-	.000000	.000000	.000000	.980000	.980000	.980000	.980000	.980000
25	25,	.000000	.000000	.000000	.980000	.9795101	.9764783	.9764783	.9683103
26	26,	1.000000	1.000000	.9999500	.9999500	.9994501	.9963567	.9963567	.9880223
27	26,	.000000	.000000	.000000	.9899505	.9894556	.9863931	.9863931	.9781421
28	26,	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.9664660	.9583817
29	20, 21,	.000000	.000000	.000000	.9701515	.9691818	.9631915	.9631915	.9471450
30	25, 26,	.000000	.000000	.000000	.9701515	.9691818	.9631915	.9631915	.9471450
31	20, 21, 53, 25, 26, 54,	.000000 .000000	.000000 .000000	.000000 .000000	.9701515 .9701515	.9691818 .9691818	.9631915 .9631915	.9631915 .9631915	.9471450 .9471450
32	13, 16,	.000000 .000000	.970000 .970000	.9698545 .9699515	.9698545 .9699515	.9684008 .9694667	.9594365 .9664660	.9594365 .9664660	.9355608 .9583817

図-18(1) 解析結果出力リスト(1) (計算手順部分、フェイズド・ミッション問題)

33	20, 21, 53, 13, 57,	.0000000	.0000000	.0000000	.9409058	.9338753	.8914444	.8914444	.7859105
	20, 21, 53, 13, 14,	.0000000	.0000000	.0000000	.9404355	.9334086	.8909988	.8909988	.7855177
	20, 21, 53, 16, 57,	.0000000	.0000000	.0000000	.9410000	.9349033	.8979757	.8979757	.8050811
	20, 21, 53, 16, 14,	.0000000	.0000000	.0000000	.9405296	.9344359	.8975270	.8975270	.8046786
	25, 26, 54, 13, 57,	.0000000	.0000000	.0000000	.9409058	.9338753	.8914444	.8914444	.7859105
	25, 26, 54, 13, 14,	.0000000	.0000000	.0000000	.9404355	.9334086	.8909988	.8909988	.7855177
	25, 26, 54, 16, 57,	.0000000	.0000000	.0000000	.9410000	.9349033	.8979757	.8979757	.8050811
	25, 26, 54, 16, 14,	.0000000	.0000000	.0000000	.9405296	.9344359	.8975270	.8975270	.8046786
34	20, 21,	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.9437330	.9280108
35	25, 26,	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.9437330	.9280108
36	20, 21, 55,	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.9437330	.9280108
	25, 26, 56,	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.0000000	.9437330	.9280108
37	-	.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9950125	.9646403	.9646403	.8869205
38	57,	.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9950125	.9646403	.9646403	.8869205
	14,	.0000000	1.0000000	.9995001	.9995001	.9945151	.9641581	.9641581	.8864771
39	58,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9698545	.9698545	.9698545	.9698545	.9698545
	59, 60,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9694666	.9694666	.9694666	.9694666	.9694666
40	67, 68, 69, 70, 71,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9409058	.9338753	.8914444	.8914444	.8914444
	67, 68, 69, 70, 72,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9404355	.9334086	.8909988	.8909988	.8909988
	67, 68, 69, 73, 71,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9410000	.9349033	.8979757	.8979757	.8979757
	67, 68, 69, 73, 72,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9405296	.9344359	.8975270	.8975270	.8975270
	74, 75, 76, 70, 71,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9409058	.9338753	.8914444	.8914444	.8914444
	74, 75, 76, 70, 72,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9404355	.9334086	.8909988	.8909988	.8909988
	74, 75, 76, 73, 71,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9410000	.9349033	.8979757	.8979757	.8979757
	74, 75, 76, 73, 72,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9405296	.9344359	.8975270	.8975270	.8975270
41	61, 62, 63,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9437330	.9280108
	64, 65, 66,	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	.9437330	.9280108
42	77, 78, 79, 80, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9409058	.9338753	.8914444	.8647011	.8502954
	77, 78, 67, 68, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9409058	.9338753	.8914444	.8412856	.8272701
	77, 78, 79, 80, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9404355	.9334086	.8909988	.8642687	.8498704
	77, 78, 67, 68, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9404355	.9334086	.8909988	.8408650	.8268566
	77, 78, 79, 80, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9126331	.9067202	.8709058	.8447785	.8307047
	77, 78, 67, 68, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9126331	.9067202	.8709058	.8219025	.8082100
	77, 78, 79, 80, 69,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9121769	.9062669	.8704705	.8443564	.8302898
	77, 78, 64, 65, 66,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9121769	.9062669	.8704705	.8214918	.8078060
	77, 78, 74, 75, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9409058	.9338753	.8914444	.8412856	.8272701
	77, 78, 81, 82, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9409058	.9338753	.8914444	.8647011	.8502954
	77, 78, 74, 75, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9404355	.9334086	.8909988	.8408650	.8268566
	77, 78, 81, 82, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9404355	.9334086	.8909988	.8642687	.8498704
	77, 78, 66,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9121769	.9062669	.8704705	.8443564	.8302898
	77, 58, 74, 75, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9121769	.9062669	.8704705	.8214918	.8078060
	77, 78, 81, 82, 76,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9404355	.9334086	.8909988	.8642687	.8498704
	77, 78, 66,	1.0000000	.9700000	.9698545	.9121769	.9062669	.8704705	.8443564	.8302898
	77, 59, 60, 79, 80,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382986	.8243331
	69, 70, 71, 63,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
	77, 59, 60, 67, 68,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382987	.8243331
	69, 70, 71, 64, 65,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
	66,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382987	.8243331
	77, 83, 60, 79, 80,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382987	.8243331
	69, 70, 63,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
	77, 83, 60, 67, 68,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
	69, 70, 64, 65, 66,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
	77, 59, 84, 79, 80,	1.0000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107

図-18(2) 解析結果出力リスト(2) (計算手順部分、フェイズド・ミッション問題)

69, 71, 63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975267	.8706009	.8560970
77, 59, 84, 67, 68,								
69, 71, 64, 65, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975267	.8470257	.8329145
77, 83, 84, 79, 80,								
69, 63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975269	.8706012	.8560973
77, 83, 84, 67, 68,								
69, 64, 65, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975269	.8470259	.8329147
77, 59, 60, 74, 75,								
76, 70, 71, 61, 62,								
63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
77, 59, 60, 81, 82,								
76, 70, 71, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382986	.8243331
77, 83, 60, 74, 75,								
76, 70, 61, 62, 63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8155981	.8020107
77, 83, 60, 81, 82,								
76, 70, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9121768	.9053609	.8642256	.8382987	.8243331
77, 59, 84, 74, 75,								
76, 71, 61, 62, 63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975267	.8470257	.8329145
77, 59, 84, 81, 82,								
76, 71, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975267	.8706009	.8560970
77, 83, 84, 74, 75,								
76, 61, 62, 63,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975269	.8470259	.8329147
77, 83, 84, 81, 82,								
76, 66,	1.000000	.9700000	.9694666	.9405296	.9344358	.8975269	.8706012	.8560973

図-18(3) 解析結果出力リスト(3) (計算手順部分、フェイズド・ミッション問題)

号線では、タイム・ポイント2、3においては動作失敗確率0.0となっている。タイム・ポイント7、8の値はタイム・ポイント6 (フェイズ2の終わり) における動作失敗確率となっている。

信号線36、41についても同様のことが見られる。

42番の最終信号線により全フェイズを通してのシステム動作失敗確率が表されている。各フェイズ間に従属関係が

あるため、信号線39、40、41の単純な和にはなっていない。

システム動作失敗確率を図示したのが図-19であり、フェイズの境界で動作失敗確率がステップ状に増加していることがわかる。GO-FLOW手法によるこの解析結果は、他の解析方法に比較して一番厳密解に近い値を示していた³⁵⁾。

表-Ⅶ フェイズド・ミッション問題解析結果 (BWR-ECCS)

信号線番号	フェイズ1		フェイズ2			フェイズ3	
	2	3	4	5	6	7	8
18	9.00×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}	1.133×10^{-3}	2.77×10^{-2}	2.77×10^{-3}	9.69×10^{-3}
33	1.00	1.00	1.796×10^{-3}	1.941×10^{-3}	3.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}	1.824×10^{-2}
36	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.17×10^{-3}	5.18×10^{-3}
39	9.00×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}	9.20×10^{-4}
40	0.0	0.0	1.796×10^{-3}	1.941×10^{-3}	3.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}
41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.17×10^{-3}	5.18×10^{-3}
42 (全システム)	9.00×10^{-4}	9.20×10^{-4}	1.811×10^{-3}	1.956×10^{-3}	3.99×10^{-3}	6.40×10^{-3}	8.40×10^{-3}

BWR-ECCS Phased Mission Problem

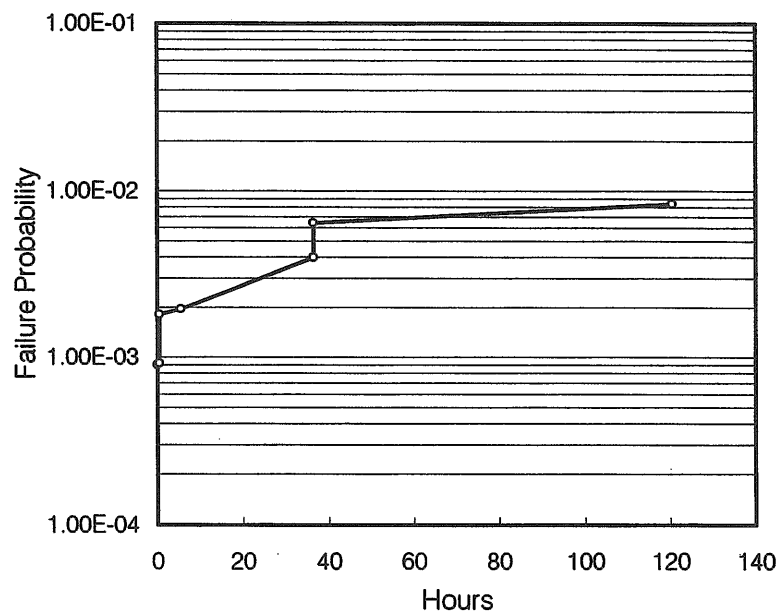


図-19 フェイズド・ミッション問題解析結果

9. 共通原因故障解析機能

9.1 共通原因故障

大規模システムの信頼度を向上させる手段としては、同一機能を持った系を多重化して、冗長性を持たせる方法が広く実施されている。しかし、一つの原因のために複数の機器・系統が同時に故障してしまう共通原因故障が発生すると、独立故障のみが発生すると仮定した場合に比較して、冗長系の信頼度は格段に低下してしまう恐れがある。

システム信頼性解析においては、共通原因故障を適切に扱うことが極めて重要になってくる。共通原因故障をまったく考慮にいれていない解析結果は、多分に信頼度を過大に評価することとなる。逆に、共通原因故障を不用意に取り扱うと、今度は何桁も大きなシステム故障確率が出てくる恐れがある。

共通原因故障の事例はすでに多数報告されているとはいえ、個々の機器やそれぞれのシステム固有の条件を考慮すると、統計的に有意義なデータを得るのに十分な事例があるとは言えない。したがって、未だ種々のモデルが共存するとともに工学的判断をも必要とし、共通原因故障はPSAの分野においても、今後一層の研究が望まれている分野といえる。

共通原因故障の詳細な議論は他の文献⁶⁾に譲り、ここでは共通原因故障のモデル化の方法を検討していく。

9.2 共通原因故障のモデル化

システム解析において共通原因故障からの寄与を組み入れる方法は大きく分けて明示的な方法と、パラメトリックな方法がある。

9.2.1 明示的方法

関連する一連の機器がはっきりしている従属故障と故障原因および影響される機器が明確な共通原因故障は、システム解析における論理モデルを修正し、従属性の寄与を直接的に扱う方法が取られる。例えば、イベント・ツリー(図-1)においてシステムBとCが共通の原因で故障する場合がある時を考えてみる。システム不動作を共通原因故障と独立故障の別々のヘディングに分離し、Bに共通原因故障が起こったシーケンスにおいては、Cは必ず不動作とし、共通原因故障が起こらなかったシーケンスのみに於て独立故障の発生の有無で分岐させる(図-20)。また、フォールト・ツリー中において取り扱う方法としては、独立故障と共通原因故障を分離し、それぞれを基事象として記述する。図-21では、AB、BC間に起こる共通原因故障をフォールト・ツリー中に書き加えている。これらの例では共通原因により同時故障が発生する機器の組み合わせが変わる毎に対応するイベント・ツリー、フォールト・ツリーを作成する必要がある。

システム規模が大きい、多数の故障原因がある等の理由でモデル化が困難であるとか、故障原因や故障連鎖が不明確でモデル化が不可能である場合はパラメトリックな方法

を用いる。

9.2.2 パラメトリックな方法

明示的方法では具体的な故障原因や従属故障の関連をまず明確にする必要がある。これに対してパラメトリックな方法では、実際のプラントの運転経験から求めたデータを基に、従属故障/共通原因故障の発生頻度を推定する。そのため、故障原因や従属故障の連鎖を特に明確にする必要はなく、主要な事象の漏れと抜けが少なくなると考えられる。しかし、解析対象プラント固有のデータに限界があるため、不確かさが大きくなるという欠点がある。

いま、 m 個の機器で構成されているシステムを考える。各機器は同種の機器で、各々の独立故障確率はどれも Q_1 であると仮定する。このシステムにおいて特定の k 個の機器が同時に故障する確率を Q_k とすると、特定の一つの機器の全故障確率 Q_i は

$$Q_i = \sum_{k=1}^m {}_{m-1}C_{k-1} \cdot Q_k \cdots \cdots \cdots (3)$$

となる。これら Q_k の Q_i にたいする比を推定する方法として種々のモデル化がなされている。以下主要な方法の概略を説明する。

(1) β -ファクタ (Factor) 法

この方法は高温ガス炉 (HTGR) の解析の際に、Flemingにより提唱され使用された方法³⁶⁾で、取り扱いが簡単なためその後の共通原因故障解析において広く用いられている。

このモデルでは、機器の全故障率を独立故障と共通原因故障の部分の和と考える。共通原因故障が発生したときは、故障原因が作用した機器のすべてが同時に故障すると仮定している。それ故、(3)式において Q_1 ($K=1$)、 Q_m ($k=m$) 以外はすべて0とし、

$$Q_m = \beta Q_i \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$Q_1 = (1 - \beta) Q_i \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$\beta = Q_m / (Q_1 + Q_m) \cdots \cdots \cdots (6)$$

の関係でパラメータ β を用い、共通原因故障からの寄与を表現する。

なお、故障率の異なる二つの機器A、Bの間での β ファクターは、確率でなく故障率を基準にとり、次のように定義される。

$$\lambda_c = \beta_A \cdot \lambda_A = \beta_B \cdot \lambda_B \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここで λ_c は共通原因故障発生率、 λ_A と λ_B はそれぞれ共通原因をも含めた機器AとBの故障率である。 β ファクターとしては、それぞれ β_A 、 β_B のように機器により異なった値が定義されることになる。

(2) MGL (Multiple Greek Letter) モデル

冗長度がより高いシステムの解析に適用するため β ファクター法を拡張したモデル³⁷⁾である。同じく、 m 個の機器の冗長系について(3)式をもとに考えてみる。いま、次式により Q_k を Q_i の部分として表現する。

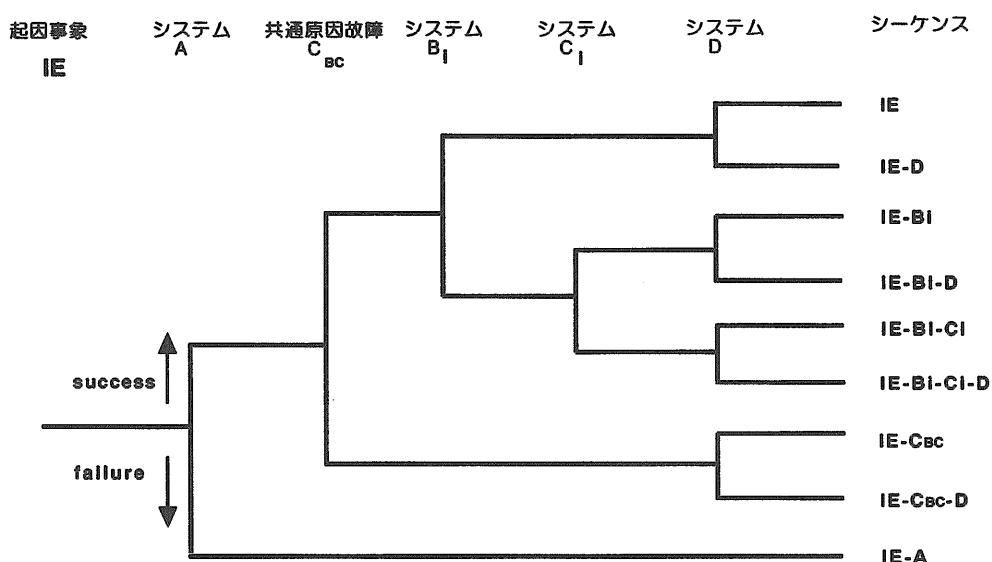


図-20 共通原因故障の明示的取り扱い例 (イベント・ツリー)

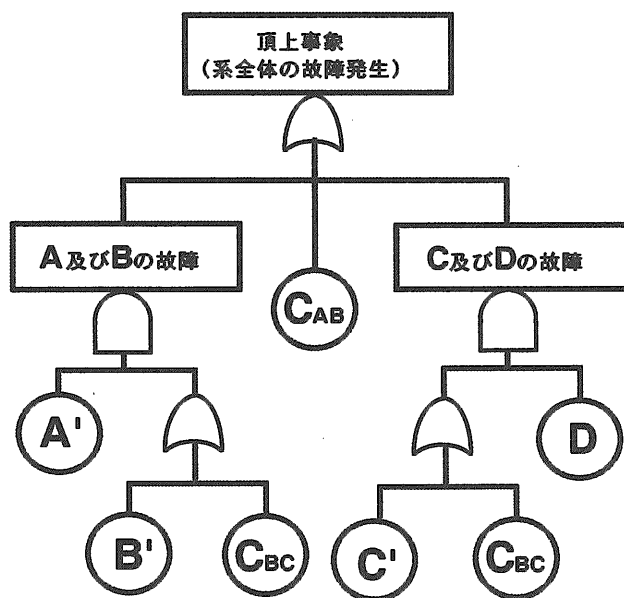


図-21 共通原因故障の明示的取り扱い例 (フォールト・ツリー)

$$Q_k = \frac{1}{m-1} \prod_{i=1}^k \rho_i (1 - \rho_{k+1}) Q_t \dots\dots\dots (8)$$

ここに、
 $\rho_1 = 1$ 、 $\rho_2 = \beta$ 、 $\rho_3 = \gamma$ 、 $\rho_4 = \delta$ 、……
 である。

上式を $k=1, 2, 3$ について具体的に書くと、

$$Q_1 = (1 - \beta) Q_t \dots\dots\dots (9)$$

$$Q_2 = \frac{1}{(m-1)} \cdot \beta (1 - \gamma) Q_t \dots\dots\dots (10)$$

$$Q_3 = \frac{2}{(m-1)(m-2)} \cdot \beta \gamma (1 - \delta) Q_t \dots\dots\dots (11)$$

ここに、ギリシャ文字 β 、 γ 、 δ は、ある機器の、他の一個以上の機器との同時故障を考えた時に次の意味がある。

β : ある機器の全故障確率中における、自分自身を含めて2個以上の機器が同時に故障する割合。

γ : 自分自身を含めた2個以上の機器の同時故障確率において、3個以上の機器が同時に故障する割合。

δ : 自分自身を含めた3個以上の機器の同時故障確率において、4個以上の機器が同時に故障する割合。

βQ_1 は2個以上の機器の同時故障発生確率であり、 $\beta Q_1 \cdot (1-\gamma)$ はそのうちで2個だけの機器が同時に故障する確率である。 Q_2 は特定の2個の機器が故障する確率のため組合せの数 ${}_{m-1}C_2$ で割り算しておく。 Q_3 についても同様の関係となっている。

この式で γ 以上の係数がすべて1.0であるとする、

$$Q_1 = (1-\beta) Q_1 \dots\dots\dots (12)$$

$$Q_k = 0; \quad k=2 \sim m-1 \dots\dots\dots (13)$$

$$Q_m = \beta Q_1 \dots\dots\dots (14)$$

となり、 β ファクター法に一致する。

(3) α -ファクタ (Factor) 法

β ファクター法あるいはMGLモデルではデータからパラメータ値を正確に推定することが難しい。そこで、より簡便なモデルとして α ファクター法³⁹⁾がある。

β ファクター法、MGLとも機器故障率を基礎にしているが、 α ファクター法ではシステムの故障率を基準にしている。それ故、 α ファクター法の方がより直接的に観測データと結びつけられる。

任意のk個の機器が共通原因により故障する割合を α_k と記す。このとき、

$$\alpha_k = \frac{m C_k \cdot Q_k}{\sum m C_k \cdot Q_k} \dots\dots\dots (15)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m = 1 \dots\dots\dots (16)$$

となり、 Q_k 、 Q_t との間には以下の関係が成立する。

$$Q_k = \frac{k \cdot \alpha_k}{m-1 C_{k-1} \cdot \alpha_t} Q_t \dots\dots\dots (17)$$

$$\alpha_t = \sum k \cdot \alpha_k \dots\dots\dots (18)$$

α_t は機器の全故障総数に比例し、 $k \cdot \alpha_k$ は任意のk個の機器が同時に故障する場合の機器故障数に比例する。

$(k \cdot \alpha_k / \alpha_t) \cdot Q_t$ は特定の1個の機器が他の任意のk-1個と同時に故障する確率となっている。それ故、特定のk個の機器が同時に故障する確率 Q_k は、組合せの数 ${}_{m-1}C_{k-1}$ で割って(17)式のようになる。

(4) BFR (Binomial Failure Rate) モデル³⁹⁾

このモデルにおいては、故障原因として致命的 (Lethal) なものと非致命的 (Nonlethal) なものを考えている。それぞれの出現頻度を ω と μ であらわし、Lethal Shockが与えられた時は全ての機器が確率1.0で故障するとし、Nonlethal Shockの場合は各々の機器が確率pで互いに独立に故障するとしている。

Q_k と上記パラメータの関係は、

$$Q_1 = Q_1 + \mu p (1-p)^{m-1} \dots\dots\dots (19)$$

$$Q_k = \mu p^k (1-p)^{m-k}; \quad k=2 \sim m-1 \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_m = \mu p^m + \omega \dots\dots\dots (21)$$

となる。ここで、 Q_1 は各機器のランダム故障確率を表す。

(5) その他の方法

以上(1)から(4)までの方法の他にも次の様な種々のモデルが提唱されている。

Marshall & Olkin法⁴⁰⁾、修正 β -Factor法⁴¹⁾、一般化 β -Factor法⁴²⁾、Common Load Model⁴³⁾、Multiple Dependent Failure Fraction Method⁴⁴⁾等があるが、詳細は参考文献に譲ることとする。

9.3 共通原因故障データ

従属故障/共通原因故障データの解析としては2通り考えられる。一つは、過去に於て発生した従属故障/共通原因故障の事例を個々に検討し、解析対象プラントに適用できるか判断し、システム論理モデルへ取り入れる定性的な解析である。この様な解析に必要な事例データは米国のライセンス・イベント報告 (LER)⁴⁵⁾ から得られるが、NUREG/CR-4550⁴⁶⁾ の報告書にもいくつかの事例が載っている。

もう一つは、機器故障データを定量的に取り扱う方法で、インパクト・ベクトルを用いる方法と、 β ファクターに代表されるパラメータ値を推定する方法がある。

インパクト・ベクトル⁴⁷⁾とは、ある事象が機器群にどのような影響を及ぼすかを表示する手法であり、共通原因故障の起こり易さの程度を定量的に表現する方法である。

β ファクター値に代表されるパラメータ値の推定においては、まず故障データの中の多重故障が単に独立故障の重なったものなのか、共通原因故障が存在して発生した故障か判断する必要がある。原因が明確であれば判断は簡単であるが、隠れている原因を見つけ出すのは難しい。次に、発生した多重故障はより多重度の高い機器群の中の一部かどうかを知る必要がある。しばしば、この種の情報は欠落している事がある。更に、起動失敗確率の場合は試験スケジュールがどうなっているか知る必要がある。例えば、2台のディーゼル発電機の起動試験を同時に行っているのか、互いにずらして実施し故障が見い出された場合のみもう一方も起動試験を行うのかでは、同じ2重故障事例数があっても β ファクター値は異なってくる。

この様に、パラメータ値の推定は思ったよりも難しい作業であるといえる。表-VIIIには代表的な機器についての β ファクター値を示す⁴¹⁾。また、米国原子力規制委員会からはLERを基に、ポンプ³⁹⁾、弁⁴⁸⁾、計器及び制御用部品⁴⁹⁾、ディーゼル発電機⁵⁰⁾についてBFR及び β ファクター値を推定した報告書が出ている。

これらの一般的なデータを解析において用いるのも有効な方法であるが、解析対象プラントに十分なデータが存在するときはできるだけプラント固有のパラメータ値を推定するのが望ましい。

表-Ⅷ 主要機器のβファクター値

機器	炉・年	事象数	事象の内訳				βファクター値
			独立故障	従属故障	共通原因故障		
					潜在的	現実に発生	
炉停止ブレーカ	563	72	56	16	3	8	.19
ジーゼル発電機	394	674	639	35	9	13	.05
モーター駆動弁	394	947	842	105	17	25	.08
逃がし安全弁							
PWR	318	54	30	24	0	0	.07
BWR	245	172	136	36	7	7	.22
チェック弁	654	254	242	12	3	5	.06
ポンプ							
安全注入系	394	112	77	35	2	6	.17
RHR	394	117	67	50	2	3	.11
格納容器スプレイ	394	48	32	16	1	1	.05
補助給水系	394	255	194	61	2	3	.03
所内用水系	394	203	159	44	2	2	.03
冷却装置	654	33	27	6	2	2	.11
換気装置	654	59	49	10	2	3	.13
全機器	—	3,000	2,550	450	52	78	.10

(*) この表では共通原因故障は従属故障の一部としている。

(**) 潜在的共通原因故障とは、機能の低下あるいは放置しておく場合。

9.4 GO-FLOW手法における共通原因故障の取り扱い⁵¹⁾

解析対象のシステムにおいては、一般に複数の共通原因が存在し、更に特定の故障原因に対しても故障が同時に発生する機器の組み合わせに種々の可能性が存在する。この様子をモデル化して示したのが図-22である。この図においては故障の原因としてC₁とC₂の2種類が存在する。システムはA~Nの機器によりネットワーク的に構成されている。それぞれの故障原因が影響を及ぼす機器が円で囲まれている。これらが共通原因故障機器群である。必ずしも機器群の中の全ての機器が同時に故障するわけではなく、種々の組み合わせが起こり得る。図の場合、故障原因C₁により機器B、G、Lが、故障原因C₂により機器G、H、Iが故障している状況となっている。

複数の故障原因を同時に組み入れて解析を進めると組み合わせ数は膨大なものとなる一方複数の原因による故障が同時に発生することによるシステムの信頼度への影響は小であることから、単一の故障原因が存在する場合の寄与を個々に計算し加え合わせる方式をここでは採用した。

共通原因故障が事象A、Bに起こる場合について考察してみよう。システム全体の故障発生T(A, B)は、一般的に次のブール代数式で表せられる。

$T(A, B) = \{A \cdot E + B \cdot F + A \cdot B \cdot G\} \cdot H + K$
 ここでE~Kは、A、B以外の基本事象より構成される任意のブール代数の項である。

基本事象A、Bを共通原因故障C_{AB}と独立故障A_i、B_iの和に分解する。

$$A = A_i + C_{AB} \dots\dots\dots (22)$$

$$B = B_i + C_{AB} \dots\dots\dots (23)$$

これを上式に代入すると、

$$T(A, B) = \{(A_i + C_{AB}) \cdot E + (B_i + C_{AB}) \cdot F + (A_i + C_{AB}) \cdot (B_i + C_{AB}) \cdot G\} \cdot H + K = T(A_i, B_i) + C_{AB} \cdot \{E + F + G\} \cdot H \dots\dots\dots (24)$$

となる。ここで、T(A_i, B_i)は事象A、Bを独立故障でおきかえた時のシステムの故障発生を表す。

この式を発生確率値に変換すると、

$$P\{T(A, B)\} = P\{T(A_i, B_i)\} + P\{C_{AB}\} \cdot [P\{T(1,1)\} - P\{T(0,0)\}] \dots\dots (25)$$

となる。第1項は独立故障からの寄与で、第2項は共通原因故障からの寄与である。ここで、P{T(1,1)}、P{T(0,0)}はそれぞれ事象A、Bが発生する確率を1.0及び0.0とした場合のシステムの故障発生確率である。

一般に、複数の故障原因を考え、共通原因故障の発生する機器数も2以上の場合の一般式は次の様になる。

$$P\{T(A, B, \dots)\} = P\{T(A_i, B_i, \dots)\} + \sum_{C_j} \sum_{m=2}^N \sum_m P\{C_{jm}\} \cdot [P\{T(1,1,\dots)\} - P\{T(0,0,\dots)\}] \dots (26)$$

ここで、和は共通原因故障の種類C_j、同時に故障する機器数m、故障するm個の機器の全ての可能な組み合わせについて実施する。独立故障からの寄与分と各々の共通原因故障からの寄与分を計算して加え合わせる式となっている。

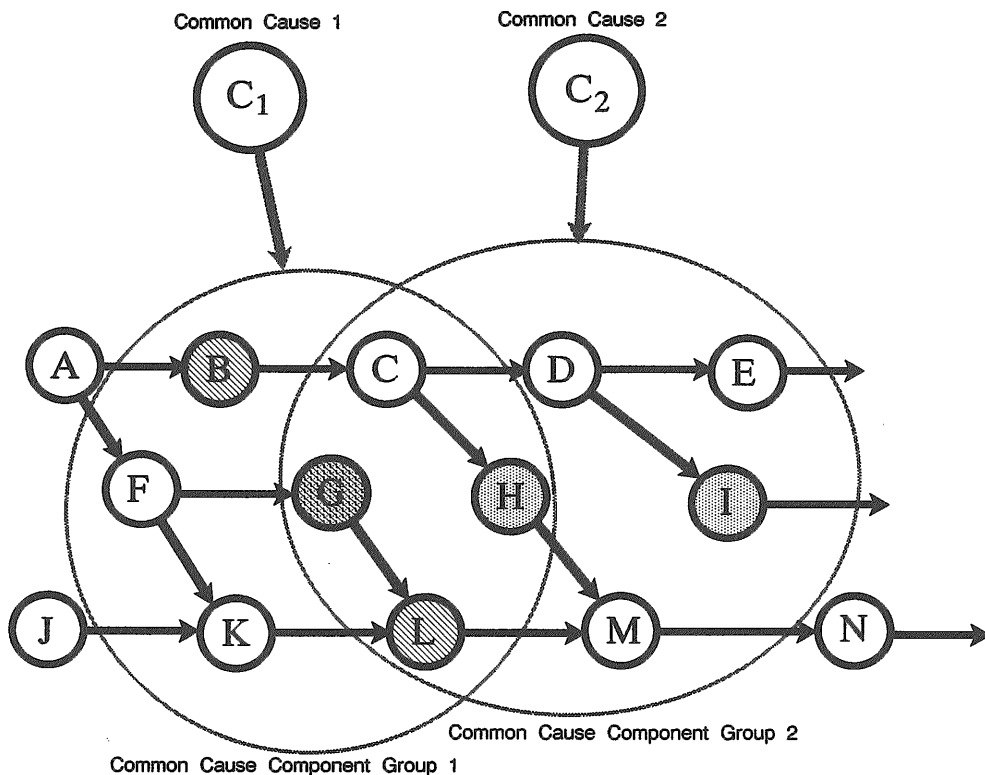


図-22 共通原因の機器への作用モデル

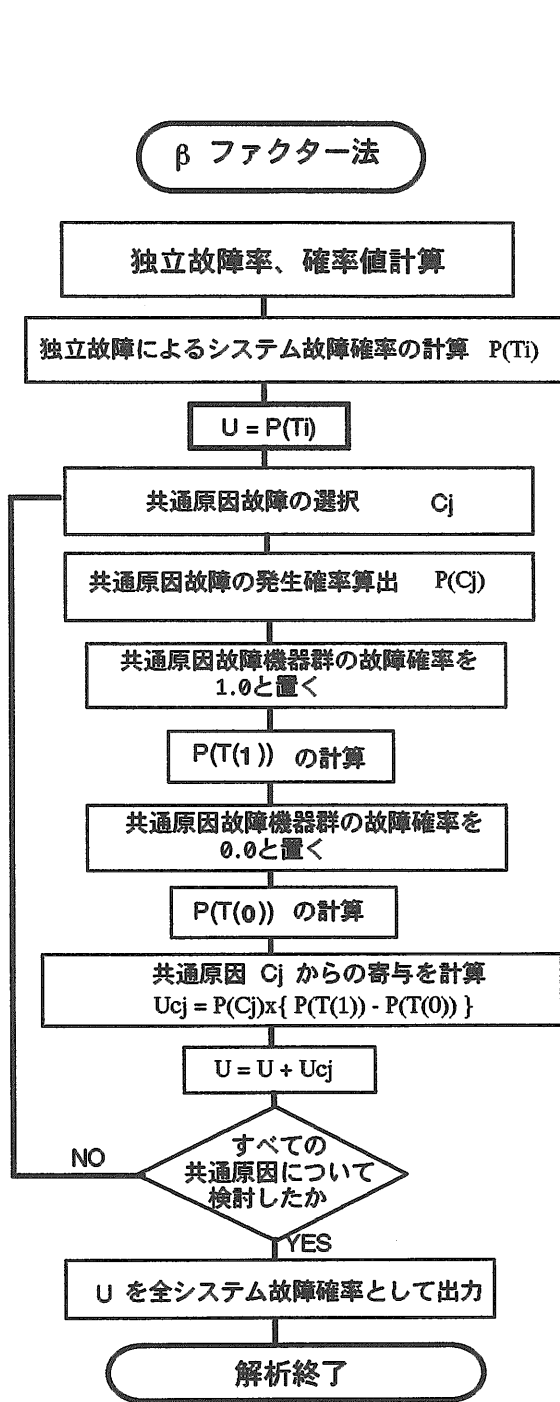


図-23 共通原因故障解析手順 (βファクター法)

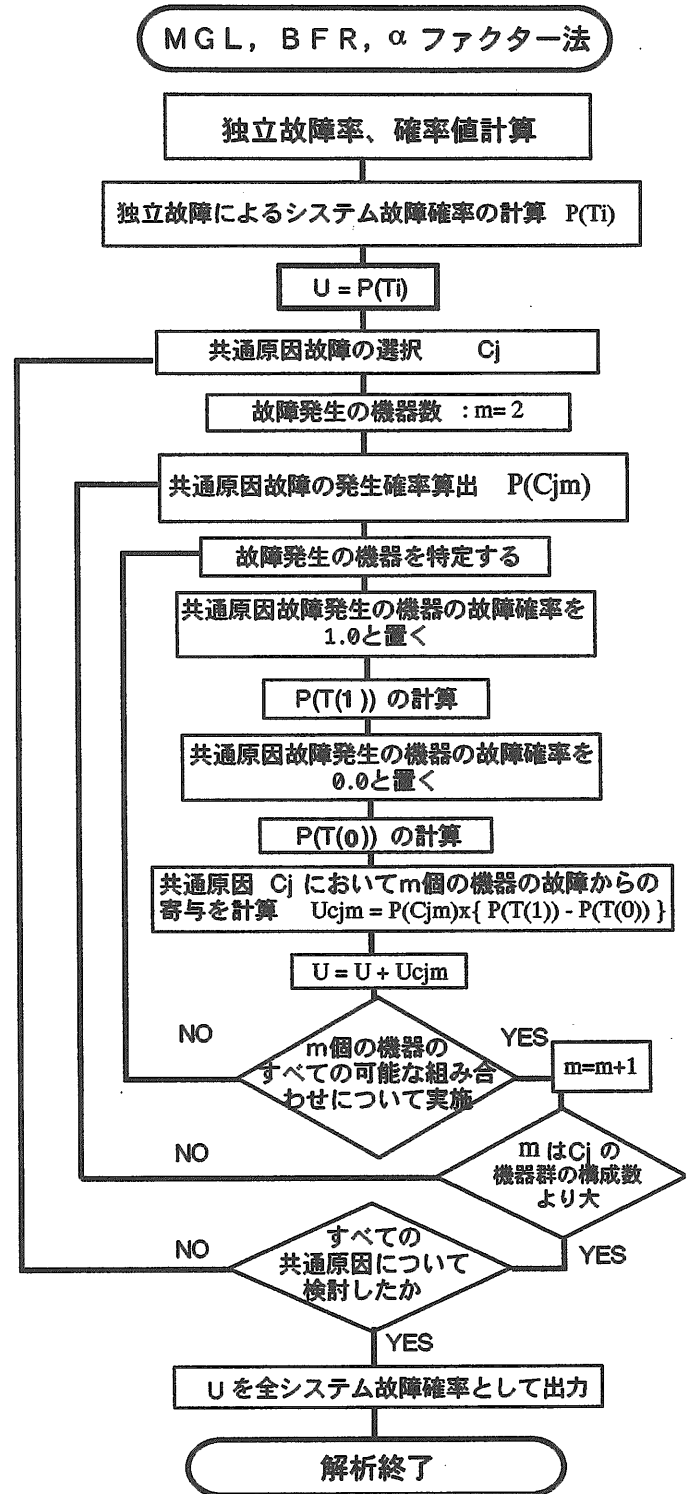


図-24 共通原因故障解析手順 (αファクター法、MGL法、BFR法)

9.5 解析プログラムにおける共通原因故障解析方法

上記パラメトリックなモデル4種類を直接的にGO-FLOW解析で取り扱える機能を開発した。解析対象とする系における共通原因故障機器群、故障モデル、関連パラメータ値を与えるだけで、従来のGO-FLOW解析に引き続き共通原因故障解析が実施される。

なお、共通原因故障解析を考慮せずに作成した従来のGO-FLOWチャートがそのまま解析に使用できる。

現在の所、共通原因故障機器群としては2群まで、同一機器群内においては最大6個の機器まで指定できる。解析手順のフロー・チャートを図-23、24に示す。βファクタ法においては、群内の全ての機器が同時に故障するので、解析手順はやや単純となっている。その他の方法は、群内において故障する機器数、組み合わせを変えて繰り返し計算を実施するのでやや複雑な手順である。

共通原因故障解析のための入力データは、GO-FLOW基本解析用の入力データ(拡張子.gfd)とは別のファイルとして用意しておく(拡張子.ccf)。入力データの構成は以下のようにしている。

- ①共通原因故障解析を実施するか否かの指標 (I5, "1" で実施、それ以外は実施せず。)
- ②共通原因故障機器群数 (I5)
- ③モデル化手法選択 (I5, "1": βファクタ法 "2": BFR法, "3": αファクタ法 "4": MGL法)
- ④パラメータ値 (F10.0: 各手法におけるパラメータ値の与え方は次節で説明)
- ⑤同一機器群に属するオペレータ番号 (nI5)

共通原因故障機器群が2群ある場合は、各群毎に④~⑤のデータをセットとして与える。

9.5.1 各オペレータにおける故障率等の取り扱い

以下に、各パラメトリック・モデル毎にGO-FLOW解析プログラム内で実施している故障率、故障確率、動作確率等の取り扱い方を説明する。これらの故障率等の置き換えは、パラメータ値が与えられるとプログラム内で自動的に行われる。

(1) βファクタ法: β値を与える。

タイプ21、26、27のオペレータの場合は共通原因故障の発生確率をインプット・データにより与えられたβ値を基に、

$$P(C_{ccf}) = \beta \times P_i \dots\dots\dots (27)$$

とする。それ故独立故障の寄与分 $P\{T(A_i, B_i, \dots)\}$ を計算する時のオペレータのパラメータ値は

$$P'_i = (1.0 - \beta) \times P_i \dots\dots\dots (28)$$

$$P'_g = 1.0 - P'_i \dots\dots\dots (29)$$

とし、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時のパラメータ値は

$$P'_i = 1.0 \dots\dots\dots (30)$$

$$P'_g = 0.0 \dots\dots\dots (31)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算するときのパラメータ値は

$$P'_i = 0.0 \dots\dots\dots (32)$$

$$P'_g = 1.0 \dots\dots\dots (33)$$

(304)

と置き替えている。

タイプ35、37、38のオペレータの場合は故障率が与えられているので、共通原因故障発生率を

$$\lambda_{ccf} = \beta \times \lambda \dots\dots\dots (34)$$

独立故障発生率を

$$\lambda' = (1.0 - \beta) \times \lambda \dots\dots\dots (35)$$

とする。また、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = 0.0 \text{ (タイプ35、37オペレータ)} \dots\dots\dots (36)$$

$$R(t) = S(t) \text{ (タイプ38オペレータ)} \dots\dots\dots (37)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = S(t) \text{ (タイプ35、37オペレータ)} \dots\dots\dots (38)$$

$$R(t) = 0.0 \text{ (タイプ38オペレータ)} \dots\dots\dots (39)$$

と取り扱っている。

タイプ39オペレータは弁の開閉をモデル化しており開動作成功確率 P_o と閉動作成功確率 P_c の2種類の確率がパラメータ値として与えられている。それ故、β値もそれぞれに対応した、β_o、β_cの2種類を与える。共通原因故障発生確率はそれぞれ

$$P(C_o) = \beta_o \times (1.0 - P_o) \dots\dots\dots (40)$$

$$P(C_c) = \beta_c \times (1.0 - P_c) \dots\dots\dots (41)$$

とし、独立故障を計算する時は

$$P'_o = P_o + \beta_o \times (1.0 - P_o) \dots\dots\dots (42)$$

$$P'_c = P_c + \beta_c \times (1.0 - P_c) \dots\dots\dots (43)$$

とする。共通原因故障からの寄与分は、 P_o 、 P_c それぞれについて計算し、次式の様に加え合わせる。

$$P(C_o) \times \{P\{T_o(1, 1, \dots)\} - P\{T_o(0, 0, \dots)\}\} + P(C_c) \times \{P\{T_c(1, 1, \dots)\} - P\{T_c(0, 0, \dots)\}\} \dots\dots (44)$$

ここで、 $P\{T_o(1, 1, \dots)\}$ は対象とする機器の開操作が確率1.0で失敗する場合のシステム全体の故障確率を意味する。他も同様の意味を持つ。

(2) MGL法: ρ₂(=β)、ρ₃(=γ)、ρ₄(=δ)、・・・の値を与える。

タイプ21、26、27のオペレータの場合はk個の機器が共通原因により同時に故障する確率をインプット・データにより与えられたρ_i値を基に、

$$P(C_k) = \frac{1}{mC_{k-1}} \prod_{i=1}^k \rho_i (1 - \rho_{k+1}) \times P_i \dots\dots\dots (45)$$

と求める。また、故独立故障の寄与分 $P\{T(A_i, B_i, \dots)\}$ を計算する時のオペレータのパラメータ値は

$$P'_i = (1.0 - \rho_2) \times P_i \dots\dots\dots (46)$$

$$P'_g = 1.0 - P'_i \dots\dots\dots (47)$$

とし、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時のパラメータ値は

$$P'_i = 1.0 \dots\dots\dots (48)$$

$$P'_g = 0.0 \dots\dots\dots (49)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算するときのパラメータ値は

$$P'_i = 0.0 \dots\dots\dots (50)$$

$$P'_g = 1.0 \dots\dots\dots (51)$$

と置き替えている。

タイプ35、37、38のオペレータの場合は故障率が与えら

れているので、 k 個の機器に共通に故障が発生する故障率を

$$\lambda_k = \frac{1}{mC_{k-1}} \prod_{i=1}^k \rho_i (1 - \rho_{k+1}) \times \lambda \quad \dots (52)$$

独立故障発生率を

$$\lambda' = (1 - \rho_2) \times \lambda \quad \dots (53)$$

とする。また、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \quad \dots (54)$$

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \quad \dots (55)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \quad \dots (56)$$

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \quad \dots (57)$$

と取り扱っている。

タイプ39オペレータは弁の開閉をモデル化しており開動作成功確率 P_o と閉動作成功確率 P_c の2種類の確率がパラメータ値として与えられている。それ故、 ρ 値もそれぞれに対応した、 ρ_{ok} 、 ρ_{ck} の2種類を与える。 k 個の機器にそれぞれ開閉動作に関する共通原因故障が発生する確率はそれぞれ

$$P(C_{ok}) = \frac{1}{mC_{k-1}} \prod_{i=1}^k \rho_{oi} (1 - \rho_{ok+1}) \times (1.0 - P_o) \quad \dots (58)$$

$$P(C_{ck}) = \frac{1}{mC_{k-1}} \prod_{i=1}^k \rho_{ci} (1 - \rho_{ck+1}) \times (1.0 - P_c) \quad \dots (59)$$

とし、独立故障を計算する時は

$$P'_o = P_o + (1 - \rho_{o2}) \times (1.0 - P_o) \quad \dots (60)$$

$$P'_c = P_c + (1 - \rho_{c2}) \times (1.0 - P_c) \quad \dots (61)$$

とする。共通原因故障からの寄与分は、 P_o 、 P_c それぞれについて計算し、次式の様に加え合わせる。

$$P(C_o) \times (P\{T_o(1, 1, \dots)\} - P\{T_o(0, 0, \dots)\}) + P(C_c) \times (P\{T_c(1, 1, \dots)\} - P\{T_c(0, 0, \dots)\}) \quad \dots (62)$$

ここで、 $P\{T_o(1, 1, \dots)\}$ は対象とする機器の開操作が確率1.0で失敗する場合のシステム全体の故障確率を意味する。他も同様の意味を持つ。

(3) α ファクター法： α_k 値を与える。

タイプ21、26、27のオペレータの場合は k 個の機器が共通原因により同時に故障する確率をインプット・データにより与えられた α_k 値を基に、

$$P(C_k) = \frac{k \cdot \alpha_k}{m-1C_{k-1} \cdot \alpha_t} \times P_t \quad \dots (63)$$

と求める。ただし、 $\alpha_t = \sum k \cdot \alpha_{ko}$ また、故独立故障の寄与分 $P\{T(A_i, B_i, \dots)\}$ を計算する時のオペレータのパラメータ値は

$$P'_o = (\alpha_{o1} / \alpha_k) \times P_o \quad \dots (64)$$

$$P'_c = 1.0 - P'_o \quad \dots (65)$$

とし、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時のパラメータ値は

$$P'_o = 1.0 \quad \dots (66)$$

$$P'_c = 0.0 \quad \dots (67)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算するときのパラメータ値は

$$P'_o = 0.0 \quad \dots (68)$$

$$P'_c = 1.0 \quad \dots (69)$$

と置き替えている。

タイプ35、37、38のオペレータの場合は故障率が与えられているので、 k 個の機器に共通に故障が発生する故障率を

$$\lambda_k = \frac{k \cdot \alpha_k}{m-1C_{k-1} \cdot \alpha_t} \times \lambda \quad \dots (70)$$

独立故障発生率を

$$\lambda' = (\alpha_{o1} / \alpha_k) \times \lambda \quad \dots (71)$$

とする。また、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \quad \dots (72)$$

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \quad \dots (73)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \quad \dots (74)$$

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \quad \dots (75)$$

と取り扱っている。

タイプ39オペレータは弁の開閉をモデル化しており開動作成功確率 P_o と閉動作成功確率 P_c の2種類の確率がパラメータ値として与えられている。それ故、 α 値もそれぞれに対応した、 α_{ok} 、 α_{ck} の2種類を与える。 k 個の機器にそれぞれ開閉動作に関する共通原因故障が発生する確率はそれぞれ

$$P(C_{ok}) = \frac{k \cdot \alpha_{ok}}{m-1C_{k-1} \cdot \alpha_{ot}} \times (1.0 - P_o) \quad \dots (76)$$

$$P(C_{ck}) = \frac{k \cdot \alpha_{ck}}{m-1C_{k-1} \cdot \alpha_{ct}} \times (1.0 - P_c) \quad \dots (77)$$

とし、独立故障を計算する時は

$$P'_o = P_o + (\alpha_{o1} / \alpha_k) \times (1.0 - P_o) \quad \dots (78)$$

$$P'_c = P_c + (\alpha_{c1} / \alpha_k) \times (1.0 - P_c) \quad \dots (79)$$

とする。共通原因故障からの寄与分は、 P_o 、 P_c それぞれについて計算し、次式の様に加え合わせる。

$$P(C_o) \times (P\{T_o(1, 1, \dots)\} - P\{T_o(0, 0, \dots)\}) + P(C_c) \times (P\{T_c(1, 1, \dots)\} - P\{T_c(0, 0, \dots)\}) \quad \dots (80)$$

ここで、 $P\{T_o(1, 1, \dots)\}$ は対象とする機器の開操作が確率1.0で失敗する場合のシステム全体の故障確率を意味する。他も同様の意味を持つ。

(4) BFR法： μ 、 P 、 ω 、 T_c (故障原因が作用するタイム・ポイント値) の値を与える。

タイプ21、26、27のオペレータの場合は特定の k 個の機器に共通原因故障が発生する確率をインプット・データにより与えられた値を基に、

$$P(C_k) = \mu \times P^k \times (1 - P)^{m-k}; \quad k=2 \sim m-1 \quad \dots (81)$$

$$P(C_m) = \mu \times P^m + \omega \quad \dots (82)$$

とする。独立故障の寄与分 $P\{T(A_i, B_i, \dots)\}$ を計算する時のオペレータのパラメータ値は

$$P'_i = P_i + \mu \times P \times (1 - P)^{m-1}, \dots \dots \dots (83)$$

$$P'_g = 1.0 - P'_i \dots \dots \dots (84)$$

とする。このモデルでは他のモデルと異なり、共通原因による故障が元々の故障確率に付加するとして取り扱っている。

$P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時のパラメータ値は

$$P'_i = 1.0 \dots \dots \dots (85)$$

$$P'_g = 0.0 \dots \dots \dots (86)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算するときのパラメータ値は

$$P'_i = 0.0 \dots \dots \dots (87)$$

$$P'_g = 1.0 \dots \dots \dots (88)$$

と置き替えている。

タイプ35、37、38のオペレータの場合故障率が与えられているが、k個の機器に共通原因により故障が発生する確率を機器の故障率 λ とは別に

$$P(C_k) = \mu \times P^k \times (1 - P)^{m-k}; \quad k=2 \sim m-1 \dots (89)$$

$$P(C_m) = \mu \times P_m + \omega \dots \dots \dots (90)$$

とする。独立故障発生率は、本来の故障率 λ をそのまま用いる。

$$\lambda' = \lambda \dots \dots \dots (91)$$

また、 $P\{T(1, 1, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \dots \dots \dots (92)$$

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \dots \dots \dots (93)$$

$P\{T(0, 0, \dots)\}$ を計算する時は

$$R(t) = S(t) \quad (\text{タイプ35、37オペレータ}) \dots \dots \dots (94)$$

$$R(t) = 0.0 \quad (\text{タイプ38オペレータ}) \dots \dots \dots (95)$$

とする取り扱いを故障原因が作用する時刻であるタイム・ポイント T_c 以降のみに適用する。

タイプ39オペレータは弁の開閉をモデル化しており開動作成功確率 P_o と閉動作成功確率 P_c の2種類の確率がパラメータ値として与えられている。それ故、 μ 、 P 、 ω 値もそれぞれに対応した、 (μ_o, P_o, ω_o) 、 (μ_c, P_c, ω_c) の2種類を与える。k個の機器にそれぞれ開閉動作に関する共通原因故障が発生する確率はそれぞれ

$$P(C_{ok}) = \mu_o \times P_o^k \times (1 - P_o)^{m-k}; \quad k=2 \sim m-1 \dots (96)$$

$$P(C_{om}) = \mu_o \times P_o^m + \omega \dots \dots \dots (97)$$

$$P(C_{ck}) = \mu_c \times P_c^k \times (1 - P_c)^{m-k}; \quad k=2 \sim m-1 \dots (98)$$

$$P(C_{cm}) = \mu_c \times P_c^m + \omega \dots \dots \dots (99)$$

とし、独立故障を計算する時は

$$P'_i = \mu_o \times P_o \times (1 - P_o)^{m-1} \dots \dots \dots (100)$$

$$P'_i = \mu_c \times P_c \times (1 - P_c)^{m-1} \dots \dots \dots (101)$$

とする。共通原因故障からの寄与分は、 P_o 、 P_c それぞれについて計算し、次式の様に加え合わせる。

$$P(C_o) \times (P\{T_o(1, 1, \dots)\} - P\{T_o(0, 0, \dots)\})$$

$$+ P(C_c) \times (P\{T_c(1, 1, \dots)\} - P\{T_c(0, 0, \dots)\}) \dots (102)$$

ここで、 $P\{T_o(1, 1, \dots)\}$ は対象とする機器の開操作が確率1.0で失敗する場合のシステム全体の故障確率を意味する。他も同様の意味を持つ。

9.6 解析実施例

図-25に示す加圧水型原子炉補助給水系 (FAWS) を取り上げて共通原因故障を考慮した解析を行い、GO-FLOW手法における共通原因故障の取り扱いの実際を見てみることにする。系には3台のポンプが備えられており、2台はそれぞれ個別の電動機により駆動される電動ポンプ、一台はタービン駆動ポンプである。電動ポンプは2基の蒸気発生器へ、タービン駆動ポンプは4基の蒸気発生器への給水が可能である。本給水系に要求される機能は最低2基の蒸気発生器に給水されることである。

タイム・ポイントとしては1~3を定義する。タイム・ポイント1は初期状態、タイム・ポイント2においてFAWS系の起動要求があり、タイム・ポイント3は運転開始後24時間後であるとした。このFAWS系をGO-FLOWチャートに表現すると図-26の様になる。

共通原因故障モデルとしてはMGL法を選定し、共通原因故障機器群としては、3台の電動およびタービン駆動ポンプの起動失敗、と2台の電動機の起動失敗を取り上げた。

図-26におけるオペレータでは(8, 10, 14)と(4, 12)の2組が対応している。パラメータ値としてはポンプの起動失敗については $\beta=0.697$ 、 $\gamma=0.304$ を、電動機の起動

失敗については $\beta=0.390$ を与えた。電動機については共通原因故障機器群の機器数が2個であるためパラメータ値は β 値のみで良い。

解析のための入力データは図-27、28の様になる。図-27は通常のGO-FLOW解析に用いられる入力データ(*.gfd)で、図-28が共通原因故障解析のためのデータ(*.ccf)である。図-28の一行目の"1"は共通原因故障解析を実施するという指標。2行目"2"は共通原因故障機器群の数、3行目の"4"はMGL法を選択するという意味。4~6行目は第1群についての情報。4行目は β 、 γ の値で5行目の0.0、0.0はタイプ39の時必要となる β_c 、 γ_c の値でこの例では対象外。6行目は対象とするオペレータ群の番号である。次の7~9行目は第2群についての情報である。

解析の最終結果の出力は図-29の様になる。従来のGO-FLOW解析結果が表形式出力中の第1行目に、独立故障からの寄与が第二行に記されている。第3行目からは同時に故障する機器の組み合わせ毎にシステム全体への故障確率の寄与が書かれている。最後に共通原因故障を全て考慮した結果が出ている。

本解析条件の場合3台のポンプの同時故障が全システムの失敗確率を支配していることがわかる。

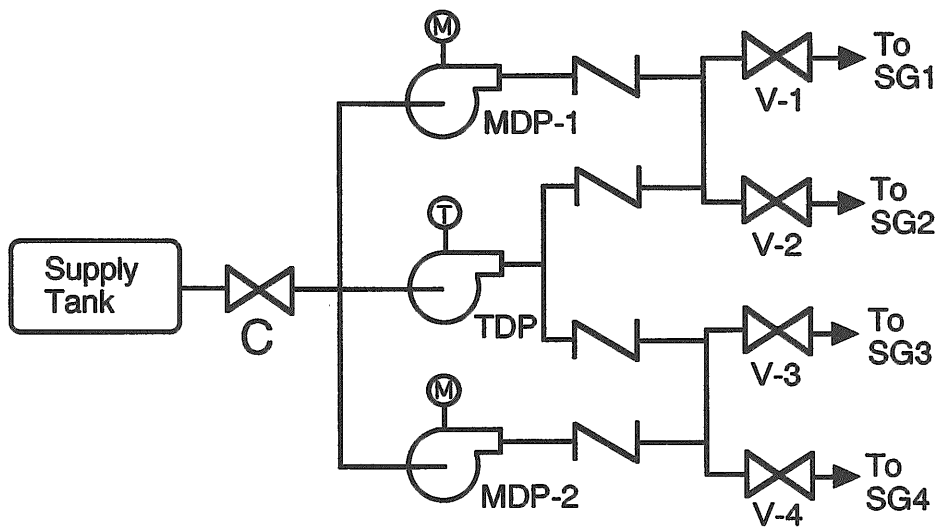
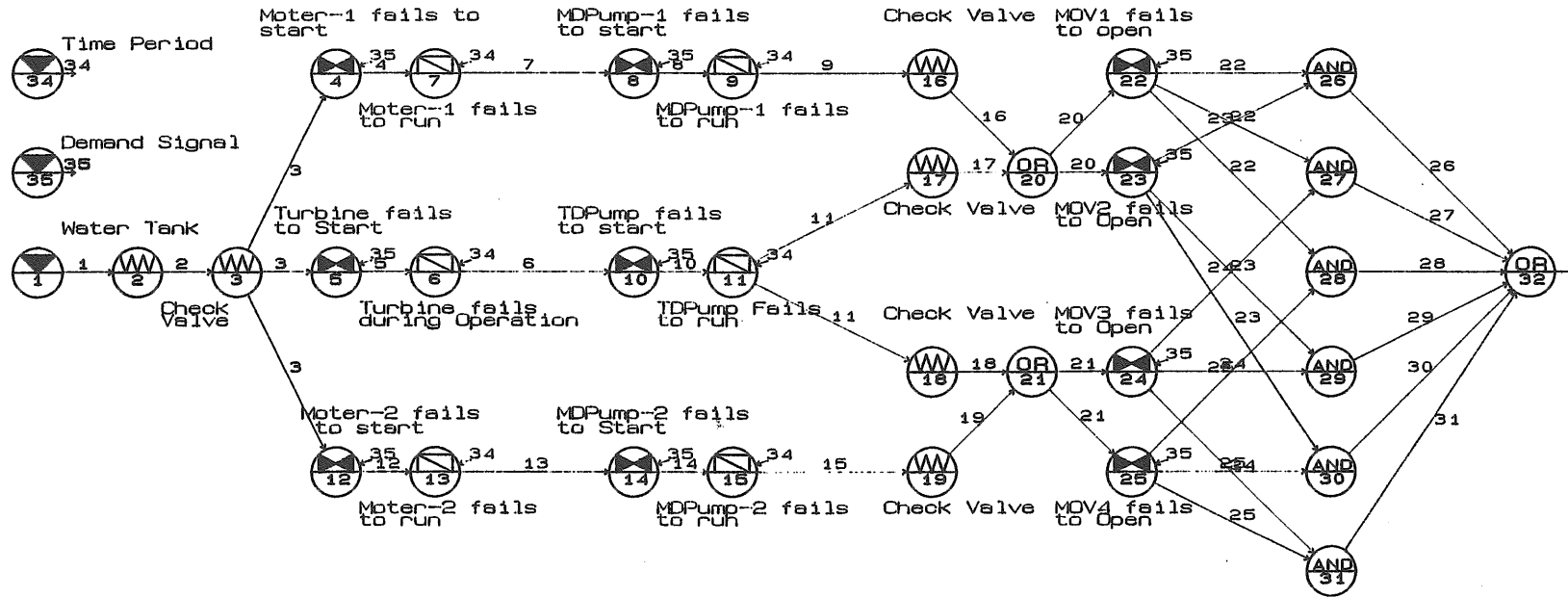


図-25 加圧水型原子炉補助給水系 (PWR-FAWS)



RELIABILITY ANALYSIS OF PWR-AFWS
 Fri Feb 03 16:29:54 1995 D: AFWS-0.DAT

図-26 FAWSのGO-FLOWチャート

RELIABILITY ANALYSIS OF PWR-AFWS(FOR CCF)

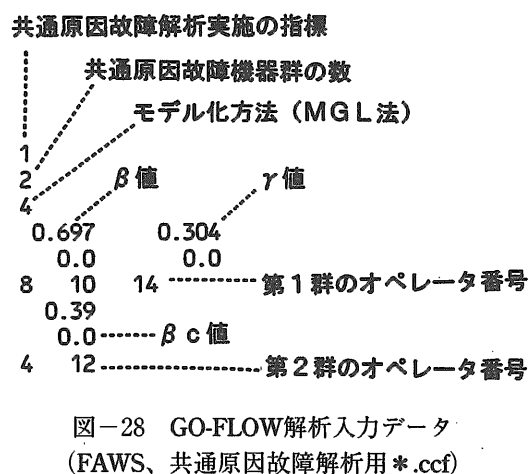
1	25	0	1							
2	21	2	2	1	1					
3	21	1	3	1	2					
4	26	3	4	1	3	1	35			
5	26	1	5	1	3	1	35			
6	35	2	6	1	5	1	34			
7	35	1	7	1	4	1	34			
8	26	3	8	1	7	1	35			
9	35	1	9	1	8	1	34			
10	26	3	10	1	6	1	35			
11	35	1	11	1	10	1	34			
12	26	3	12	1	3	1	35			
13	35	1	13	1	12	1	34			
14	26	3	14	1	13	1	35			
15	35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

0
21 1 0.999996 0 0
21 2 0.999998 0 0
26 1 0 0.9685 0 0
26 2 0 0.9957 0 0
26 3 0 0.99835 0 0
35 1 1.71E-05 0 0
35 2 0.00101 0 0

0
3
1 INITIAL STATE
2 OPERATION STARTS
3 24 HOURS AFTER

1	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
34	0.000E+00	0.000E+00	2.400E+01
35	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
0			
21	32		

図-27 GO-FLOW解析入力データ (FAWS、基本解析用*.gfd)



```

-----(( MGL METHOD ))-----

FINAL SIGNAL NUMBER
  32

COMMON CAUSE COMPONENT GROUPS & PARAMETER VALUES
( 8 10 14)   ROU11=1.000 ROU12= .697 ROU13= .304 ROU14= .000 ROU15= .000 ROU16= .000 ROU17= .000
              ROU21=1.000 ROU22= .000 ROU23= .000 ROU24= .000 ROU25= .000 ROU26= .000 ROU27= .000
( 4 12)      ROU11=1.000 ROU12= .390 ROU13= .000 ROU14= .000 ROU15= .000 ROU16= .000 ROU17= .000
              ROU21=1.000 ROU22= .000 ROU23= .000 ROU24= .000 ROU25= .000 ROU26= .000 ROU27= .000

ANALYSIS CONDITION          TIME POINTS
/COMPONENTS                 1           2           3
-----
ORDINARY ANALYSIS          1.00000E+00  8.24985E-06  1.09687E-05
-----
INDEPENDENT                1.00000E+00  6.84896E-06  8.53709E-06
  8,   10,   14,          .00000E+00  3.49608E-04  3.49607E-04
 10,   14,                .00000E+00  4.03329E-06  4.35772E-06
  8,   14,                .00000E+00  1.28002E-05  2.22326E-05
  8,   10,                .00000E+00  4.03329E-06  4.35772E-06
  4,   12,                .00000E+00  2.05814E-05  3.57477E-05
-----
TOTAL                      1.00000E+00  3.97905E-04  4.24840E-04
-----

-----
----- TOTAL ELAPSE TIME = 24.00000 SEC -----
-----

```

図-29 解析結果出力リスト (共通原因故障解析、最終結果部分)

10. 不確実さ解析機能

システムの信頼度には、構成機器の故障発生が本来ランダムな現象であることに起因する不確実さ幅が存在する。この不確実さ解析をGO-FLOW解析プログラムにおいて実施する機能を整備した⁵²⁾。

各構成機器の故障発生確率が一定の分布型に従うとして、分布型に従った故障発生確率値を乱数により与える。この様にしてランダムに選ばれた各構成機器の故障発生確率値の組み合わせについてシステムの故障発生確率を求め、これを多数回繰り返して、システム全体の故障発生の分布を求めるのが、いわゆるモンテカルロ法である。

GO-FLOW手法における不確実さ解析もモンテカルロ法を用いている。解析手順は図-30に示す様に二段階となっている。第一段階で従来のGO-FLOW解析と同等の解析を実施し、不確実さ解析の対象として選定した信号線につい

てミニマル・カット・セット (MCS) を求め中間ファイルに出力する。この段階では不確実さ解析を考慮せずに作成した従来のGO-FLOWチャートがそのまま使用できる。第二段階で、中間ファイルのMCS、信号線強度を基に、ユーザーの用意した不確実さ解析データを使用してモンテカルロ計算を実施する。

中間ファイルへはMCSを書き出すため、本来GO-FLOW手法では成功確率で解析を進めているが、この段階では故障確率表示に変換し故障事象の積によりMCSを記述している。

第二段階におけるより詳細な解析の流れを図-31に示す。

解析結果としては、解析条件、メディアン値、平均値、90%信頼度幅、標準偏差、エラー・ファクター、累積確率分布、確率密度分布が、各々の信号線、タイム・ポイント毎に得られる。

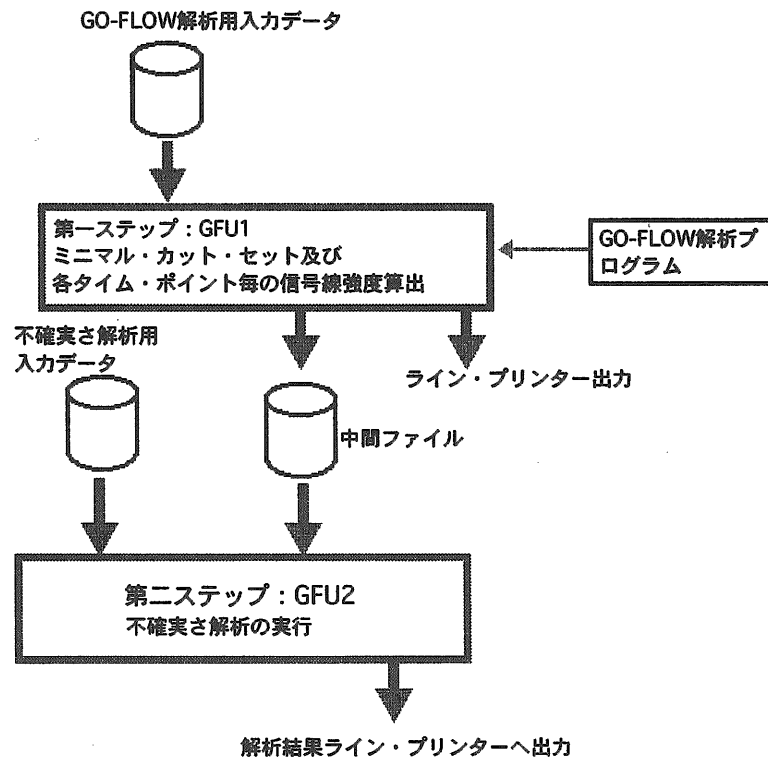


図-30 GO-FLOWにおける不確実さ解析実施手順

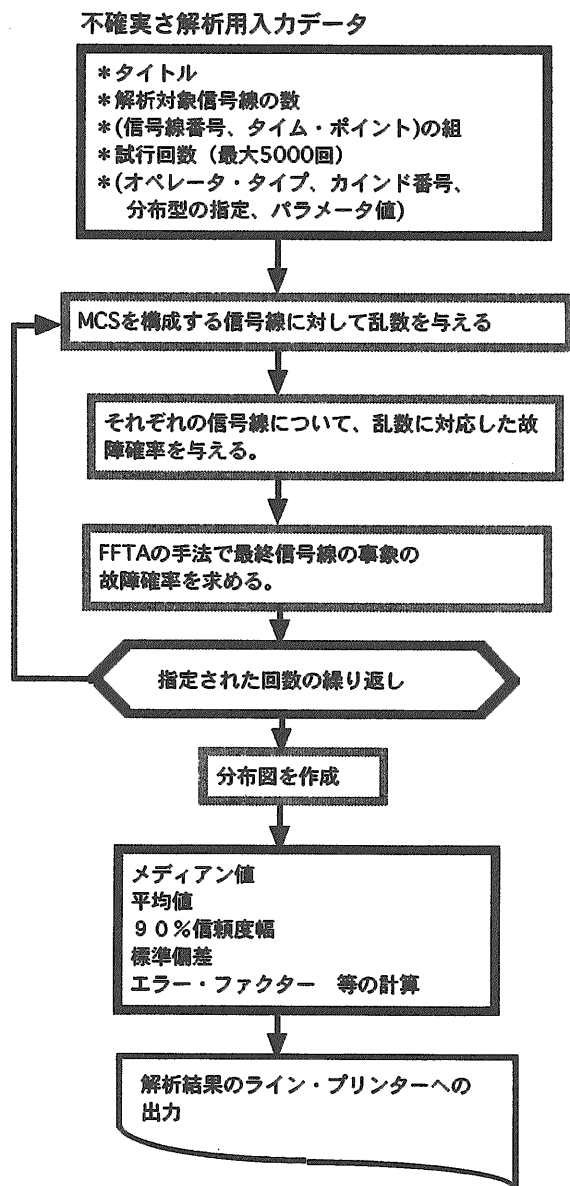


図-31 不確実さ解析第二段階実施手順

10.1 故障確率の分布型

乱数を用いて各機器に故障確率値を割り振るために用意した分布型は、正規分布、対数正規分布、一様分布、対数一様分布、ガンマ分布、二項分布、ワイブル分布、ベータ分布、ヒストグラム分布である。

以下、各分布型について乱数から分布型に従う故障率を求める方法の概略および必要とするパラメータ値について説明する。

(1) 正規分布：平均値 μ 、標準偏差 σ

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots (103)$$

[0.0-1.0] の間での一様乱数の値を12個求め和を取る。

(312)

この値が中心極限定理により平均値6.0の規格化された正規分布に従っている。入力パラメータの μ 、 σ を基に求める正規分布に従う値を得る。

(2) 対数正規分布：メディアン値 μ 、エラーファクター EF

$$f(X) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log x - \log \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (104)$$

(1) と同様にして $\log(\mu)$ を平均値、 $\log(EF) / 1.64$ を分散とする正規分布に従う値 X を求めると、 e^x が対数正規分布に従う値となる。

(3) ガンマ分布： α

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-t}}{\Gamma(\alpha)} \dots\dots\dots (105)$$

平均して単位時間に1回起こる独立な事象をある時刻から観測した時、ちょうど α 個目の事象が起こるまでの時間 t がガンマ分布に従っている。そこで、この分布においては他の分布型とやや異なる取り扱いをしている。乱数により求めた t の値は故障率の逆数に比例するため平均値 $t_m (= \alpha)$ との比 (t_m/t) を元の故障確率(故障率)に乗じて乱数に対応した故障確率(故障率)を求める。

(4) 二項分布：確率値 p 、試行回数 n

$$f(r) = {}_n C_r \cdot p^r \cdot (1-p)^{n-r} \dots\dots\dots (106)$$

n 回の試行において [0.0-1.0] 間での一様乱数が確率値 p より小となる回数 r を求めると上式の分布型に従っている。

(5) ベータ分布： α 、 β

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{\beta-1} \dots\dots\dots (107)$$

この分布は上下限のある分布を表すのに便利である。一様乱数 rnd からこの分布型に従う乱数値 x は次の方法により求める。

$$A = rnd^{1/\alpha}, B = rnd^{1/\beta}$$

より求めた A 、 B の和 $A+B$ が 1.0 より小の場合に

$$x = A / (A+B) \dots\dots\dots (108)$$

とする。

(6) ワイブル分布： m 、 η 、 γ

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right), (\gamma \leq t < \infty) \dots (109)$$

ワイブル分布は機器の故障が発生する時刻 t の分布を表現するために用いられている。この分布においてもガンマ分布と同様の取り扱いをする。乱数により求めた t の値は故障発生までの時間と解釈されるため平均値 t_m との比 (t_m/t) を元の故障確率(故障率)に乗じて乱数に対応した故障確率(故障率)を求める。

累積確率分布関数 $F(t)$ は

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left((t-\gamma)/\eta\right)^m\right\} = r \dots\dots\dots (110)$$

となり、この逆関数は

$$t = F^{-1}(r) = \gamma \{-\log(1-r)\}^{1/\gamma} + \gamma \dots\dots\dots (111)$$

と求まる。rが[0.0-1.0]の間での一様乱数であればtはワイブル分布に従う乱数となる。さらに、(1-r)も[0.0-1.0]の間での一様乱数であるので、

$$t = F^{-1}(1-r) = \gamma \{-\log(r)\}^{1/\gamma} + \gamma \dots\dots\dots (112)$$

と、より簡単な式よりワイブル分布に従う乱数tが求まる。

(7) 一様分布：上限値、下限値

[0.0-1.0]の間での一様乱数の値を[下限値-上限値]間の乱数に変換する。

(8) 対数一様分布：メディアン値μ、分布幅EF

[0.0-1.0]の間での一様乱数の値を下限値(log(μ) - log(EF))、上限値(log(μ) + log(EF))間の乱数Xに変換すると、e^xが求める値となる。

(9) ヒストグラム分布：ID番号(ファイル参照用)

0.0~1.0の間を最大20区間までの範囲で分割し、各区間の累積確率値を与えたNAMELIST形式のデータ・ファイルを用意しておく。GO-FLOW不確実さ解析用の入力データを読み込むと同一のID番号を持ったヒストグラム・データが参照される。

図-32には、乱数及び分布型をもとにして各信号線に故障確率を割り当てる手順を示す。つまり、信号線の強度をI(t)とすると故障確率をF(t) = 1.0 - I(t)より求め、乱数をもとに割り当てる故障確率F'(t)をF'(t) = F(t) · Dにより計算する。その際、入力データでは与えられていない平均値あるいはメディアン値の算出は次の様にする。ガンマ分布：t_m = α、二項分布np、ベータ分布：α / (α + β)、ワイブル分布：t_m = γ + η (log_e 2)^{1/γ}、一様分布：(上限値+下限値) / 2、ヒストグラム分布：中央値を計数、対数一様分布：中央値を計数。

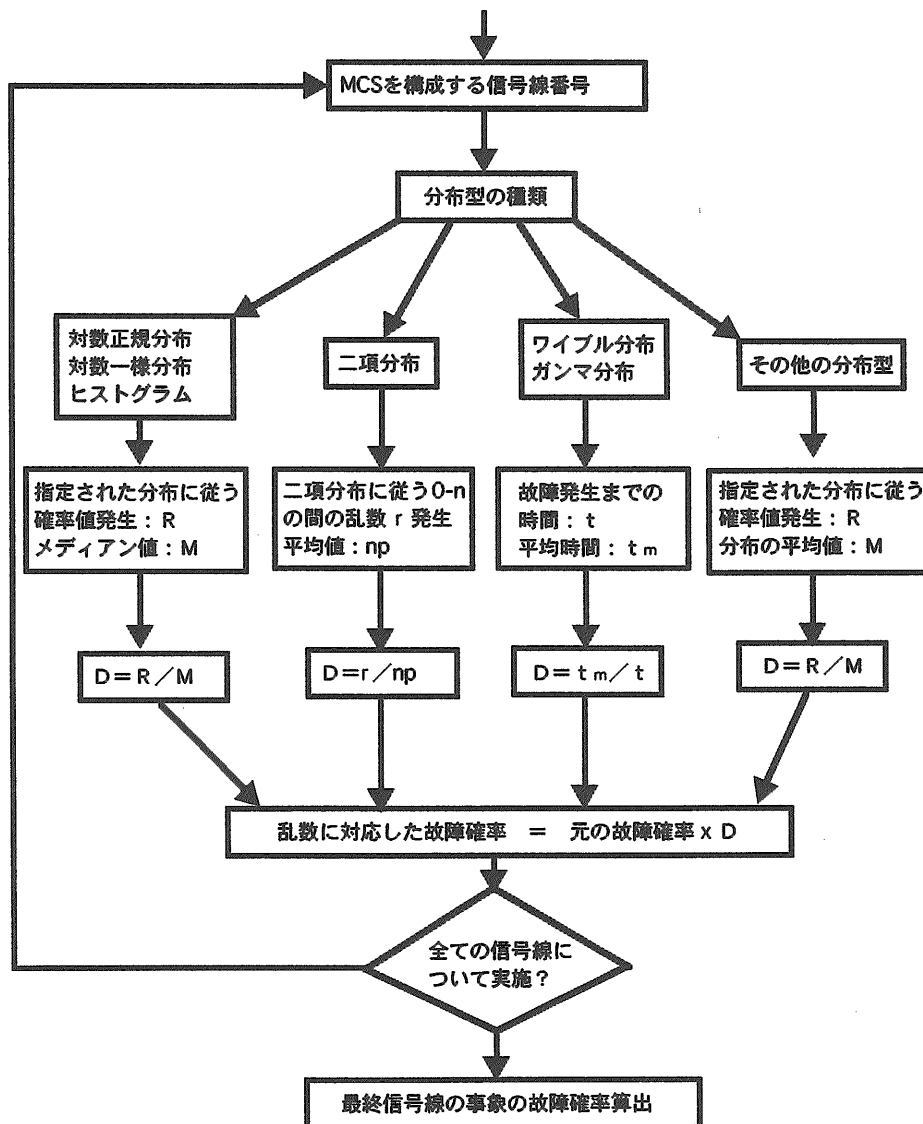


図-32 乱数による故障確率割り当て方法

10.2 解析実施例

解析実施対象として図-2に示すフォールト・ツリーを取り上げる。このフォールト・ツリーはもともとラスマッセン報告¹⁾の中に出てくるものであり、解析結果の検証が容易にできるために選定した。このフォールト・ツリーでは共通原因故障を明示的に取り扱っており、特にどの機器間の同時故障であるかは問題にしていない。

このフォールト・ツリーと等価になるGO-FLOWチャートを作成すると図-33となる。フォールト・ツリーを書き換えており、元となるシステムの系統図が特に存在するわけではない。フォールト・ツリー解析では、ある一時刻における故障発生確率しか得られないが、このGO-FLOWによる解析においてはタイム・ポイント4まで定義し、それぞれ初期状態(タイム・ポイント1)から1、2、10時間経過後とした。タイム・ポイント2における状態がフォールト・ツリー解析と一致する様に故障率を与えた。図-34、35に入力データを示す。図-34が通常のGO-FLOW解析のための入力データ(*.gfd)で、図-35が不確実さ解析のための入力データ(*.u)である。今の場合解析対象は最終信号線(22番)で試行回数は5000回、分布型は全ての基事象について対数正規分布を与えた。

図-36~41に信号線番号22タイム・ポイント2における

ライン・プリンターによる出力例を示す。図-36は解析条件でモンテカルロ計算におけるパラメータ値等が表形式で記述されている。図-37は解析結果の数値による記述で、各信号線、タイムポイント毎に、分布における最大値、最小値、平均値、分散、標準偏差、中央値、エラー・ファクター、5%下限値、95%上限値及び累積確率分布の表が与えられている。図-38は確率密度分布の通常スケールでの表示、図-39は確率密度分布の対数スケールでの表示、図-40は累積確率分布の通常スケールでの表示、図-41は累積確率分布の対数スケールでの表示例である。このタイム・ポイント2における解析結果はラスマッセン報告の結果と完全に一致していた。更に、標準で用意されている全ての分布型について解析を実施し妥当な結果が得られた⁵⁾。解析においてはオペレータ毎に異なった分布型を自由に組み合わせて割り当てる事も可能である。

不確実さ解析をGO-FLOW手法において実施する機能が整備され、GO-FLOWの特長を生かし時間経過に伴う不確実さ分布の推移の様子が容易に求められる様になった。また、フォールト・ツリーの頂上事象に対応した単一事象だけでなくシステム内の任意の位置における信頼度の不確実さ分布も同時に得ることができる。

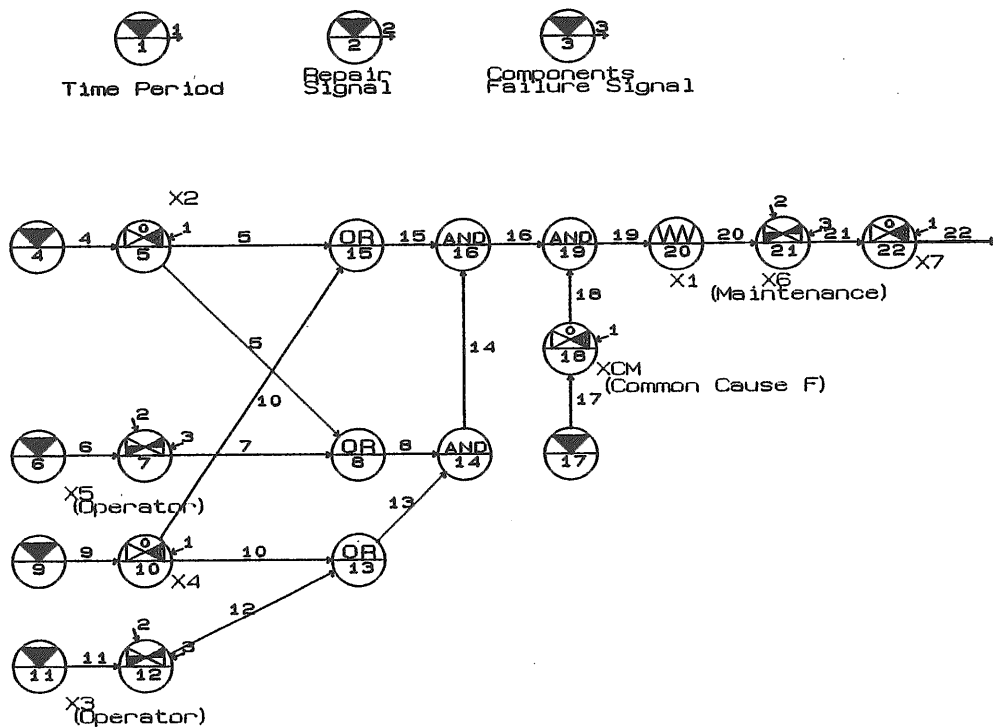


図-33 サンプル・フォールト・ツリーのGO-FLOWチャート

UNCERTAINTY ANALYSIS FOR SAMPLE-TREE (TEST1)

1	25	0	1					
2	25	0	2					
3	25	0	3					
4	25	0	4					
5	37	3	5	1	4	1	1	
6	25	0	6					
7	39	2	7	1	6	2	2	3
8	22	0	8	2	5	7		
9	25	0	9					
10	37	4	10	1	9	1	1	
11	25	0	11					
12	39	3	12	1	11	2	2	3
13	22	0	13	2	10	12		
14	30	0	14	2	13	8		
15	22	0	15	2	5	10		
16	30	0	16	2	15	14		
17	25	0	17					
18	37	2	18	1	17	1	1	
19	30	0	19	2	16	18		
20	21	1	20	1	19			
21	39	1	21	1	20	2	2	3
22	37	1	22	1	21	1	1	
23	21	2	23	1	22			
0								
21	1		0.999		0.0		0.0	
21	2		1.0		0.0		0.0	
37	1		0.000001		0.0		0.0	
37	2		0.001		0.0		0.0	
37	3		0.03046		0.0		0.0	
37	4		0.03046		0.0		0.0	
39	1		0.5		0.003		1.0	
39	2		0.7		0.01		1.0	
39	3		0.7		0.01		1.0	
0								
4								
1			INITIAL STATE					
2			1 HOUR AFTER					
3			2 HOURS AFTER					
4			10 HOURS AFTER					
1								
0.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	8.000E+00					
2								
0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
3								
0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00					
4								
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
6								
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
9								
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
11								
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
17								
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00					
0								
22								

図-34 GO-FLOW解析入力データ
(サンプル・フォールト・ツリー、基本解析用*.gfd)

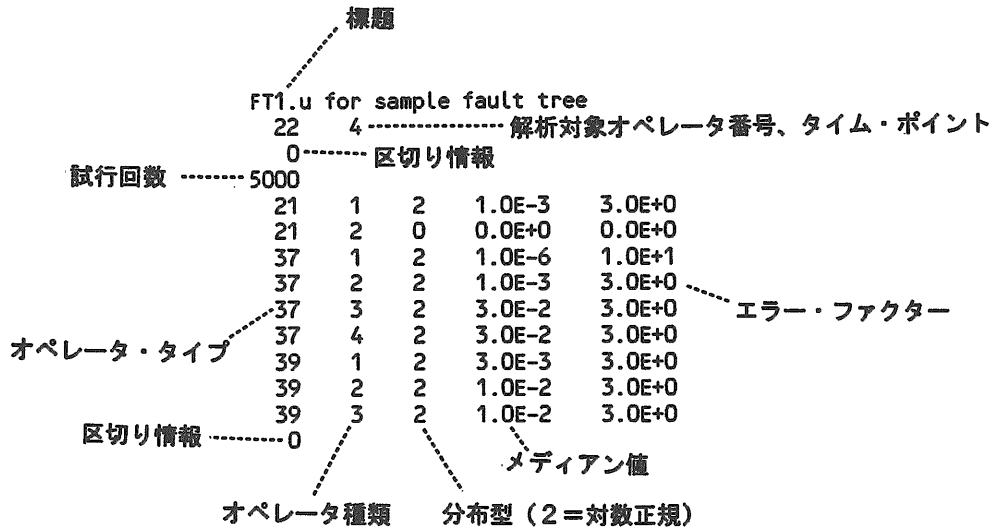


図-35 GO-FLOW解析入力データ
(サンプル・フォルト・ツリー、不確実さ解析用*.u)

```

*****
*
* << GFU2 >> GO-FLOW UNCERTAINTY ANALYSIS PROGRAM / SECOND STEP
*
* --- FT1.u for sample fault tree ---
*
*****
===== ANALYSIS CONDITION =====

NUMBER OF TRIAL : 5000

D.T. : DISTRIBUTION TYPE
1:NORMAL      2:LOGNORMAL    3:GAMMA
4:BINOMINAL  5:BETA              6:WEIBULL
7:UNIFORM    8:HISTGRAM         9:LOG-UNIF

NUMBER TYPE KIND D.T. ORIGINAL VALUE DISTRIBUTION PARAMETER MEAN(MEDIAN)
-----
1 25 0 0
2 25 0 0
3 25 0 0
4 25 0 0
5 37 3 2 3.05E-02 .00E+00 .00E+00 3.00E-02 3.00E+00 .00E+00 3.00E-02
6 25 0 0
7 39 2 2 7.00E-01 1.00E-02 1.00E+00 1.00E-02 3.00E+00 .00E+00 1.00E-02
8 22 0 0
9 25 0 0
10 37 4 2 3.05E-02 .00E+00 .00E+00 3.00E-02 3.00E+00 .00E+00 3.00E-02
11 25 0 0
12 39 3 2 7.00E-01 1.00E-02 1.00E+00 1.00E-02 3.00E+00 .00E+00 1.00E-02
13 22 0 0
14 30 0 0
15 22 0 0
16 30 0 0
17 25 0 0
18 37 2 2 1.00E-03 .00E+00 .00E+00 1.00E-03 3.00E+00 .00E+00 1.00E-03
19 30 0 0
20 21 1 2 9.99E-01 .00E+00 .00E+00 1.00E-03 3.00E+00 .00E+00 1.00E-03
21 39 1 2 5.00E-01 3.00E-03 1.00E+00 3.00E-03 3.00E+00 .00E+00 3.00E-03
22 37 1 2 1.00E-06 .00E+00 .00E+00 1.00E-06 1.00E+01 .00E+00 1.00E-06
23 21 2 0 1.00E+00 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .00E+00 .00E+00
    
```

図-36 不確実さ解析結果出力リスト (解析条件)

--- FT1.u for sample fault tree

SIGNAL NUMBER= 22, TIME POINT= 4, NUMBER OF MCS= 7

MINIMUM	= 7.45E-03	MD	= 8.51E-02
MAXMUM	= 1.00E+00	EF	= 3.58E+00
MEAN	= 1.15E-01	CL05%	= 2.38E-02
VARIANCE	= 1.09E-02	CL95%	= 3.05E-01
S.D.	= 1.04E-01		

CUMULATIVE PROBABILITY DENSITY.

5.0%	2.68E-02
10.0%	3.35E-02
15.0%	3.95E-02
20.0%	4.51E-02
25.0%	5.06E-02
30.0%	5.64E-02
35.0%	6.17E-02
40.0%	6.78E-02
45.0%	7.50E-02
50.0%	8.22E-02
55.0%	9.10E-02
60.0%	1.00E-01
65.0%	1.13E-01
70.0%	1.26E-01
75.0%	1.42E-01
80.0%	1.61E-01
85.0%	1.89E-01
90.0%	2.29E-01
95.0%	3.14E-01
100.0%	1.00E+00

図-37 不確実さ解析結果出力リスト
(解析結果、数値表現)

```

--- FT1.u for sample fault tree ---

SIGNAL NUMBER= 22, TIME POINT= 4, NUMBER OF MCS= 7

LINEAR SCALE : PROBABILITY DENSITY.
%
7.00E-03      1.9 *****
3.50E-02 *    21.8 *****
6.31E-02      22.7 *****
9.11E-02 D    15.5 *****
1.19E-01 E    10.3 *****
1.47E-01      7.6 *****
1.75E-01      5.1 *****
2.03E-01      3.7 *****
2.31E-01      2.8 *****
2.59E-01      1.7 *****
2.87E-01      1.1 *****
3.15E-01 *    1.1 *****
3.43E-01      .7 *****
3.71E-01      .7 *****
3.99E-01      .7 *****
4.27E-01      .4 *****
4.55E-01      .4 *****
4.83E-01      .3 *****
5.11E-01      .3 *****
5.39E-01      .1 *****
5.68E-01      .3 *****
5.96E-01      .1 *****
6.24E-01      .1 *****
6.52E-01      .1 *****
6.80E-01      .1 *****
7.08E-01      .1 *****
7.36E-01      .0 *****
7.64E-01      .0 *****
7.92E-01      .0 *****
8.20E-01      .0 *****
8.48E-01      .0 *****
8.76E-01      .0 *****
9.04E-01      .0 *****
9.32E-01      .0 *****
9.60E-01      .0 *****
9.88E-01      .1 *****
1.02E+00      .0 *****
1.04E+00      .0 *****
1.07E+00      .0 *****
1.10E+00      .0 *****

*:CLOS,CL95

```

図-38 不確かさ解析結果 (確率密度分布)

```

--- FT1.u for sample fault tree ---

SIGNAL NUMBER= 22, TIME POINT= 4, NUMBER OF MCS= 7

LOG SCALE : PROBABILITY DENSITY.
%
1.00E-03      .0 *****
1.27E-03      .0 *****
1.60E-03      .0 *****
2.05E-03      .0 *****
2.57E-03      .0 *****
3.26E-03      .0 *****
4.12E-03      .0 *****
5.22E-03      .0 *****
6.61E-03      .0 *****
8.38E-03      .0 *****
1.06E-02      .1 *****
1.34E-02      .3 *****
1.70E-02      .9 *****
2.15E-02 *    2.3 *****
2.73E-02      4.0 *****
3.46E-02      6.6 *****
4.38E-02      9.6 *****
5.54E-02      11.6 *****
7.02E-02 D    12.1 *****
8.89E-02 E    12.3 *****
1.13E-01      9.4 *****
1.43E-01      7.0 *****
1.80E-01      5.7 *****
2.29E-01 *    2.9 *****
3.47E-01      2.2 *****
4.64E-01      1.4 *****
5.88E-01      .6 *****
7.44E-01      .2 *****
9.43E-01      .1 *****
1.19E+00      .0 *****
1.51E+00      .0 *****
1.91E+00      .0 *****
2.42E+00      .0 *****
3.07E+00      .0 *****
3.89E+00      .0 *****
4.92E+00      .0 *****
6.24E+00      .0 *****
7.90E+00      .0 *****
1.00E+01      .0 *****

*:CLOS,CL95

```

図-39 不確かさ解析結果 (確率密度分布、対数目盛)

--- FT1.u for sample fault tree

SIGNAL NUMBER= 22, TIME POINT= 4, NUMBER OF MCS= 7

LINEAR SCALE : CUMULATIVE PROBABILITY DENSITY.

	%	*
7.00E-03	1.9	*
3.50E-02 *	23.7	*****
6.31E-02	46.5	*****
9.11E-02	62.0	*****
1.19E-01	72.3	*****
1.47E-01	79.9	*****
1.75E-01	85.0	*****
2.03E-01	88.7	*****
2.31E-01	91.5	*****
2.59E-01	93.3	*****
2.87E-01	94.4	*****
3.15E-01 *	95.5	*****
3.43E-01	96.2	*****
3.71E-01	96.9	*****
3.99E-01	97.6	*****
4.27E-01	98.0	*****
4.55E-01	98.4	*****
4.83E-01	98.7	*****
5.11E-01	99.0	*****
5.39E-01	99.1	*****
5.68E-01	99.3	*****
5.96E-01	99.4	*****
6.24E-01	99.5	*****
6.52E-01	99.6	*****
6.80E-01	99.6	*****
7.08E-01	99.7	*****
7.36E-01	99.7	*****
7.64E-01	99.8	*****
7.92E-01	99.8	*****
8.20E-01	99.8	*****
8.48E-01	99.8	*****
8.76E-01	99.9	*****
9.04E-01	99.9	*****
9.32E-01	99.9	*****
9.60E-01	99.9	*****
9.88E-01	100.0	*****
1.02E+00	100.0	*****
1.04E+00	100.0	*****
1.07E+00	100.0	*****
1.10E+00	100.0	*****

*:CL05,CL95

図-40 不確実さ解析結果 (累積確率分布)

--- FT1.u for sample fault tree

SIGNAL NUMBER= 22, TIME POINT= 4, NUMBER OF MCS= 7

LOG SCALE : CUMULATIVE PROBABILITY DENSITY.

	%	*
1.00E-03	.0	
1.27E-03	.0	
1.60E-03	.0	
2.03E-03	.0	
2.57E-03	.0	
3.26E-03	.0	
4.12E-03	.0	
5.22E-03	.0	
6.61E-03	.0	
8.38E-03	.0	
1.06E-02	.1	
1.34E-02	.4	
1.70E-02	1.4	*
2.15E-02 *	3.7	***
2.73E-02	7.7	*****
3.46E-02	14.3	*****
4.38E-02	23.9	*****
5.54E-02	35.5	*****
7.02E-02	47.6	*****
8.89E-02	59.9	*****
1.13E-01	70.4	*****
1.43E-01	79.8	*****
1.80E-01	86.8	*****
2.29E-01	92.5	*****
2.89E-01 *	95.4	*****
3.67E-01	97.6	*****
4.64E-01	99.0	*****
5.88E-01	99.6	*****
7.44E-01	99.8	*****
9.43E-01	100.0	*****
1.19E+00	100.0	*****
1.51E+00	100.0	*****
1.91E+00	100.0	*****
2.42E+00	100.0	*****
3.07E+00	100.0	*****
3.89E+00	100.0	*****
4.92E+00	100.0	*****
6.24E+00	100.0	*****
7.90E+00	100.0	*****
1.00E+01	100.0	*****

*:CL05,CL95

図-41 不確実さ解析結果 (累積確率分布、対数目盛)

11. 共通原因故障を考慮した不確実さ解析機能

信頼性解析結果の判断のためには点推定値だけでは不十分で不確実さ幅の情報が不可欠となる。そのために前章で示した不確実さ解析機能をGO-FLOW手法に整備した。一方、共通原因故障からのシステム全体の信頼度への影響を調べると、考慮しない場合に比較して場合によっては何桁も信頼度が低下してしまう場合が出てくる。それ故、共通原因故障を考慮した上での不確実さ解析が信頼性解析結果の判断のためには必要となってくる。

前章で示した不確実さ解析方法は二段階の方法を取っており、第一段階でミニマル・カット・セットを求め、第二段階で各機器の故障確率値を分布型に従い乱数を用いて割り当て、多数回の試行を繰り返す方法を取っている。この方法では比較的短い計算時間で解析が完了する。しかし、共通原因故障解析を実施する際には同時に故障する機器の種々の組み合わせを考慮する必要があり、同時故障が発生した場合ミニマル・カット・セットの形も変わってきってしまう。また、近年の計算機能力の向上もあり従来困難であった長時間を要する計算も実施可能となってきた。

そこで、本機能においては図-42に示す解析手順により直接的に不確実さ幅を求める方法を採用した。この方法では、各分布型に従って分布する乱数より求めた値Dを直接オペレータのパラメータ値に乗じて新たな入力データを作成してしまう（前章の方法では第一段階の解析の結果得られた各タイム・ポイント毎の信号線強度に対してDを適用

する）。図-43に示す通常のGO-FLOW解析用入力データの網掛けの部分の乱数に対応して書き換えられる。このデータに対して第9章で示した共通原因故障解析の手法を適用する。この手順を多数回繰り返し、結果を集積して不確実さ幅を求める。

パラメータ値にDを乗ずる方法は各オペレータ毎に次の様になっている。

タイプ21オペレータ： $P_g' = 1 - (1 - P_g) \cdot D$

タイプ26、27オペレータ： $P_g' = 1 - P_p - (1 - P_p - P_g) \cdot D$

タイプ35、37、38オペレータ： $\lambda' = \lambda \cdot D$

タイプ39オペレータ： $P_o' = P_o \cdot D, P_r' = P_r \cdot D$

不確実さ解析の際適用できる分布型は、前章の場合と同じく、正規分布、対数正規分布、一様分布、対数一様分布、ガンマ分布、二項分布、ワイブル分布、ベータ分布、ヒストグラム分布である。また、共通原因故障のモデルとしては、 β ファクタ法、BFR法、 α ファクタ法、MGL法が使用できる。

また、前章で示した不確実さ解析の方法では、ミニマル・カット・セットを求める手順を必要としていた。フェーズド・ミッション問題は第8章で示したように信号線間の従属性を異なったタイム・ポイント間で取り扱うため特別な工夫をしている。そのため、前章の方法での不確実さ解析を実施することは困難であった。本章で示した直接的に不確実さ幅を求める方法により、フェーズド・ミッション問題においても不確実さ解析が可能となった。

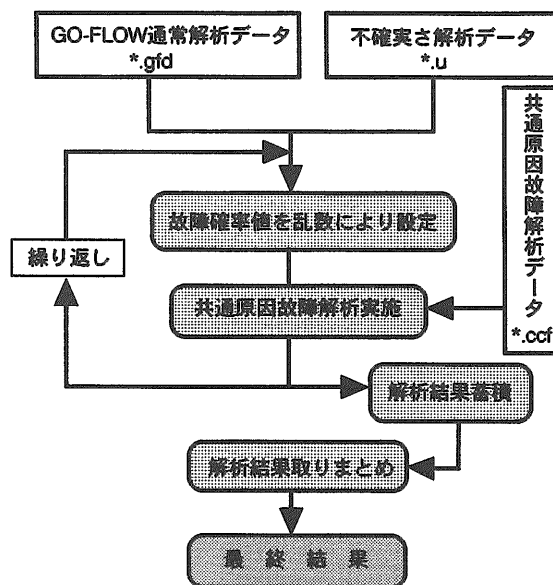


図-42 共通原因故障を考慮した不確実さ解析実施手順

11.1 解析実施例

解析対象としては第9章の共通原因故障解析において取り上げた加圧水型原子炉補助給水系 (FAWS) を、ここでも取り上げる事にする。

解析対象の系は図-25に示したもので、対応するGO-FLOWチャートは第9章において作成した図-26がそのまま使用できる。解析のための入力データはそれぞれ、図-27、28に示した*.gfd、*.ccfがそのまま使用できる。不確かさ解析のための入力データは図-35と同様のフォーマットで図-44の様に作成し、拡張子*.uを付けて置く。*.gfd、*.ccf、*.uの3種類のデータ・ファイルを用意して置けば、あとはプログラムが自動的にこれらのデータを結合し、共通原因故障を考慮した不確かさ解析を実施する。

不確かさ解析の条件としては、この例ではタンク、チェック弁の故障には正規分布、電動機、タービンの起動失敗、モータ駆動弁の開操作失敗には対数正規分布、電動機・タービン・ポンプの運転中の故障にはヒストグラム分布を与えた。ヒストグラム分布のためのNAMELISTデータ・ファイルは図-45の様に用意した。試行回数は5000回とした。

共通原因故障を考慮しない場合のシステムの故障確率は運転開始後24時間後 (タイム・ポイント3) において 1.80×10^{-5} (メディアン値) であり、そのときの確率密度分布は図-46のようになる。これに対して共通原因故障を考慮した場合は 4.89×10^{-4} (メディアン値) となり、確率密度分布は図-47のようになる。この解析条件の場合には共通原因故障を考慮することによりシステムの信頼度が大幅に低下している。不確かさ幅はエラーファクター値で見ると12.7から3.20へと減少している。これは、共通原因故障による3台のポンプの同時故障という単一の事象が全システムの失敗確率を支配しているため分布幅が狭くなったためである。

RELIABILITY ANALYSIS OF PWR-AFWS (FOR CCF)

1	25	0	1							
2	21	2	2	1	1					
3	21	1	3	1	2					
4	26	3	4	1	3	1	35			
5	26	1	5	1	3	1	35			
6	35	2	6	1	5	1	34			
7	35	1	7	1	4	1	34			
8	26	3	8	1	7	1	35			
9	35	1	9	1	8	1	34			
10	26	3	10	1	6	1	35			
11	35	1	11	1	10	1	34			
12	26	3	12	1	3	1	35			
13	35	1	13	1	12	1	34			
14	26	3	14	1	13	1	35			
15	35	1	15	1	14	1	34			
16	21	1	16	1	9					
17	21	1	17	1	11					
18	21	1	18	1	11					
19	21	1	19	1	15					
20	22	0	20	2	17		16			
21	22	0	21	2	19		18			
22	26	2	22	1	20	1	35			
23	26	2	23	1	20	1	35			
24	26	2	24	1	21	1	35			
25	26	2	25	1	21	1	35			
26	30	0	26	2	23	2	22			
27	30	0	27	2	24	2	22			
28	30	0	28	2	22	2	25			
29	30	0	29	2	23	2	24			
30	30	0	30	2	25	2	23			
31	30	0	31	2	25	2	24			
32	22	0	32	6	26	27	28	29	30	31
34	25	0	34							
35	25	0	35							
0										
21	1	0.999996				0			0	
21	2	0.999998				0			0	
26	1	0				0.9685			0	
26	2	0				0.9957			0	
26	3	0				0.99835			0	
35	1	1.71E-05				0			0	
35	2	0.00101				0			0	
0										
3										
1	INITIAL STATE									
2	OPERATION STARTS									
3	24 HOURS AFTER									
1										
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00								
34										
0.000E+00	0.000E+00	2.400E+01								
35										
0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00								
0										
21	32									

図-43 乱数による故障率データの変更部分

```

==== PWR1.GFD & PWR1.CCF & PWR1.U ====
 32 3
 0
5000
 21 1 1 1.0E-1 1.0E-4
 21 2 1 1.0E-3 1.0E-4
 26 1 2 1.0E-3 5.0
 26 2 2 3.0E-3 3.0
 26 3 2 1.0E-3 3.0
 35 1 8 1.
 35 2 2 1.0E-3 5.0
 0

```

標題
 参照ファイル名
 pwr1nd.dat
 分布型 (8 = ヒストグラム分布)

図-44 GO-FLOW解析入力データ (不確実さ解析用*.u)

```

&HIST
  ID=1,
  NCLS=9,
  CLS = 1.0E-6, 3.0E-6, 1.0E-5, 3.0E-5, 1.0E-4, 3.0E-4, 1.0E-3, 3.0E-3, 0.01,
  CPD = 0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.75, 0.9, 0.95, 1.0,-----累積値
&END

&HIST
  ID = 2,
  NCLS= 3,
  CLS = 0.1,0.2,0.3,
  CPD = 0.0,0.5,1.0,
&END

```

分布の種類番号
 分割数

図-45 ヒストグラム分布指定のための入力データ

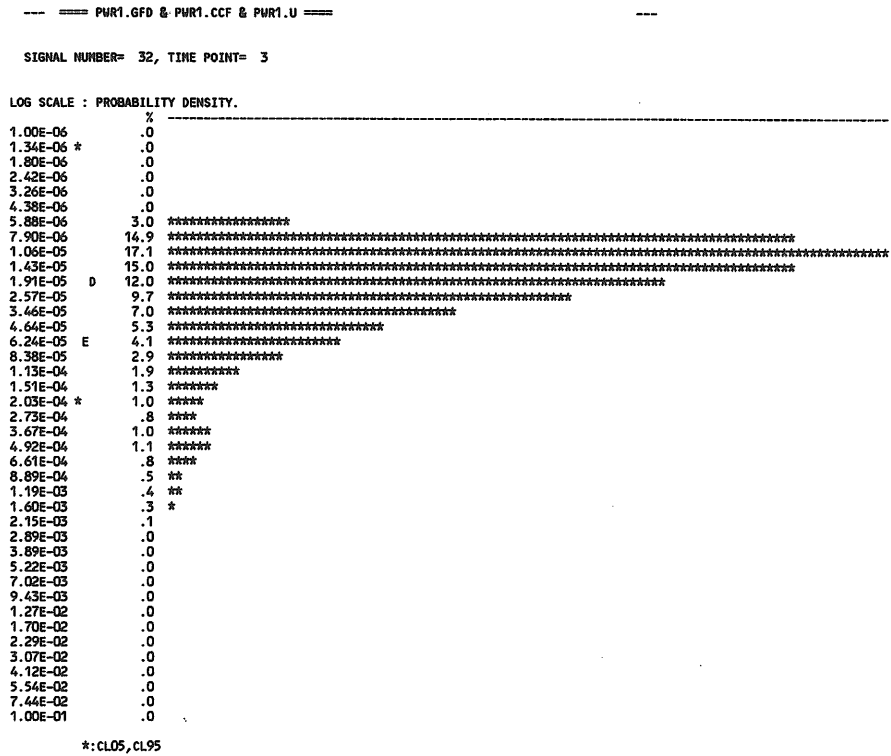


図-46 FAWS ; 共通原因故障を考慮しない場合の解析結果

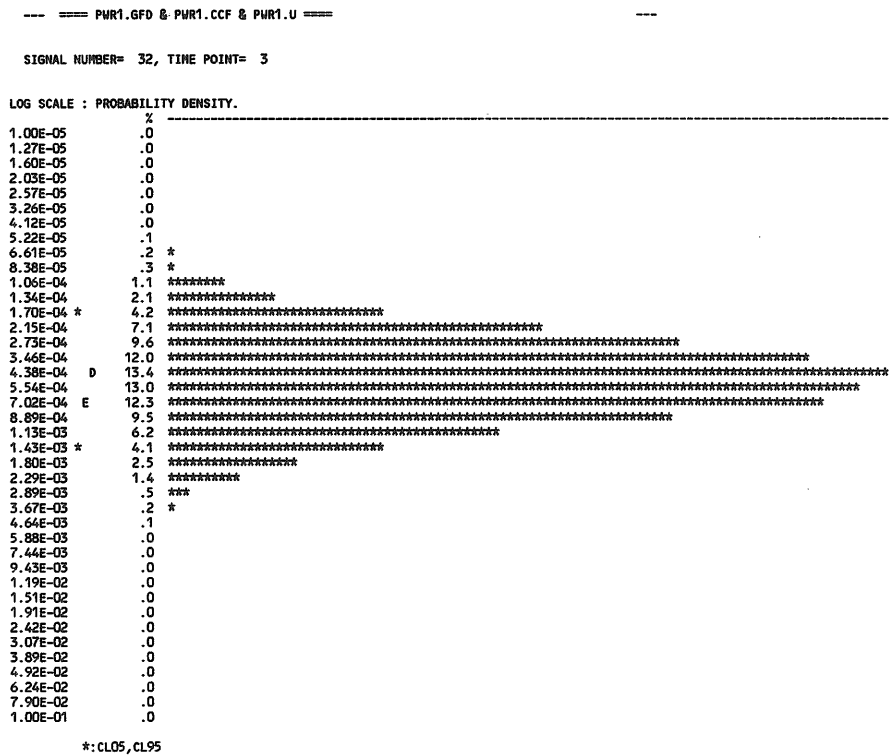


図-47 FAWS ; 共通原因故障を考慮した場合の解析結果

12. GO-FLOW解析プログラムの体系

前章までにおいて示した様に、GO-FLOW手法の基本解析機能に加えて、不確実さ解析機能、共通原因故障解析機能、共通原因故障を考慮した不確実さ解析機能が整備された。解析の目的によっては常にこれら全ての解析を必要とするわけではなく、適時組み合わせる必要がある。そこで、これらのプログラムを統合して、与えられた入力データの有無等を判断し必要な解析のみを自動的に実施する体系を作成した。この様子を図-48に示す。不確実さ解析は第11章で示した直接的に解析する方法

を採用した。大規模なシステムを対象とし、計算時間が長くなる場合は第10章の第一段階のミニマル・カット・セットを求める方法を採用する。また、解析結果の図、表を得る場合にはファイル転送を必要とするため、解析プログラムが終了してからマニュアル操作により各種設定を行う。これらの流れも図中に記したが詳細は次章で説明する。

ユーザーとしては、これらの解析プログラム群をあたかも単一の解析プログラムとして取り扱い、解析目的に応じて入力データを揃えれば良くGO-FLOWの種々の解析が非常に容易に実施できるようになった。今後の広い分野への普及が期待できる。

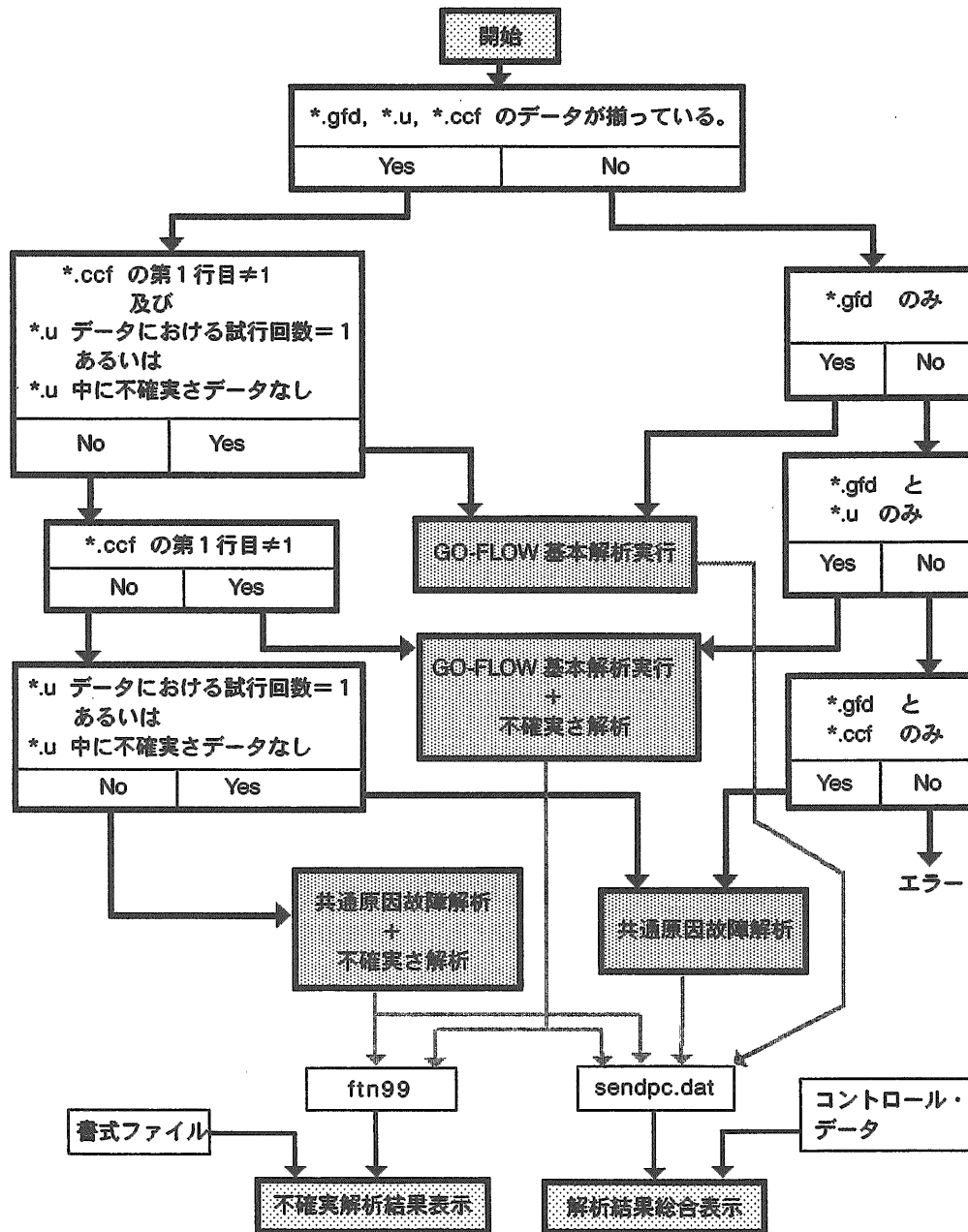


図-48 GO-FLOW解析プログラムの体系

13. GO-FLOW解析結果表示プログラム

13.1 解析結果総合表示

GO-FLOW手法に限らず、一般にシステム信頼性解析は解析結果が図表形式での見やすい形で得られ解析結果についての種々の判断が容易にできる様になってから、あるいは報告書の形にまとめられて初めて一連の解析が終了したと言える。そこで、GO-FLOW解析において実施した種々の解析結果を図表形式で表示する機能を整備した。

ワークステーション上でGO-FLOW解析プログラム(不確かさ解析、共通原因故障解析も含む)を実施したとき、通常の出カリストの他にsendpc.datという解析結果総合表示用データを生成し、パーソナル・コンピュータに転送する。このデータをもとに以下に示す図・表が作成されCRT画面上あるいはプリンターに出力される。なお不確かさ解析結果の図面出力は、別途生成されるftn99というデータファイルを用い次節で説明する不確かさ解析結果表示プログラムにより行われる。表示にいたる処理の流れは前章の図-48の中に示してある。

- 1) 主要解析条件の一覧表
- 2) 信頼度及び故障確率の時間経過に伴う推移のグラフ(信号線番号指定。)
- 3) 故障確率中のミニマル・カット・セット(MCS)寄与度の表示(信号線番号、タイム・ポイント指定。円、棒グラフ形式)
- 4) 故障確率中のMCS寄与度時間推移の表示(信号線番号指定。円、棒グラフ形式)
- 5) 信頼度、故障確率の頻度分布(信号線番号、タイム・ポイント指定。)
- 6) 共通原因故障解析結果の表作成
- 7) 不確かさ解析結果の表作成

これらの表示には日本語モードと英語モードの二種類が用意されている。

パーソナル・コンピュータにおいては解析結果総合表示プログラム(GFOP)を起動し、図表の書式等を決めるコントロール・データを読み込む。するとGO-FLOW解析結果sendpd.dat(ワークステーションより転送)をレーザー・プリンター/CRT画面上に図表の形に変換し出力する。その際、使用するレーザー・プリンターはネイティブ・モードに設定されている必要がある。

コントロール・データは事前に何種類か用意しておく。コントロール・データはNAMELIST形式で書かれており、変数には以下のものがある。

Language	日本語版か英語版かの選択 J:日本語 E:英語
Resultfile	解析結果のファイル名指定 (sendpc.dat等)
Grftype	出力する図の種類、番号 (上記1)~7)に対応)で指定、 複数個指定可

Title	図表表示に与える題名
Tpclock	各タイム・ポイントの実時間値を与える
Signo	表示対象とする信号線番号
Tp	表示対象とするタイム・ポイント
Ocomment	オペレータ番号についてのコメントを与える。 オペレータ番号が変数Ocommentの次元に対応する。
Section	グラフの補助線の有無 on:あり off:なし
Logmin	対数スケールの最小値
Logmax	対数スケールの最大値

図-49~58に出力例を示す。

図-49は主要解析条件の一覧表である。構成は①表題、②入力データ・ファイル形式のチャート情報、③オペレータ番号/対応機器名、④故障率データ、⑤タイム・ポイントの定義、⑥入力信号線強度、⑦最終信号線番号、⑧共通原因故障解析のためのデータ、⑨不確かさ解析のためのデータが記されている。(解析において対応するものがない項目は省略される。)

図-50、51は信頼度及び故障確率の推移グラフである。指定した信号線(最大6個まで同時記入可能)の時間経過に伴う信頼度及び故障確率の推移が表示される。信頼度のグラフの場合、縦軸は正規分布紙の目盛りを用いている。故障確率グラフの場合には対数表示となっている。

図-52、53はMCSの寄与度を示したもので、指定された信号線番号、タイム・ポイントについて棒グラフ、円グラフ表示が行える。

図-54は指定された信号線の故障確率におけるMCSの寄与度の推移を示したもので、帯グラフで示してある。各MCSを構成する信号線番号およびコメントもあわせて記されている。また、上部に信号線全体の故障確率の推移グラフも書かれている。

図-55、56は信頼度及び故障率の値の頻度分布を示す。単位時間間隔で信頼度及び故障率値の時間推移を分割したとき、それぞれの信頼度及び故障率の現れる頻度分布を表示したものである。定期点検、修理を考えた時のシステムのアベイラビリティの分布を見るために便利な表示として使える。

図-57は共通原因故障解析結果の最終結果の表である。基本的には図-29に示したライン・プリンターの出力と同一のものである。

図-58は不確かさ解析結果の数値による表示であり、これも基本的には図-37のライン・プリンターの出力と同一のものである。

以上の出力例はそれぞれ図-49、57は第9章で取り上げた加圧水型原子炉補助給水系、図-50、52、53、54、58は第10章の不確かさ解析実施例で取り上げたサンプルフォールトツリー、図-51、55、56は加圧水型原子炉補助給水系

において定期点検・保守を考慮した場合のアンアベイラビリティ時間依存性の解析結果である。

```

=====
共通原因故障解析 AFW Sシステム
=====

--- チャート情報 ---

タイトル
RELIABILITY ANALYSIS OF PWR-AFWS(WITH CCF)

オペレータ オペレータ タイプコード 出力信号線 入力信号線番号の情報
番号 タイプ 番号 番号

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

オペレータ オペレータ
番号 コメント
1 タンク
2 チェック弁
3 モータ1起動失敗
4 タービン起動失敗
5 タービン運転中の故障
6 モータ1運転中の故障
7 モータ駆動ポンプ1起動失敗
8 モータ駆動ポンプ1運転中故障
9 タービン駆動ポンプ起動失敗
10 タービン駆動ポンプ運転中の故障
11 モータ2起動失敗
12 モータ2運転中の故障
13 モータ駆動ポンプ2起動失敗
14 モータ駆動ポンプ2運転中の故障
15 チェック弁1
16 チェック弁2
17 チェック弁3
18 チェック弁4
19 OR
20 OR
21 OR
22 モータ駆動弁1開失敗
23 モータ駆動弁2開失敗
24 モータ駆動弁3開失敗
25 モータ駆動弁4開失敗
26 AND
27 AND
28 AND
29 AND
30 AND
31 AND
32 OR
34
35

```

図-49 (1) 解析結果総合表示出力 (1:主要解析条件 (1))

故障確率データ

PG : 機器が正常に動作をする確率
 PP : 機器が動作失敗をする確率
 PC : 弁が開指令により開動作を正常に行う確率
 PO : 弁が開指令により開動作を正常に行う確率
 DD : 初期状態で弁が開いている確率
 LAMDA : 故障確率
 TG1 : フェーズの開始時の確率
 TG2 : フェーズの終了時の確率

オペレータ タイプコード 故障率データ

タイプ	番号	PG	PP	PC	PO	LAMDA
21	1	0.999996				
21	2	0.999998				
26	1	0	0.9685			
26	2	0	0.9957			
26	3	0	0.99835			
35	1			1.71E-05		
35	2			0.00101		

タイムポイント	時刻	主要操作・意味
1	0	INITIAL STATE
2	0	OPERATION STARTS
3	0	24 HOURS AFTER

オペレータ 各タイムポイントの信号線強度

番号	1	2	3
1	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
34	0.000E+00	0.000E+00	2.400E+01
35	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00

最終信号線番号

21 32

--- 共通原因故障解析 ---

解析モデル : MGL法

群数	共通原因故障解析群	パラメータ
1	8 10 14	ROU11=1.000 ROU12=.697 ROU13=.304 ROU14=.000 ROU15=.000 ROU16=.000 ROU17=.000 ROU21=1.000 ROU22=.000 ROU23=.000 ROU24=.000 ROU25=.000 ROU26=.000 ROU17=.000
2	4 12	ROU11=1.000 ROU12=.390 ROU13=.000 ROU14=.000 ROU15=.000 ROU16=.000 ROU17=.000 ROU21=1.000 ROU22=.000 ROU23=.000 ROU24=.000 ROU25=.000 ROU26=.000 ROU17=.000

図-49 (2) 解析結果総合表示出力 (1 : 主要解析条件 (2))

サンプルフォルトツリー

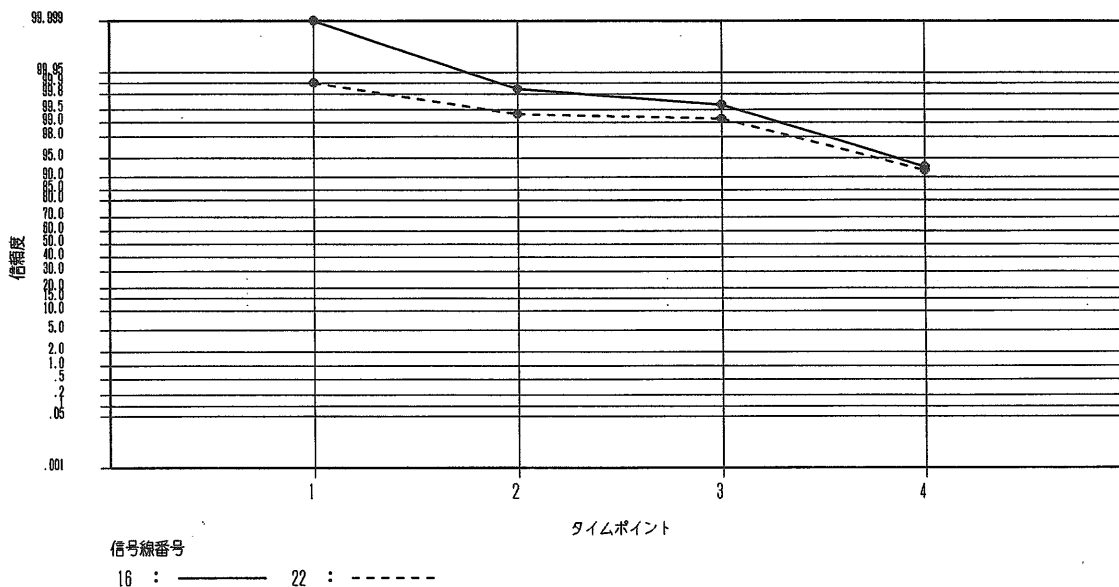


図-50 解析結果総合表示出力 (2-1 : 信頼度推移グラフ)

AFWS Time Dependent Unavailability Analysis

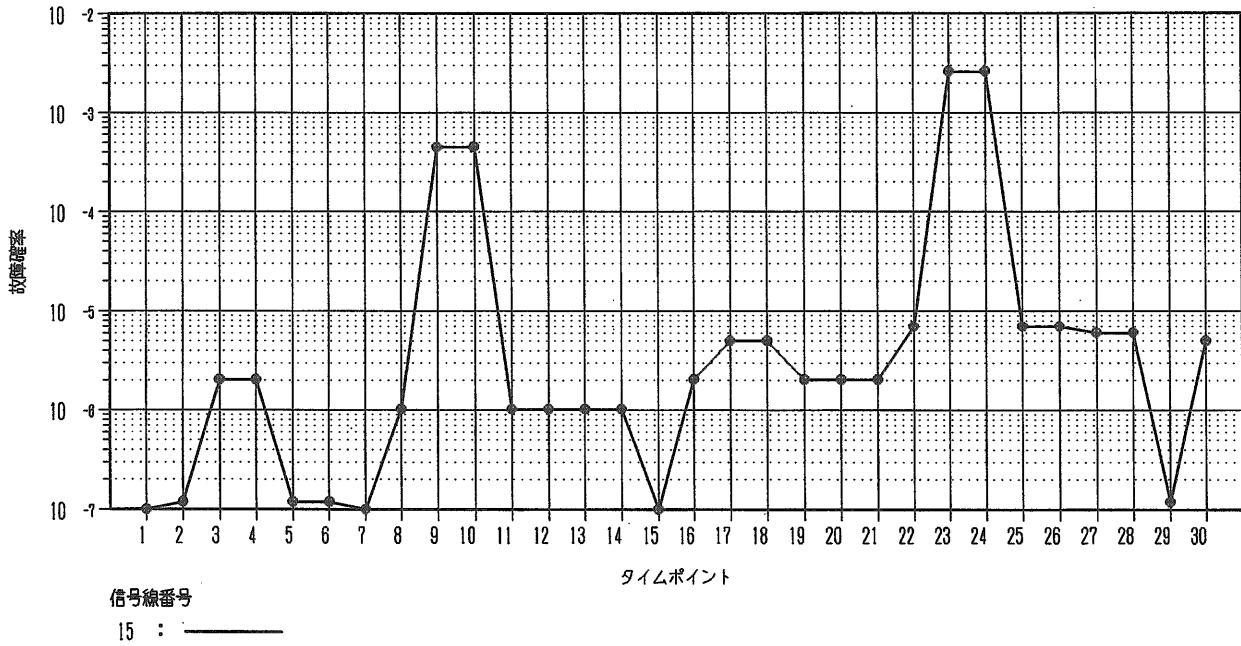


図-51 解析結果総合表示出力 (2-2:故障確率推移グラフ)

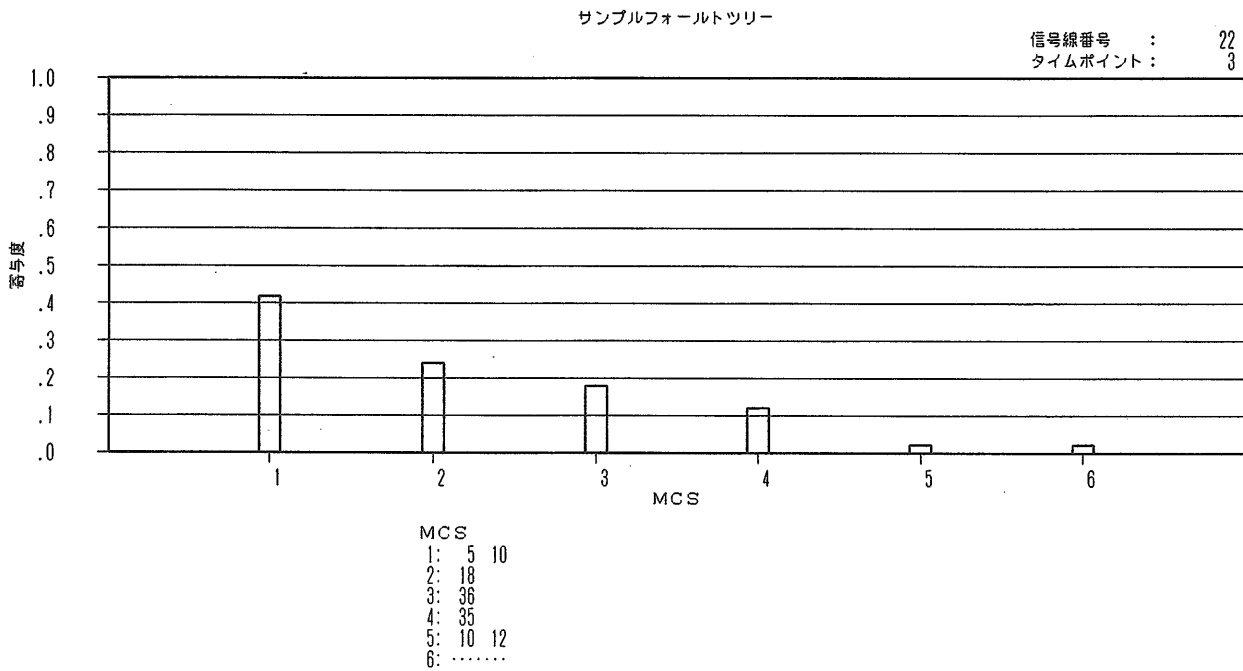


図-52 解析結果総合表示出力 (3-1:MCS寄与度棒グラフ表示)

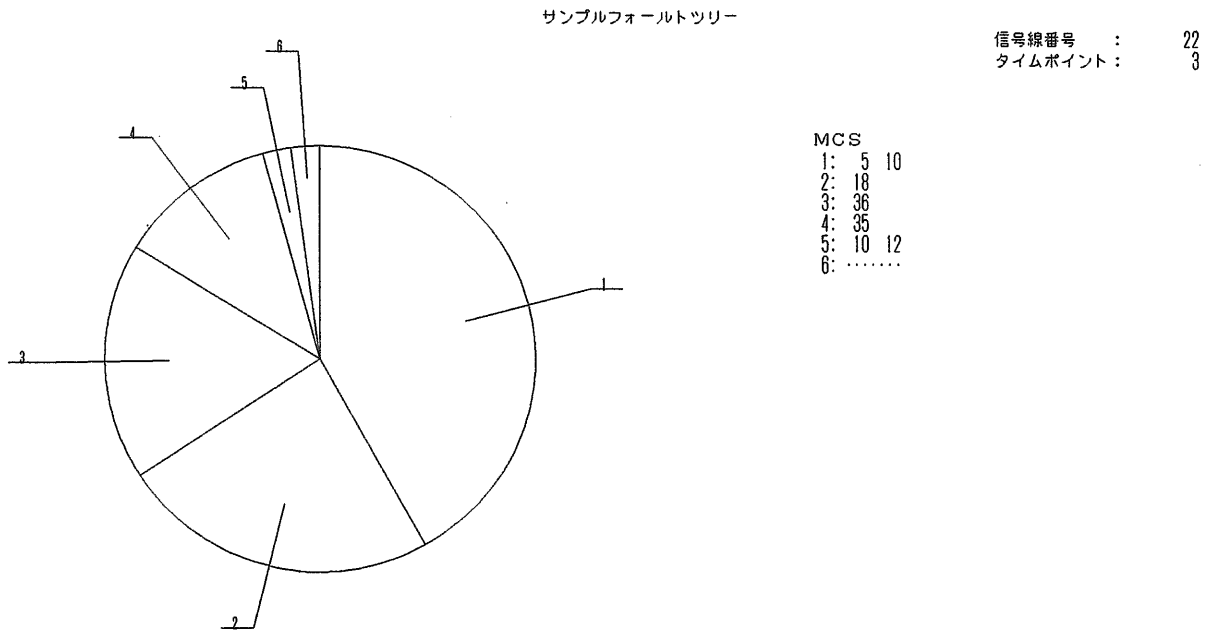


図-53 解析結果総合表示出力 (3-2: MCS寄与度円グラフ表示)

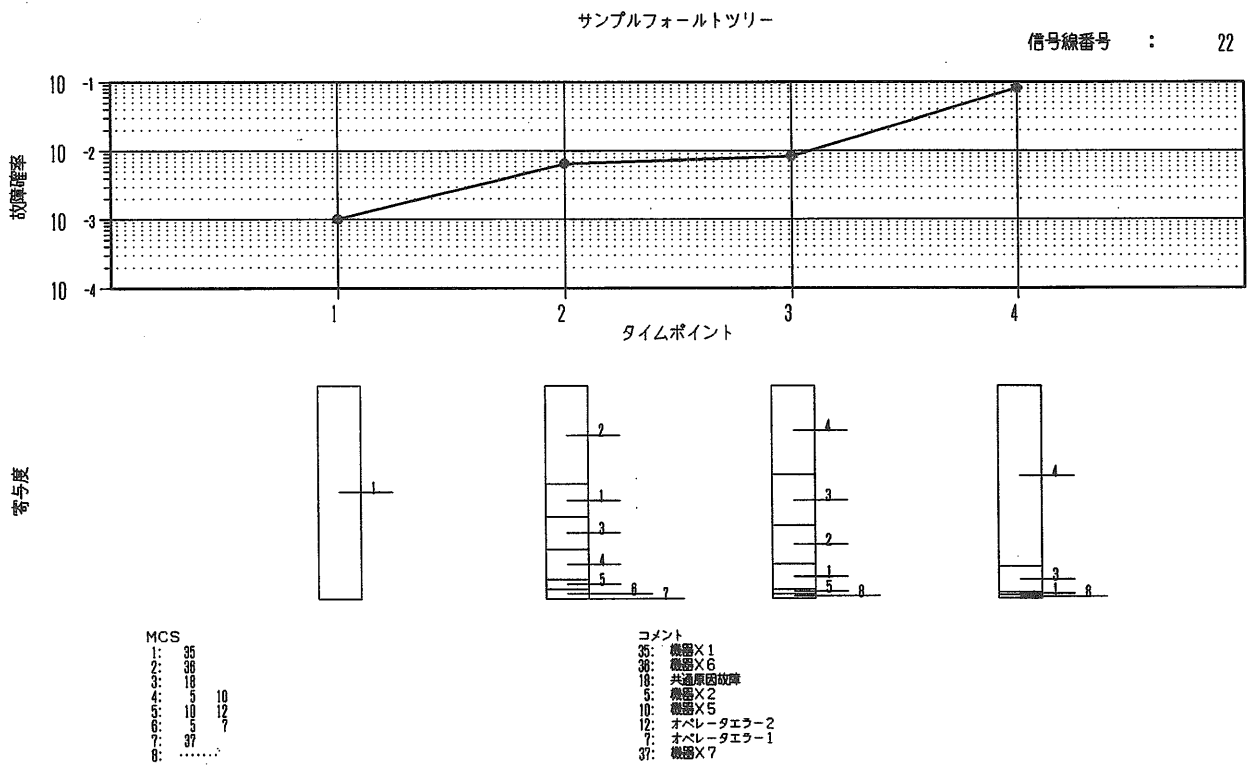


図-54 解析結果総合表示出力 (4: MCS寄与度時間推移表示)

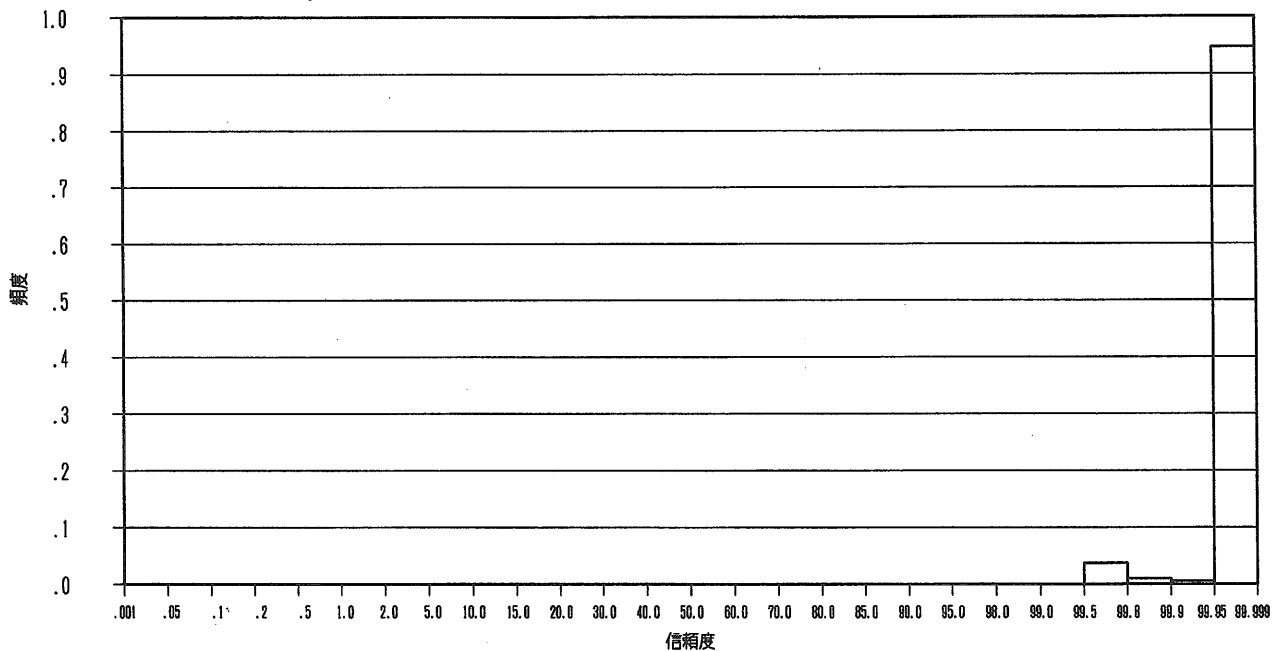


図-55 解析結果総合表示出力 (5-1:信頼度の頻度分布)

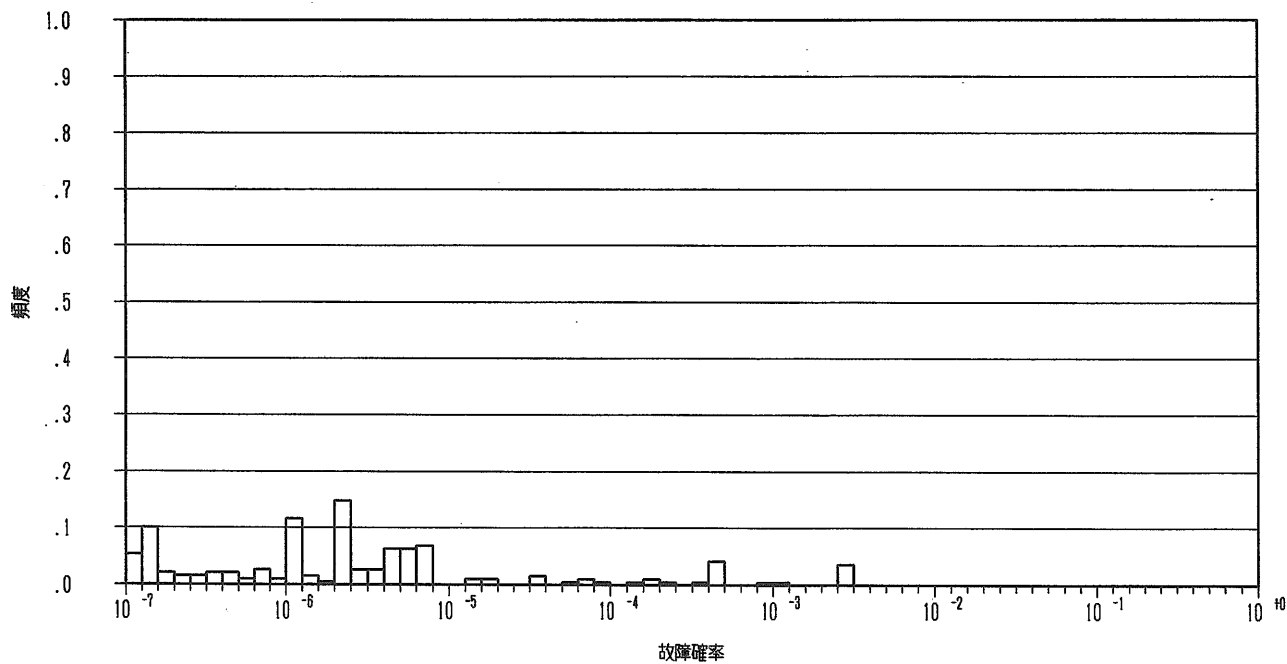


図-56 解析結果総合表示出力 (5-2:故障確率値の頻度分布)

--- 共通原因故障解析結果 ---
 @<< MGL法 >>

最終信号線 : 32

群数	共通原因故障解析群	パラメータ
1	8 10 14	ROU11=1.000 ROU12=.697 ROU13=.304 ROU14=.000 ROU15=.000 ROU16=.000 ROU17=.000 ROU21=1.000 ROU22=.000 ROU23=.000 ROU24=.000 ROU25=.000 ROU26=.000 ROU17=.000
2	4 12	ROU11=1.000 ROU12=.390 ROU13=.000 ROU14=.000 ROU15=.000 ROU16=.000 ROU17=.000 ROU21=1.000 ROU22=.000 ROU23=.000 ROU24=.000 ROU25=.000 ROU26=.000 ROU17=.000

解析対象 /レベル組合せ	タイムポイント		
	1	2	3
オリジナル	.10000E+01	.82498E-05	.10969E-04
独立故障			
8 10 14	.10000E+01	.68490E-05	.85371E-05
10 14	.00000E+00	.34961E-03	.34961E-03
8 14	.00000E+00	.40333E-05	.43577E-05
8 10	.00000E+00	.12800E-04	.22233E-04
4 12	.00000E+00	.40333E-05	.43577E-05
合計	.10000E+01	.39791E-03	.42484E-03

図-57 解析結果総合表示出力 (6 : 共通原因故障解析結果)

--- 不確かさ解析結果 ---

信号線番号= 22 タイムポイント = 3

最小値	= 2.03E-03	中央値	= 9.95E-03
最大値	= 8.08E-02	1σ-ファクター	= 2.47E+00
平均	= 1.16E-02	5%信頼値	= 4.04E-03
分散	= 4.71E-05	95%信頼値	= 2.46E-02
標準偏差	= 6.86E-03		

累積確率密度

5.0%	4.99E-03
10.0%	5.72E-03
15.0%	6.29E-03
20.0%	6.79E-03
25.0%	7.26E-03
30.0%	7.78E-03
35.0%	8.31E-03
40.0%	8.80E-03
45.0%	9.39E-03
50.0%	9.94E-03
55.0%	1.05E-02
60.0%	1.11E-02
65.0%	1.19E-02
70.0%	1.26E-02
75.0%	1.36E-02
80.0%	1.49E-02
85.0%	1.63E-02
90.0%	1.90E-02
95.0%	2.39E-02
100.0%	8.08E-02

図-58 解析結果総合表示出力
 (7 : 不確かさ解析結果)

13.2 不確かさ解析結果

第10、11章での不確かさ解析では確率密度分布、累積確率分布ともまがりなりに、ライン・プリンターを用いたグラフを得ることができた。しかし、解析結果の整理のためにはより見やすい形での図が望まれる。そこで、GO-FLOW解析の結果を処理して、PCの画面やレーザー・プリンターに描画する機能を整備した⁵⁹⁾。

不確かさ解析結果に関する情報がファイル名ftn99として出力される。このファイルをイーサー・ネットを通じて手元のパーソナル・コンピュータに取り込む。PCに用意されたグラフ設定プログラム (GUPE) によりグラフの種類、軸の設定等が記録された書式ファイルを作成する。次に書き出しプログラム (GUPP) によりデータを取り込みCRT画面あるいはレーザー・プリンター用紙上へ書き出す。この手順を図-59に示す。

作成される図は①確率密度分布図、②累積確率分布図、③分布幅表示図、④確率密度分布図と分布幅表示図の重ね合わせ図の4種類である。なお、GUPEはC言語で、GUPPはFORTRAN言語で記述されている。また、使用するレーザー・プリンターはネイティブ・モードに設定されている必要がある。

GUPEにおける各種設定はメニュー画面上でのキー入力及びマウス選択により行う。

まず、書式ファイル名を入力する (あるいは既に作成されているファイル名を読み込んで良い)。次のメニュー

画面で、タイトル名、X軸の最大値・最小値、階級分割数を入力する。解析結果として送られてくるサンプリング数は2000であるので、階級分割数は最大200程度が適当である。デフォルト値としては50が用意されている。この状態で書式ファイルを保存する事も可能である。

引き続き、図中に書き込むデータの指定を行う。解析結果データのファイル名 (ftn99或いは改称された名称)、コメント、信号線番号、タイム・ポイントを入力する。最大10個のデータまで同一の図に書き込める。

次に書き出しプログラム (GUPP) の実行に移る。まず、設定済みの書式ファイルを選択する。書式ファイルのタイトル名を表示して確認を求めてくるので、良ければ"Y"を入力する。次に出力先を聞いてくるので、"CRT画面"あるいは"CRT画面+レーザー・プリンター"のどちらかを選択する。その結果自動的に上記4種類の図面が出力される。

図-60~63に第10章の解析実施例の結果の表示図を示す。図中にはコメントの他にメディアン値、平均値、95%上限値、5%下限値等も合わせて記入される。これらの図より、時間経過とともにメディアン値が右へずれ不確かさ幅も広がって行く様子が良くわかる。

本表示プログラム群の開発により、GO-FLOW解析を実施すると即座に報告書に使用可能な品質の図面が得られ、GO-FLOW手法が一段と活用しやすくなった。

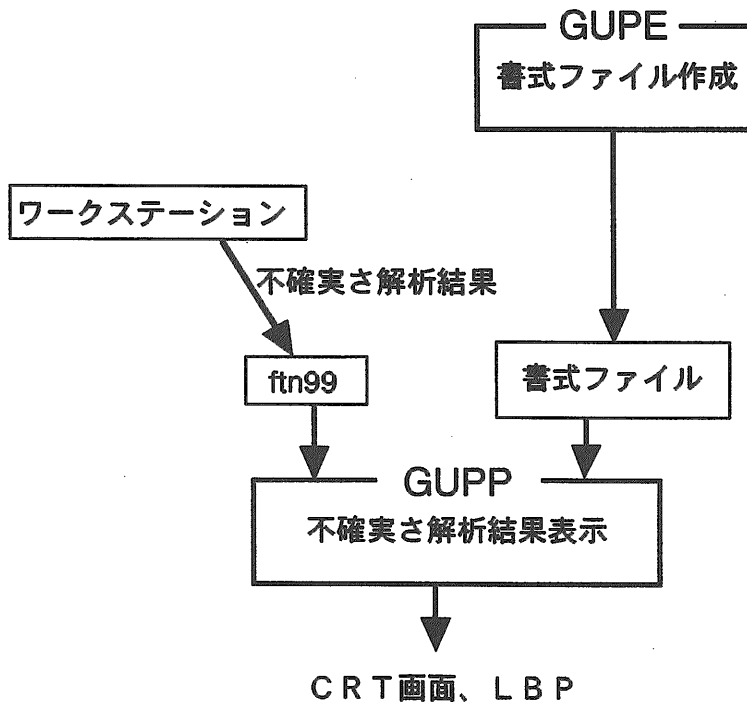


図-59 不確かさ解析結果の図面出力手順

PROBABILITY DENSITY

***** SAMPLE FAULT TREE *****

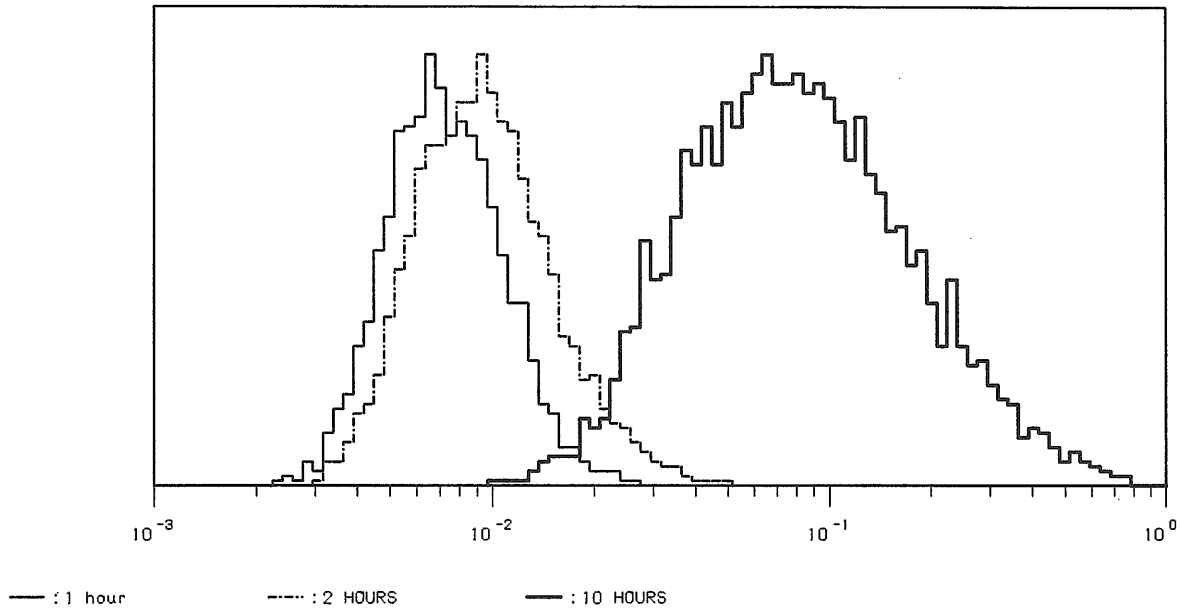


図-60 確率密度分布図 (サンプル・フォールト・ツリー)

CUMULATIVE PROBABILITY DENSITY

***** SAMPLE FAULT TREE *****

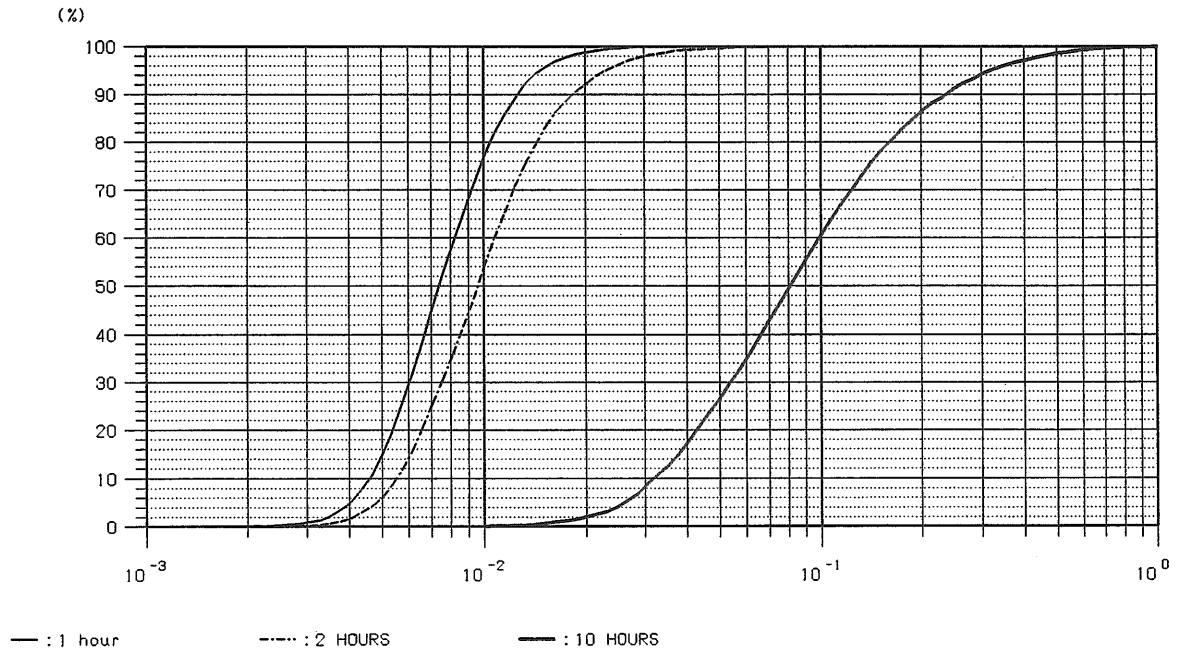


図-61 累積確率分布図 (サンプル・フォールト・ツリー)

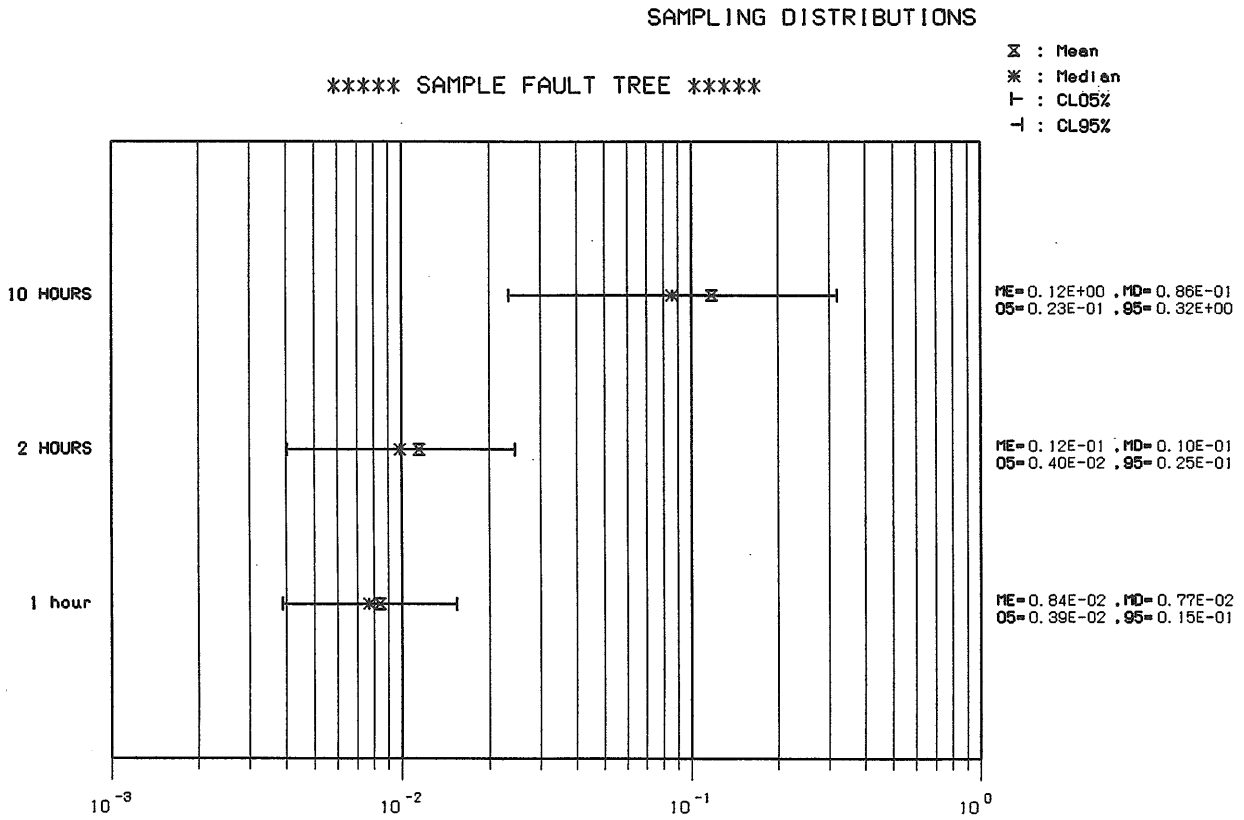


図-62 分布幅表示図 (サンプル・フォールト・ツリー)

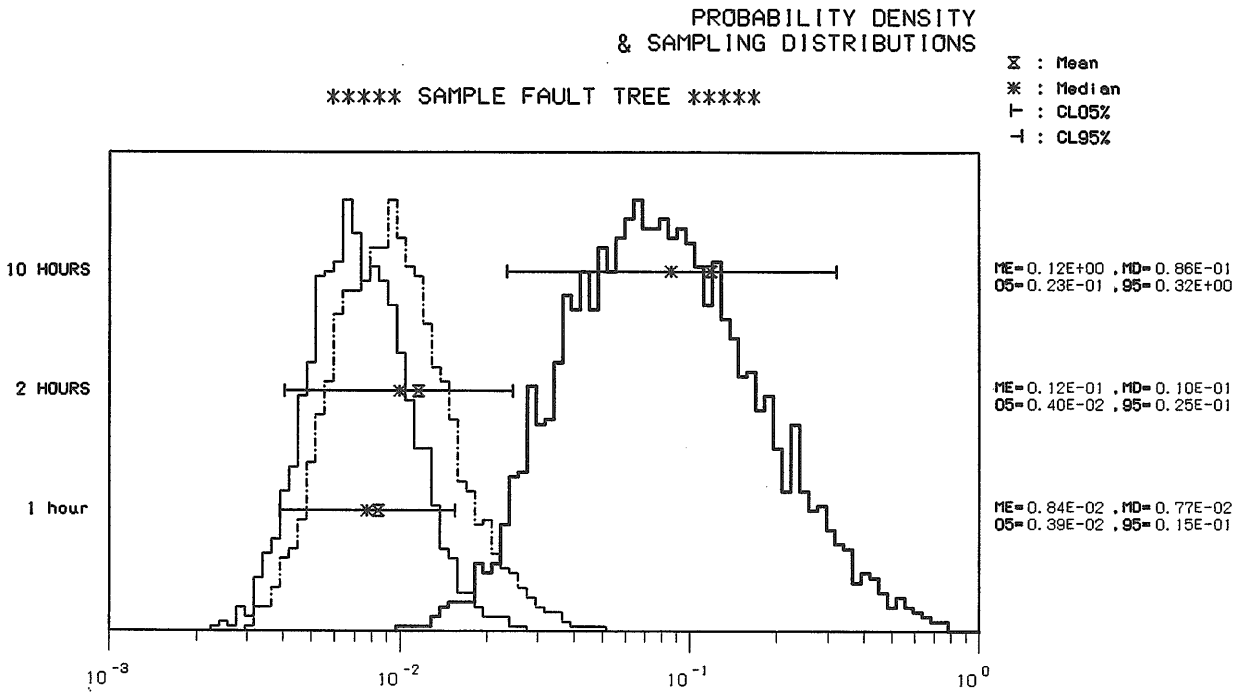


図-63 確率密度分布及び分布幅 (サンプル・フォールト・ツリー)

14. まとめ

GO-FLOW手法の基本的枠組みを基とし実用性に優れたシステム信頼性解析方法としての体系を完成させる研究を、平成元年度より原子力試験研究費により進めてきた。本論で述べた様に、GO-FLOWの基本解析機能に加えてフェイズド・ミッション問題の解法、共通原因故障解析機能、不確実さ解析機能、共通原因故障を考慮した不確実さ解析機能のより進んだ機能を開発・整備する事ができた。更に、使用性の向上の面からはパーソナル・コンピュータを基本としたGO-FLOW解析支援システムを開発した。このシステムでは、GO-FLOWチャート・エディター、GO-FLOWチャート図化プログラム、解析結果総合表示プログラム、不確実さ解析結果表示プログラムが用意されており、解析対象のモデル化から始まり、解析プログラムのための入力データの作成、解析結果の図・表の作成までがPCとのインタラクティブな操作で短時間のうちに容易に実施できる環境が整った。

以上の開発研究の成果により、本来持っている優れた機能に加えてGO-FLOW手法が一段と活用しやすい手法となり、今後原子力分野のみならず化学プラント、交通システム等広い分野で活用されることが期待される。

本論では、GO-FLOW手法の基本的な概念はもとより、共通原因故障解析等各種解析機能が本手法においてどの様に取り扱われているか詳述し、GO-FLOW解析体系を明確に記述することに努めた。また、実際にGO-FLOW解析を実施する際の使用手引き書としても活用可能となるよう具体的な入力データ、解析の流れ等も図・表の形で掲載した。

GO-FLOW手法による解析としては、本論で示した解析例以外に、原子力タンカーの衝突・座礁・火災事故時における船用炉非常用冷却系の解析、Pu運搬船の消火設備の信頼性解析、MRX炉非常用崩壊熱除去系の信頼性解析、加圧水型原子炉補助給水系の保守・点検を考慮したアベイラビリティ解析、人的要因を組み込んだ信頼性解析等、実用的な解析を多数実施しているが、その詳細については別の機会ですべて述べる事としたい。

今回の開発研究に引き続き、現在GO-FLOW手法の応用研究として同じく原子力試験研究費によりレベル3PSAまでを実施する上での重要な解析手法の開発研究を実施中である。

参考文献

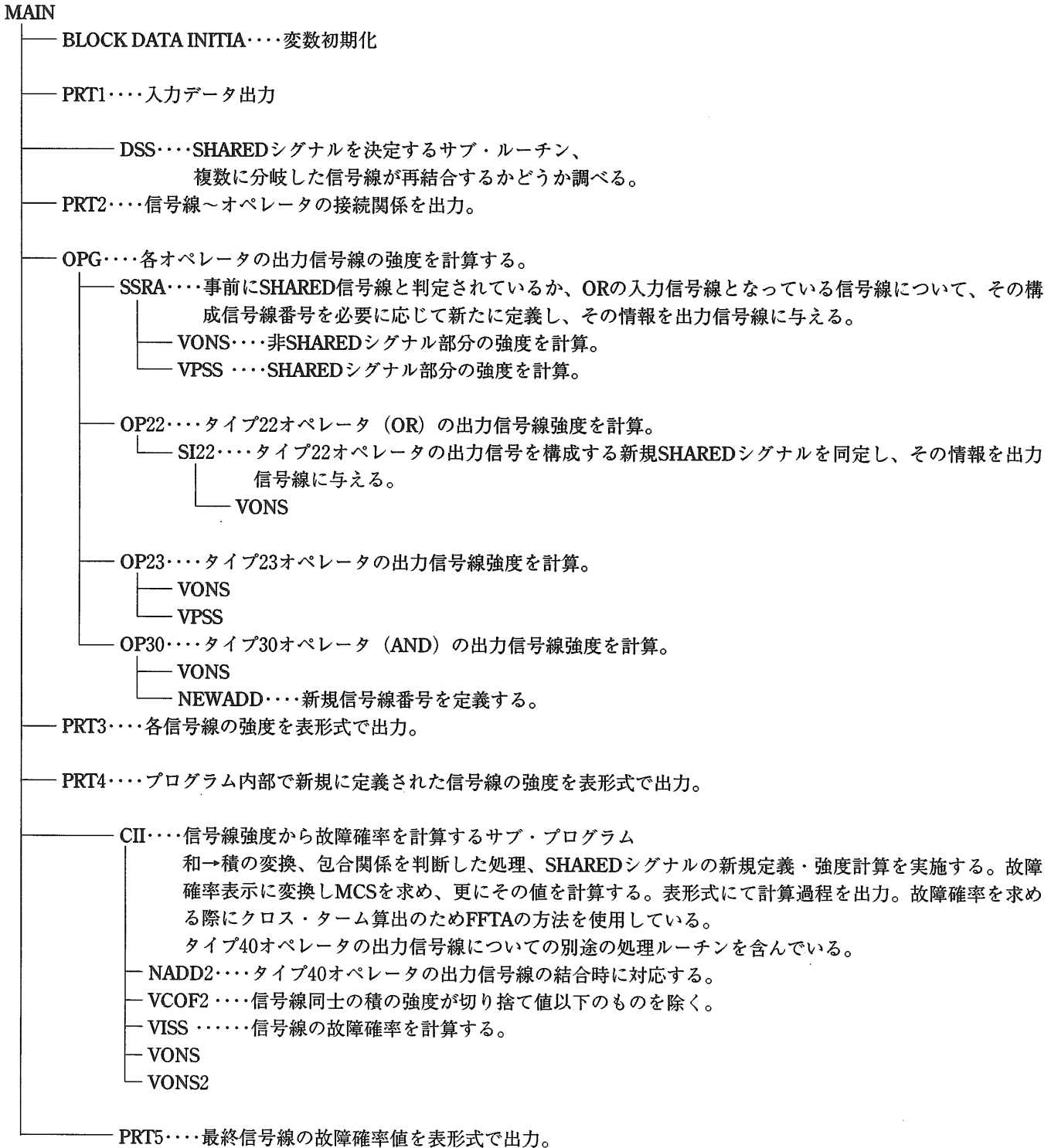
- 1) U.S.Nuclear Regulatory Commission: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants; WASH-1400, NUREG-75/014 (1975)
- 2) American Nuclear Society and IEEE: PRA Procedures Guide; NUREG/CR-2300 (1983)
- 3) W.E.Vesely, F.F.Goldberg, N.H.Roberts and D.F.Haasl: Fault Tree Handbook, NUREG-0492 (1981)
- 4) T.Matsuoka and M.Kobayashi: GO-FLOW A New Reliability Analysis Methodology, Nuclear Science and Engineering, Vol.98 (1988), pp.64-78
- 5) G.R.Burdic et al.: Phased Mission Analysis: A Review of New Developments and Application, IEEE Transaction on Reliability, R-26 (1977) pp.43-49
- 6) 松岡猛: 確率論的安全評価における従属故障と外的事象、システム/制御/情報、第36巻 第3号 (1992), pp.158-170
- 7) F.R.Farmer: Reactor Safety and Siting: A Proposed Risk Criterion, Nuclear Safety, Vol.8 (1967) pp.539-548
- 8) 近藤駿介、松岡猛 他: 原子力発電所の確率論的安全評価、日本原子力学会誌第28巻 第12号 (1986)、pp.1096-1128
- 9) 阿部清治 他: 原子力発電所に対する地震PSA研究の動向、日本原子力学会誌第36巻 第4号 (1994)、pp.285-291
- 10) U.S.Nuclear Regulatory Commission: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, Appendix I Accident definition and use of event tree, WASH-1400, NUREG-75/014 (1975)
- 11) U.S.Nuclear Regulatory Commission: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, Appendix II Fault tree methodology, WASH-1400, NUREG-75/014 (1975)
- 12) IEEE Trial-Use Guide: General Principles for reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems, IEEE Std 352-1972 (1972)
- 13) A.J.Bourne and A.E.Green: Reliability Technology, Wiley (Interscience) New York, 1972
- 14) J.A.Buzacott: Markov approach to finding failure times of repairable systems, IEEE Trans. Reliability Vol. R-19 (1970) pp.128-134
- 15) W.V.Gately and R.L.Williams: GO Methodology Overview; EPRI NP-765 (1978)
- 16) 市川博信: ペトリネット研究の動向と展望、計測と制御、第28巻第9号 (1989) pp.745-750
- 17) T.Kohda and K.Inoue: A Petri Net Approach to Probabilistic Safety Assessment for Obtaining Event Sequences from Component Models, in "Probabilistic Safety Assessment and Management, Vol.1 and 2", G.Apostolakis (ed.), Elsevier, New York (1991) pp.729-734
- 18) I.J.Sacks: Digraph Matrix Analysis (DMA), in "Probabilistic Safety Assessment and Management, Vol.1 and 2", G.Apostolakis (ed.), Elsevier, New York (1991) pp.425-430
- 19) C.Acosta and N.Siu: Dynamic Event Trees in Accident Sequence analysis: Application to Steam Generator Tube Rupture, Reliability Engineering and Safety, Vol.41

- (193) pp.135-154
- 20) U.S.Nuclear Regulatory Commission: Severe Accident Risks :An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150 (Dec. 1990)
 - 21) X.Wang and M.L.Roush: A Dynamic Goal Tree Approach for Process Safety Management, Proceedings of the International Meeting of PSAM-II, San Diego U.S.A. (March 20-25, 1994) , p.32.1-6
 - 22) J.Devooght and C.Smidts: Probabilistic Reactor Dynamics-I: The Theory of Continuous Event Trees, Nuclear Science and Engineering, Vol.111 (1992) pp.229-240
 - 23) T.J.McIntyre and N.Siu: Electric Power Recovery at TMI-1 A Simulation Model, Proceedings of International ANS/ENS Topical Meeting on Thermal Reactor Safety, San Diego, U.S.A. (1986) VIII.6-1~7
 - 24) P.C.Cacciabue, A.Amendola and G.Cojazzi: Dynamic Logical Analytical Methodology Versus Fault Tree: The Case Study of the Auxiliary Feedwater System of a Nuclear Power Plant, Nuclear Technology Vol.74 (1986) pp.195-208
 - 25) G.Cojazzi, P.C.Cacciabue, and P.Parisi: DYLAM-3 A Dynamic Methodology for Reliability Analysis and Consequences Evaluation in Industrial Plants, EUR15265EN (1993)
 - 26) T.Matsuoka: Reliability Analysis of Emergency Decay Heat Removal System of Nuclear Ship under Various Accident Conditions, Comparison between Nuclear Ship 'Mutsu' and 'Savannah', Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.21 (1984) , pp.266-278
 - 27) 松岡猛、小林道幸：GO手法による信頼性解析、日本原子力学会秋の大会（1993年10月）D25
 - 28) T.Matsuoka and M.Kobayashi: GO-FLOW; A Reliability Analysis Methodology Applicable to Piping System, Proceedings of International ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Safety Methods and Applications, San Francisco, U.S.A. (Feb. 24 - March 1, 1985) No.175
 - 29) 松岡猛：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、船舶技術研究報告 別冊11号（1988年7月）
 - 30) T.Matsuoka and M.Kobayashi: Development of the GO-FLOW Reliability Analysis Support System, Use of Probabilistic Safety Assessment for Operational Safety PSA'91, International Atomic Energy Agency, Vienna Austria (1992) IAEA-SM-321/61 pp.677-688
 - 31) M.V.Bonaca: Living Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plant Management, Nuclear Energy Agency, OECD, (Feb. 1991)
 - 32) T.Matsuoka, M.Kobayashi and K.Takemura: The GO-FLOW Methodology; A Reliability Analysis of the Emergency Core Cooling System of a Marine Reactor under Accident Conditions, Nuclear Technology, Vol.84 (1989) pp.285-295
 - 33) T.Matsuoka and M.Kobayashi: A Phased Mission Analysis by the GO-FLOW Methodology, Proceedings of International ANS/ENS Topical Meeting Probability, Reliability and Safety Assessment, Pittsburgh, U.S.A. (April 2-7, 1989) pp.1148-1145
 - 34) T.Matsuoka: FFTA; A Fast Fault Tree Analysis Program, Nuclear Engineering and Design, Vol.91 (1986) pp.93-101
 - 35) 松岡猛、小林道幸：GO-FLOW手法による信頼性解析（6）－フェーズド・ミッションのサンプル問題とその解析－、日本原子力学会年会（1988年4月）D29
 - 36) K.N.Fleming et al.: A Reliability Model for Common Mode Failures in Redundant Safety Systems; Proceedings of the Sixth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation; GA-A13284 (April 1975) pp.23-25
 - 37) K.N.Fleming et al.: An Extension of the Beta Factor Method to Systems with High Levels of Redundancy; PLG-0289 (June 1983)
 - 38) A.Mosleh and N.O.Siu: A Multi-Parameter, Event-based Common-Cause Failure Model, SMIRT9 Paper No. M7/3 (August 1987)
 - 39) C.L.Atwood: Common Cause Fault Rates for Pumps, NUREG/CR-2098 (Feb. 1983)
 - 40) A.W.Marshall and I.Olkin: A Multivariate Exponential Distribution; J.Am.Stat. Assoc. Vol.62 (1967) pp.30-44
 - 41) A.Mosleh et al.: Procedures for Treating Common Cause Failures in Safety and Reliability Studies; EPRI NP-5613 (Feb. 1988) pp.3-20
 - 42) T.Mankamo and U.Pullkinen: Dependent Failure of Diesel Generators; Nuclear Safety Vol.23 (1982) , pp.32-40
 - 43) T.Mankamo et al.: Common Cause Failure Analysis of High Redundancy Systems, Use of Probabilistic Safety Assessment for Operational Safety PSA'91, International Atomic Energy Agency, Vienna Austria (1992) IAEA-SM-321/47 pp.517-534
 - 44) M.G.Stamatelatos: Improved Method for Evaluating Common-Cause Failure Probabilities, Trans. Am. Nucl. Soc. Vol.43 (1982) pp.474-475
 - 45) Licensee Event Reports (LER) , reported to the Nuclear Regulatory Commission in accordance with the Code of Federal Regulations, Title 10-Energy, sections 50.72 and 50.73
 - 46) M.T.Drouin et al.: Analysis of Core Damage Frequency from Internal Events; Methodology Guidelines,

- NUREG/CR-4550 Vol.1 (Sept. 1987)
- 47) K.N.Fleming et al.:A Systematic Procedure for the Incorporation of Common Cause Events with Risk and Reliability Models, Nuclear Engineering and Design, Vol.93 (1986) , pp.245-273
 - 48) J.A.steverson and C.L.Atwood: Common Cause Fault Rate for Valves, NUREG/CR-2770 (Feb. 1983)
 - 49) C.L.Atwood and J.A.steverson: Common Cause Fault Rate for Instrumentation and Control Assemblies, NUREG/CR-2771 (Feb. 1983)
 - 50) C.L.Atwood and J.A.steverson: Common Cause Fault Rate for Diesel Generators: Estimates Based on Licensee Event Reports at U.S. Commercial Nuclear Power Plants 1976-1978, NUREG/CR-2099 (June 1982)
 - 51) T.Matsuoka and M.Kobayashi:The Incorporation of Common Cause Failures into the GO-FLOW Methodology, Proceedings of the International Meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA'93, Clearwater Beach, Florida January 26-29 (1993) pp.811-817
 - 52) T.Matsuoka and M.Kobayashi: Development of the GO-FLOW Reliability Analysis Methodology -Common Cause Failure analysis and Uncertainty Analysis-, Proceedings of the International Meeting of PSAM-II, San Diego U.S.A. (March 20-25, 1994) , pp.032.11-18
 - 53) 松岡猛、小林道幸：GO-FLOW手法による信頼性解析(12) -不確実さ解析機能の整備-、日本原子力学会秋の大会講演予稿集(1992年10月) M52
 - 54) 松岡猛、小林道幸：GO-FLOW信頼性解析支援システムの開発、第61回船舶技術研究所研究発表会講演集(1993) pp.104-109

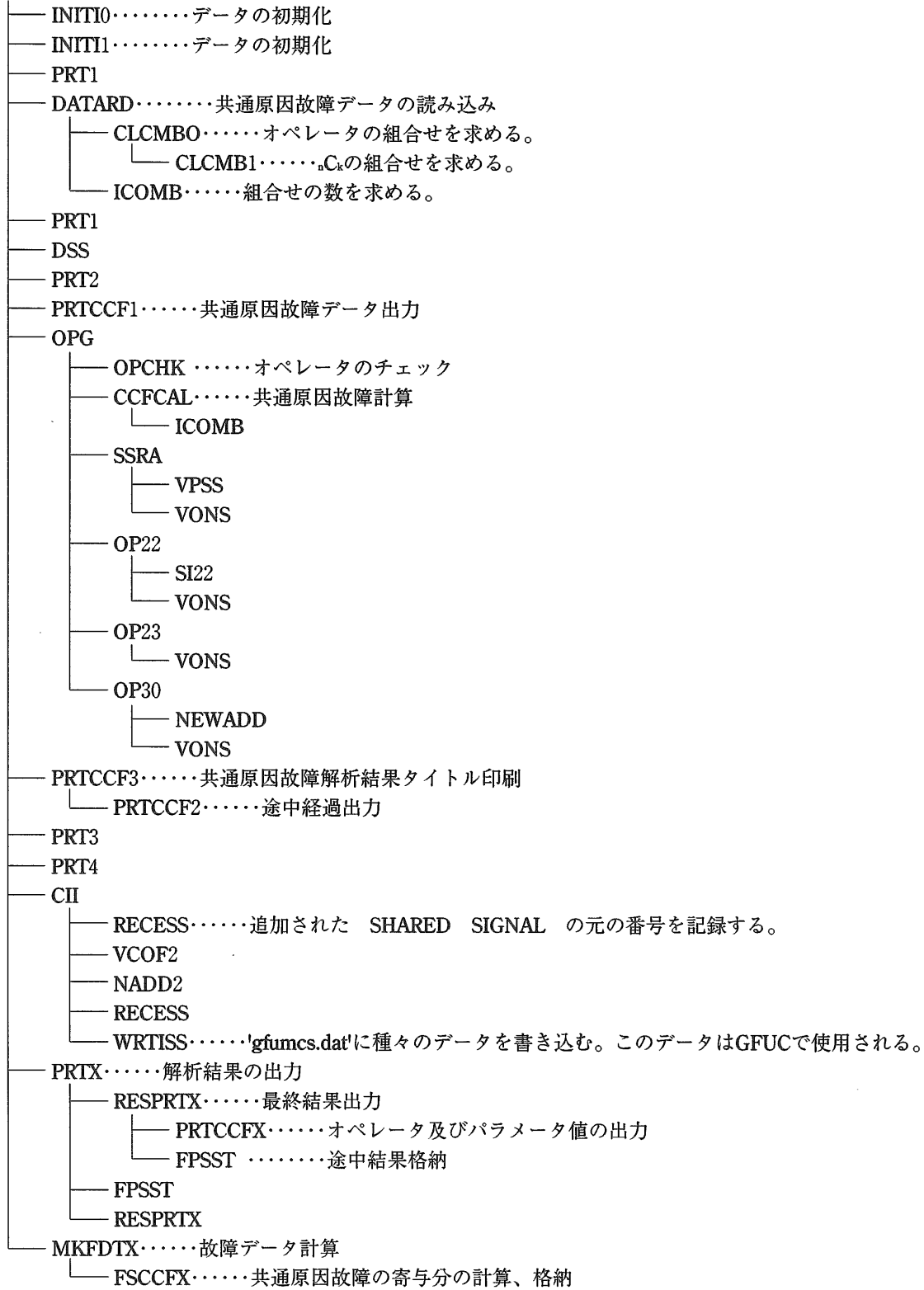
付録1. 解析プログラムの構成

GO-FLOW基本解析プログラム (FORTRANにて記述)

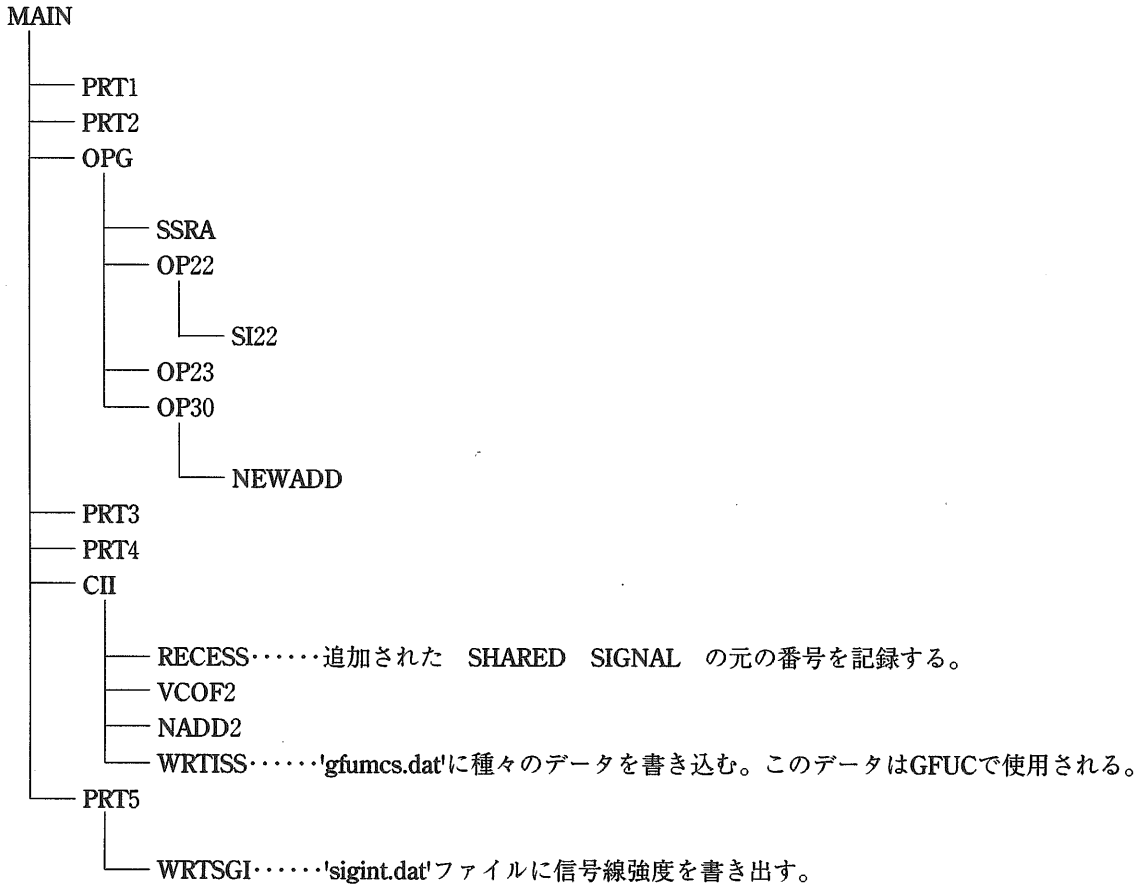


GFCCF (共通原因故障解析プログラム)

MAIN



GFU1 (不確かさ解析第一段階)



GFU2 (不確実さ解析第二段階)

MAIN

- DATIN1 ……中間ファイル (MCSファイル) からのデータの読み込み。
- DATIN5 ……標準入力からの解析指示データの読み込み。
 - HSTNIN ……ユーザの定義した累積確率分布のヒストグラムデータの読み込み。
- HEADR1 ……標題部分の出力。オペレータに対して指定された確率分布の平均値を求める。
- DATIN2 ……中間ファイルからMCSデータと信号線強度を1セット読み込み解析対象の信号線・タイムポイントであれば、IEOFに0を代入。
- SETRV ……各MCSの信号線強度に確率分布に従う値を与える。
(試行回数繰り返す)
 - AVWIBL ……ワイブル分布の平均値を求める。
 - AVEHST ……ヒストグラムデータで与えられた分布の平均値を求める。
 - GETRV ……CALCRVで求めた値を信号線強度に乗じる。
信号線強度が1.0より大きい時は1.0から引いた後で乗じる。
 - CALCRV ……各分布毎のばらつきの計算
 - RLGCRM ……対数正規分布に従う乱数
 - RGAMMA ……ガンマ分布に従う乱数
 - RBINML ……二項分布に従う乱数
 - RBETA ……ベータ分布に従う乱数
 - RWIBLU ……ワイブル分布に従う乱数
 - RUNIF ……一様分布に従う乱数
 - RHISTG ……ヒストグラム分布に従う乱数
 - RLGUNIF ……対数一様分布に従う乱数
- SELMTH ……EFFTA1, EFFTA2どちらを呼び出すかを判定する。
- EFFTA1 ……FFTAによるMCSの値の算出
- EFFTA2 ……FFTAによるMCSの値の算出 (タイプ40オペレータ出力の場合)
- STATIS ……基本的な統計計算実施 (平均値、中央値、標準偏差等)
- MKHSTN ……通常目盛りによる確率密度分布のグラフ
- MKHSTL ……対数目盛りによる確率密度分布のグラフ
- MHSTNC ……通常目盛りによる累積確率分布のグラフ
- MHSTLC ……対数目盛りによる累積確率分布のグラフ

GFUC (不確実さ+共通原因故障解析プログラム)

MAIN

- INIDAT配列 (IOTYP, IDITYP) の初期化
- DATIN1GO-FLOW基本解析データを読み取り、故障率部分を識別して取り込む。
- DATIN5標準入力からの解析指示データの読み込み。
 - HSTNINユーザの定義した累積確率分布のヒストグラムデータの読み込み。
- HEADR1 標題部分の出力。オペレータに対して指定された確率分布の平均値を求める。
- CALBASE..... 共通原因故障解析ベースケース (不確実さを考慮しない) の計算。
結果はgfccf.lstとして記録される。
- SETRV各オペレータにユーザの指定した分布に従う故障確率データを与える。(試行回数繰り返す)
 - AVWIBLワイブル分布の平均値を求める。
 - AVEHSTヒストグラムデータで与えられた分布の平均値を求める。
 - GETRV.....ばらつきの計算
 - CALCRV.....各分布毎のばらつきの計算
 - RLGCRM対数正規分布に従う乱数
 - RGAMMA.....ガンマ分布に従う乱数
 - RBINML二項分布に従う乱数
 - RBETAベータ分布に従う乱数
 - RWIBLUワイブル分布に従う乱数
 - RUNIF一様分布に従う乱数
 - RHISTGヒストグラム分布に従う乱数
 - RLGUNIF.....対数一様分布に従う乱数
- WRTGF乱数により与えられた故障率データを持つGO-FLOW解析データを作成
- MAKECMD共通原因故障解析プログラムを実行するためのコマンドを作成
- MAKEGRAPH..ラインプリンターによるグラフを出力
 - STATIS.....基本的な統計計算実施 (平均値、中央値、標準偏差等)
 - MKHSTN.....通常目盛りによる確率密度分布のグラフ
 - MKHSTL.....対数目盛りによる確率密度分布のグラフ
 - MHSTNC.....通常目盛りによる累積確率分布のグラフ
 - MHSTLC.....対数目盛りによる累積確率分布のグラフ

パーソナル・コンピュータ上のプログラム

- | | |
|---------|--------------------------|
| GFCEdit | GO-FLOWチャート・エディター |
| GFPlot | GO-FLOWチャート図化プログラム |
| GFOP | 解析結果総合表示プログラム |
| GUPE | 不確実さ解析結果表示用書式ファイル作成プログラム |
| GUPP | 不確実さ解析結果表示プログラム |

付録 2. GO-FLOWプログラム内の主要変数の意味

GO-FLOW基本解析プログラム内

JO	オペレータ、信号線の最大数	300
JT	タイム・ポイントの最大数	30
JP	出力信号線に属する項数の最大値	100
JP2	最後に処理される信号線に属する項数の最大値	2000
JM	1 オペレータへの主・副入力線の最大数	35
	1 信号線を構成する共有信号線 (SHARED SIGNAL) の最大数	35
JI	全SHARED SIGNALの最大数	500
JF	最終信号線の最大数	40
N (JO)	オペレータ番号、	} 入力時の順番が同一の情報は互いに同一のオペレータに関する情報と識別する。
TY (JO)	オペレータ・タイプ、	
R (JO)	出力信号線番号	
NS (JO)	主入力信号線の数	
SM (JO, JM)	主入力信号線の番号	
NP (JO)	副入力信号線の数	
PM (JO, JM)	副入力信号線の番号	
FS (JO)	最終信号線の番号	引数=データ読み込み時の最終信号線に関する順番
FD (20, 20, 3)	故障率データ、 各次元は (オペレータ・タイプ、オペレータ種類、データ種類) に対応。	
II (JO, JP, JT)	信号線強度	引数=信号線番号
IIM (JO, JP, JM)	1 信号線を構成するSHARED SIGNALの番号、 第1引数=信号線番号 (R (I))	
IDS (JO)	信号線状態の指標：0 = 未決定、1 = 解析順番決定、2 = 強度決定 引数=信号線番号	
IP (JO, JP)	出力信号線に属する項の有無の指標 0 = 存在せず、1 = 項が存在する 第1引数=信号線番号	
NO	オペレータ総数	
NTIME	タイム・ポイント数	
ATIME	タイム・ポイントの定義 (記述)	
NASS	解析途中で新規に定義されるSHARED SIGNALの総数 (解析の進行に伴い増加していく)	
NADD	解析途中でプログラム内部で作られる信号線番号の最大値 NADD>MSN+10 (解析の進行に伴い増加していく)	
MSN	入力データにより与えられた信号線番号の最大値	
EPS	微量切り捨てのための打ち切り値 1x10 ⁻⁷	
ORD (JO)	解析順番、	引数=解析順番 ORD=入力データ読み込み時の順番
IDO (JO)	解析順番決定の指標、	引数=入力データ読み込み時の順番、 0=未決定、1=決定
NKDD (JO)	二重に定義されてしまった出力信号番号 → エラー表示	
NSI (JO)	信号線番号、	引数=1~NO; 全ての信号線を順番に並べた結果
NSJ (JO)	上記並べ方の順番の数を与える。	引数=信号線番号

NOC (JO,JO)	特定の主/副信号線番号を持つオペレータ番号を与える。 第一引数=信号線番号、 第二引数=特定の信号線につながっているオペレータは複数個存在し得るので、その順番。
NOJ (JO)	入力データ読み込み時の順番を与える。引数=信号線番号
ISE (JO)	SHARED SIGNALの指標、0 =非SHARED SIGNAL、1 =SHARED SIGNAL、 引数=信号線番号
IFN	最後に処理される信号線の入力データ読み込み時の順番値=ORD (NO)
IIF (JP2, JT)	ゝ の強度
IIFM (JP2, JM)	ゝ を構成するSHARED SIGNALの番号
IFP (JP2)	ゝ に属する項の有無の指標、 0 =存在せず、1 =項が存在する

OPG

INEW (JI)	タイプ40オペレータにより新規作成された信号線番号、 引数=元の信号線番号
IOLD (JI)	タイプ40オペレータにより新規作成された信号線の元となった 信号線番号、引数=NADD

OP30

NAS (JI)	解析途中でプログラム内部で作られた信号線 (SHARED SIGNAL) の順番、 引数=新規作成されたSHARED SIGNAL番号 NADD
ASS (JI, JT)	新規作成されたSHARED SIGNALの強度、引数=新規作成されたSHARED SIGNALの順番 NAS

CII

VII (JF, JT)	最終信号線の故障確率、引数=データ読み込み時の最終信号線に関する順番
--------------	------------------------------------

GFCCFプログラム内

IFLG1	プログラム開始後最初の1回だけ処理させるための指標 0 : 処理する、1 : 処理しない
IFLG	共通原因を考慮しない結果と独立故障の結果の全てを出力させる為の指標 0 : 出力する、1 : 出力しない
XGO	共通原因故障解析をするか否かの指標 0 : 実施しない (通常の解析のみ)、1 : 実施する
IGUNSU0	共通原因故障機器の群数
IGUNSU1	共通原因故障機器の群数のカウンター 1 ~ IGUNSU0 : IGUNSU0 + 1 ですべての処理終了
ICBM	組み合わせの数のカウンター
IFIFLG	最終結果リスト表示のための指標 0 : 表示しない、1 : 表示する
LCNT	オペレータ39の信頼性データ作成の指標 0 : P ₀ =1.0, 0.0の処理 1 : P ₀ =1.0, 0.0の処理

INMETH

モデル化手法

- 1 : β ファクター法
- 2 : BFR法
- 3 : α ファクター法
- 4 : MGL法

TCOUNT

特定の機器組み合わせにおける故障確率の処理のループカウンター

- 3 : 共通原因故障を考慮しない処理
- 2 : 独立故障の処理
- 1 : 信頼性データ $P=1.0$ の処理
- 0 : 信頼性データ $P=0.0$ の処理
- 1 : 終了

解析の基本的な流れ

TCOUNT=3 → TCOUNT=2 → TCOUNT=1 → TCOUNT=0 → 終了