

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

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

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

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

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

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

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

わかった。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.10 結 論

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

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

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

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

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

ペレータに与えるデータはGO手法とは異なり故障率で与えるようになっている。

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

このGO-FLOW手法の特徴としては以下の項目が挙げられる。

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

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

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

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

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

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

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

6. 結 論

6.1 総括的結論

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

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

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

沿ってのシステム信頼性解析法の改良，開発を目的としている。

第二章においては，船用炉非常用崩壊熱除去系の信頼性解析を実施した。

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

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

環境条件としては10種の船体事故を選び出し，事故時同一室内に設置された機器は同一の環境条件に曝され，また，異なった区画への事故の伝播はないと仮定し，解析を実施した。解析の基本はフォールト・ツリー解析で，モンテ・カルロ法を用いたSAMPLEプログラムにより頂上事象発生確率分布を求めた。

基本事象発生確率の値はRSSのデータを用い，各種事故状態における基本事象発生確率のデータは現在の所整備されたものが存在しないため，各種文献を参考に工学的判断により推定した。

両システムについての解析を実施し，結果を比較，検討した結果以下の結論が得られた。

通常運転条件下においては両システムはほぼ同様の信頼性を示し，系の信頼度は故障確率の大きな機器により主として支配されている。

系の信頼度は，系の構成，系の置かれた環境条件にも依存しており，原子力船の安全防護系の有効性の評価には，この章で実施した，各種事故条件下における信頼性解析が必要となる。

第3章においては，故障原因，時間依存を考慮した機器故障モデルを提唱し，その故障モデルに基づく信頼性解析プログラムの開発及びその解析実施例を示した。

従来から集められている故障率データは通常の運転条件下における値であり，しかも故障率の値は一定値と考え，故障原因は露には考慮されていなかった。この章においては，機器の故障は，何らかの意味で原因により引き起されるという考えを基本とし，機器の故

障確率が原因の種類，原因の程度，原因が作用する時間/回数，及び，故障モードの関数となっている故障モデルを提唱した。

機器に故障をもたらす原因としては，基本的な性質に着目し20種類の基本的原因を選定した。これらの原因を，作用の仕方により，連続的に作用する原因と，衝撃的に作用する原因とに分類して取り扱った。機器の故障モードに対しては待機中，運転中，起動時の故障に分類し，故障原因との6通りの組み合わせに対してそれぞれ故障確率を与える式を求めた。また連続的に作用する故障原因について時間依存性が t^α の場合の故障確率を与える式も求めた。既存の故障データとの比較より， α の値としては0～8の比較的広い範囲の値が得られた。

この故障モデルを応用した信頼性解析プログラムを開発した。このプログラムの基本はフォールト・ツリー解析で，対象とする系は安全防護系である。このプログラムは次の三つの機能を備えている。

- (1) 各種の事故状態下におけるフォールト・ツリー頂上事象発生確率の値が，事故条件を入力するだけでほぼ自動的に得られる。
- (2) 系を構成する機器の故障が他の機器の故障を誘発する事による2次的効果を定量的に算定する。
- (3) 頂上事象発生確率に重大な影響を及ぼす環境条件の探索を実行する。

本プログラムを原子力船むつの非常用崩壊熱除去系に対して適用し，解析を実施した結果，特に，環境条件の探索においては第二章で取り上げた船体事故条件が上位にリスト・アップされると共に，過電流，過電圧による制御系の故障も重要要因であることが示された。

第三章における研究の結果，提唱した故障モデルにより，機器の故障確率を与える式が比較的整理された形で得られ，これにより，各種環境条件下における故障確率に整合性のある値を与えることが可能となった。また，この故障モデルを用いた解析プログラムの開発により，事故条件下の頂上事象確率，二次的效果の算定，故障原因の探索が実行できるようになり，信頼性解析における新しい機能が得られた。

第四章においては高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発を実施した。

フォールト・ツリー解析はシステム信頼性解析において主要な位置を占めており，解析プログラムも多数開発され利用されている。しかし，必ずしも使い易い

ものが整備されているとは言えず、特に第三章の信頼性解析プログラムの開発のために、高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発が必要となった。

本プログラムの解析方法は Bottom-Up の方法で、フォールト・ツリーの末端から始めて順次可能な限り数値計算を実施し、頂上へと至る方法である。

フォールト・ツリー構造の表記方法としては、一次事象、ゲートを番号であらわし、解析プログラムの処理方法に適合するように工夫した。各ゲートにおいては、ブール代数に従い、和、積の演算を実施すると共に、一次事象の積の次数が指定次数より大きいもの、発生確率が指定値より小であるものを除去し、できるだけ早い時点で不要な情報を除くようになっている。

また、同一の一次事象がフォールト・ツリー中に複数存在する場合は、その一次事象（反復事象）を含んだカット・セット間の和は各ゲートでは実施せず、頂上事象発生確率を計算する最終段階で実行する。

頂上事象発生確率の計算方法として、計算プログラム内部のデータ授受に対応した近似方法を与えた。

本プログラムでは最小カット・セットを求める事も可能で、その場合は、各一次事象を反復事象と同様に取り扱って計算を進める。

本解析プログラムの解析実施例として 6 種のフォールト・ツリーを選び解析を行った。それと同時に、WAM-BAN, WAM-CUT コードによる解析も実施し、比較を行った。また、頂上事象計算のための近似方法の精度についても検討を行った。

以上、高速フォールト・ツリー解析プログラム開発に関する研究の結果、開発したプログラムは、BAM, CUT コードと比較し、1000~10倍の高速で、頂上事象発生確率、最小カット・セットが得られ、頂上事象の値も実用上十分な精度で得られることが示された。

本プログラムの開発により、フォールト・ツリー解析が高速・大型計算機システムを用いずとも手軽に実施できるようになり、第 3 章で示した信頼性解析も実現可能となった。

第 5 章においては、GO-FLOW 手法の開発を実施した。

システム信頼性解析の中心を占めるものは、フォールト・ツリー解析であると言える。しかし、フォールト・ツリー解析には限界点もあり必ずしも使い易いとは言えない。この点を補う方法として GO 手法があり、近年、原子力の分野においても使用される様になってきた。この GO 手法は種々の利点にもかかわら

ず、なお不十分な点があることが判明した。

そこで、GO 手法を基本とし、その特徴を生かしたまま GO 手法における限界を克服する目的で、GO-FLOW 手法を開発した。

GO-FLOW 手法は、チャートによる解析対象のモデル化、信号の流れを追う解析方法という点で GO 手法と類似してしているが、信号の意味、タイム・ポイントの取り方、オペレータの機能は GO 手法とは本質的に異なっている。

GO-FLOW 手法における信号は、実際の流体の流れ、電流、情報、指令等を意味している。「信号の存在」は、実際に流体が流れている場合に加えて、流れる可能性を持っていることも意味すると定義されている。また、信号の強度により、信号の存在確率あるいは時間経過量をあらわしている。実際の時間経過の順序に対応して離散的なタイム・ポイントが定義される。

GO-FLOW 手法においては、12種のオペレータが定義されており、それぞれ機器の動作・故障等をモデル化している。その中には、弁の開閉動作をモデル化したような、GO-FLOW 手法特有のオペレータもいくつか含まれている。

この GO-FLOW 手法の特徴としては以下の項目が挙げられる。

- (1) 解析対象は GO-FLOW チャートと呼ばれるチャートにモデル化して表現される。
- (2) GO-FLOW チャート中のオペレータが系の構成機器の機能を表現し、信号が冷却材の流れ、情報等を表現する。
- (3) 一つの GO-FLOW チャートにより、一度の計算で系の動作成功/失敗の確率を複数の時刻において求めることができる。
- (4) GO-FLOW チャートは系との対応が付け易く、チャートの作成、正当性の検証は容易である。

GO-FLOW 手法の適用可能性を明らかにするために四種の系についての解析を実施した。その結果、GO-FLOW 手法により、待機安全防護系、Phased Mission Problem, 待機冗長系、Time Dependent Unavailability の解析が容易に実施できることが示された。

本研究において提唱した GO-FLOW 手法は、従来のフォールト・ツリー、GO 手法等では実施が困難な種類の解析も実施できることが示され、その有効性が確認された。今後この GO-FLOW 手法が実プラントの信頼性解析において広く利用されることが期待され

る。

本研究で示した、各種事故条件下の信頼性解析、故障モデル、信頼性解析プログラム、フォールト・ツリー解析プログラム、GO-FLOW手法は相互に深く関連を持ち、全体として、確率論的安全評価におけるシステム信頼性解析の分野において重要な役割を担うものと言える。

6.2 今後の課題

本研究の成果を第一章第二節で述べたシステム信頼性解析の問題点の観点から見なおし、今後の課題について議論を進め、将来の研究の展望について考察する。

本研究により、種々の問題点の中のある種の問題点に対しては、しかるべき解答が与えられたと考えられるが、なお多くの問題点に対しては十分な解答が得られていないばかりか、まったく手が付けられなかった問題点もある、本研究を更に発展させることによるこれら問題点の解決の可能性を中心に検討して行くこととする。

第二章では、各種事故状態あるいは環境条件下における信頼性解析が安全防護系の有効性の評価にとり重要であることを示し、その解析手順を示した。本研究で示した解析は、この種の解析の最初の試みと言えるため、事故状態等のモデル化においては各種の仮定を置き単純化している。今後、より現実に近い条件を考慮した解析を実施するために、各種モデルの改善、現実化が必要となってくる。また、この種の解析が容易に実施できるためには、解析手順をより整備された形にまとめ、標準マニュアル化することが望ましい。故障率データは本解析の最も重要な課題であり、データの蓄積が望まれるが、第三章の故障確率モデルを援用した工学的判断も有効な方法と考えられる。

第三章故障モデルでは、故障を引き起す原因を考え、従来からの故障率一定の考えを見直した点に特徴がある。この故障モデル自体には整合性があり、第二章で示した工学的判断による故障率の値の推定に有用である。この故障モデルの真の意味での実証のためには現実のデータとの比較が必要となるが、既存のデータには十分なものは存在しない。それ故、逆に、この故障モデルの考えに基づいた故障データの収集を積極的に実施し、まず、二、三の故障モードについて、この故障モデルの検討、改良を行い、より現実に即したモデルとする必要がある。

また、この故障モデルは原因を明確に考慮しているため、共通原因故障の取り扱いが直接的な形で実施できる可能性を持っている。信頼性解析プログラムでは、故障原因探索の機能が実現されているが、この機能を発展させることにより、共通原因故障の探索及び定量的評価が実現できると考えられる。

第四章の高速フォールト・ツリー解析プログラムの開発は、従来大型計算機に頼り、解析プログラムの高速化にはあまり目の向いていなかった傾向に対する異なったアプローチと言える。フォールト・ツリー解析は信頼性解析において重要な位置を占めており、系のモデル化という意味から考えると単なる道具以上のものである。このフォールト・ツリー解析が高速で実施できることにより、第三章信頼性解析プログラムで示した新たな三種類の機能が実現できた。

この高速解析プログラムの応用により、(信頼性解析の分野における)更に異なった機能の実現が可能と考えられ、この方向での研究が重要となる。なお、本論文で示した解析プログラムは更に機能を向上させる余地が残されているため、その面の研究の実施も合わせて必要である。

第五章 GO-FLOW手法では、主として、GO-FLOW手法の体系の説明とその適用可能性を示した。今後より多様な対象について解析を実施することにより、GO-FLOW手法をより洗練された手法とし、その適用範囲を拡大することが可能と考えられる。

Phased Mission Problemの取り扱いでは、従来の解析と同様、各フェーズの持続時間は決定論的に定まっているとして解析した。しかし、各フェーズの遷移に確率的要素を加えた解析を、GO-FLOW手法により実施することが考えられる。

保守・点検の解析においても、スケジュールは決定論的に定まっている例を解析した。この場合も、保守に要する時間長さを確率的に与えることは、GO-FLOW手法においては容易と考えられ、この機能がGO-FLOW手法に加わえられれば、定期点検スケジュールの評価が実施できる。つまり、一定の定期点検の条件下において、GO-FLOW手法による解析を多数回繰り返す(モンテ・カルロ法により保守時間の長さをランダムに与える。)、アンアベイラビリティの確率分布を求め、それにより点検計画を評価する。

人的要因は、本論文では扱われなかったが、新たな種類のオペレータの付加により、人的要因の取り扱いを可能とし、GO-FLOW手法をより現実に即した解析

手法にすることができる。

共通原因故障の GO-FLOW 手法への組み込みは比較的容易と考える。現に EPRI では GO 手法により共通原因故障を取り扱う方法を開発したと伝えられる。共通原因故障はその探索、評価がより重要と考えられ、第三章の信頼性解析プログラムの機能を向上させ、GO-FLOW 手法と組み合わせて用いる方向が有望である。

以上、これらの今後の課題に沿った研究を進めることにより、本研究で示したシステム信頼性解析方法をより充実・発展させ、実用的な手法とし、確率論的安全評価の普及において積極的に活用していきたいと考えている。

7. 参考文献

- (1) USAEC Report WASH-740 : Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants (March 1957)
- (2) F.R.Farmer : Reactor Safety and Siting : A Proposed Risk Criterion, Nuclear Safety, Vol.8 pp. 539-548 (1967)
- (3) U.S.Nuclear Regulatory Commission : Reactor Safety Study : An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400 (NUREG-75/014) (1975)
- (4) J.G.Kemeny : Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, Washington, US Government Printing Office, (Oct. 1979)
- (5) M.Rogovin : Three Mile Island, a Report to the Commissioners and to the Public, Washington, Nuclear Regulatory Commission Special Inquiry Group, (Jan. 1980)
- (6) A.Bayer and F.W.Heuser : Basic Aspects and Results of German Risk Study, Nuclear Safety, Vol.22 pp. 695-709 (1981)
- (7) M.Llory, et al. : The program to Study the Reliability of Safety Systems in the Paluel 1300MWe Power Plant : Organization, Methodology, First Conclusions, International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety -Chicago-USA (August 29-September 2, 1982)
- (8) J.B.Fussell : Nuclear Power System Reliability : A Historical Perspective, IEEE Trans. on Reliability Vol.R-33 pp.41-47 (1984)
- (9) NUREG/CR-2815 : Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide, (Jan.1984)
- (10) NUREG/CR-2300, PRA Procedures Guide (1983)
- (11) J.B.Fussell & J.S.Arendt : System Reliability Engineering Methodology : A Discussion of the State of the Art, Nuclear Safety, Vol. 20 pp. 541-550 (1979)
- (12) K.Terpstra : Phased Mission Analysis of Maintained Systems : A Study in Reliability and Risk Analysis, ECN-158 (Sept. 1984)
- (13) T.Matsuoka, An Application of a Reliability Analysis to the Emergency Sea Water Cooling System of the Nuclear Ship Savannah, Pap. Ship Res. Inst. No.67 (May 1982)
- (14) 立川潤次 他 : 船用原子炉系統の信頼性解析, 電力供給系統及び余熱除去系統を例として, 日本原子力学会誌 19巻 pp. 842-852 (1977)
- (15) N.S.Savannah Safety Assessment Vol.1., Engineering and Construction, Babcoch & Wilcox Co., Atomic Energy Div. ; (Aug. 1960)
- (16) N.S.Savannah Safety Assessment, Vol.2., Operations, State Marine Lines. (Aug. 1961)
- (17) 原子力船第一船むつ, 石川島播磨重工技報(1970年8月)
- (18) IEEE Trial-Use Guide : General Principles for Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems, IEEE Std 352-1972 (1972)
- (19) WASH-1400, Appendix II, Fault Tree Methodology, (1975)
- (20) WASH-1400, Appendix III, Failure Data, (1975)
- (21) A.F.Green and A.J.Bourne : Reliability Technology, Wiley-Intersci., New York (1972)
- (22) WASH-1400, Appendix IV, Common Mode Failures : Bounding Techniques and Special Techniques, (1975)
- (23) T.Matsuoka : Reliability Analysis of Emergency Decay Heat Removal System of Nuclear Ship under Various Accident Conditions, Comparison between Nuclear Ship 'Mutsu' and

- Nuclear Ship 'Savannah', Journal of Nuclear Science and Technology Vol.21. pp.266-278 (1984).
- (24) T.Matsuoka : Component Failure Model dependent on Time and Causes, Nuclear Engineering and Design, Vol.75, pp.109-116 (1983)
- (25) K.N.Fleming et al. : AIPA Risk Assessment Methodology, in HTGR Accident Initiation and Progression Analysis Status Report, General Atomics GA-A 13617 (Oct. 1975)
- (26) D.Rasmuson et al. : Common Cause Failure Analysis Techniques : a Review and Comparative Evaluation, Idaho National Engineering Laboratory, TREE-1349 (1979)
- (27) G.T.Edwards and I.A.Watson : A Study of Common-Mode Failures, United Kingdom Atomic Energy Authority, SRD R 146 (July 1979)
- (28) D.Rasmuson et al. : COMCAN II -A -A Computer Program for Automated Common Cause Failure Analysis, Idaho National Engineering Laboratory, TREE-1361 (1979)
- (29) K.Boesebeck and P.Homke : Failure Data Collection and Analysis in the Federal Republic of Germany, in : Failure Date and Failure Analysis in Power and Processing Industries, ed. A.C.Gangadharan and S.J. Brown,Jr. (The American Society of Mechanical Engineering, New York, 1977) pp.7-19
- (30) François F.Behmann : Satellite Travelling Wave Tubes Reliability Controls, 1982 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.193-198 (1982)
- (31) A.Dey Kieron : Statistical Analysis of Noisy and Incomplete Failure Data, 1982 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.246-251 (1982)
- (32) M.Kobayashi : Reliability of Soldered Connections in Single Ended Circuit Components, Welded Research Supplement 363 (Oct. 1975)
- (33) R.G.Lambert : Mechanical Reliability for Low Cycle Fatigue, 1978 Annual Reliability and Maintainability Symposium pp.179-183 (1978)
- (34) T.Matsuoka : A Computer Program for Automated Reliability Analysis under Extreme Environmental Conditions, American Nuclear Society Trans. Vol.44 pp.363-364 (1983)
- (35) T.Matsuoka : FFTA : a Fast Fault Tree Analysis Program, Nuclear Engineering and Design, Vol.91 pp.93-101 (1986)
- (36) 渡辺憲夫 他 : フォールト・ツリー解析における点推定と不確実さ解析 JAERI-M82-215 (1983)
- (37) R.B.Worrell and D.W.Stack : A SETS User's Manual for Fault Tree Analyst, NUREG/CR-0465 SAND 77-2051 (1978)
- (38) 石神努 他 : フォールト・ツリー解析コードシステム : FAT-J 使用手引,JAERI-M83-169 (1983)
- (39) F.L.Levereng and H.R.Kirch : User's Guide for the WAM-BAM Computer Code, EPRI-217-2-5 (1976)
- (40) F.L.Levereng and H.R.Kirch : WAMCUT-A Computer Code for Fault Tree Evaluation, EPRI-NP-803 (1978)
- (41) W.V.Gately and R.L.Williams : GO Methodology Overview, EPRI-NP-765 (1978)
- (42) 松岡猛, 小林道幸 : GO 手法による信頼性解析, 昭和59年日本原子力学会秋の分科会 (1984)
- (43) T.Matsuoka and M.Kobayashi : GO-FLOW : A Reliability Analysis Methodology Applicable to Piping System, International ANS/ENS Topical Meeting on Probabilistic Safety Methods and Applications, San Fransisco U.S.A. Paper NO. 175 (February 24-March 1, 1985)
- (44) KAMAN SCIENCES CORPORATION, 1500 Garden of the Gods Road, P.O.Box 7463, Colorado Springs, Colo. 80933, U.S.A.
- (45) J.A.Wenger and R.L.Williams : Sequoyah Residual Heat Removal System Reliability Evaluation, K-81-42U(R), Kaman Sciences Corporation (1981)
- (46) G.R.Burdick et al. : Phased Mission Analysis : A Review of New Developments and An Application, IEEE Transactions on Reliability, Vol.R-26 pp.43-49 (1977)
- (47) W.E.Vesely and F.F.Goldberg : FRANTIC-A Computer Code for Time Dependent Unavailability Analysis, NUREG-0193 (Oct. 1977)

(48) B.Gateley : An Introduction to GO, K-75-94U
(R), Kaman Sciences Corporation (1975)

8. 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、本研究の遂行に際し御指導、御協力を戴いた関係者に感謝の意を表します。

東京大学工学部原子力工学科近藤駿介教授には本研究の遂行に関して終始温い御指導並びに有益なる御助言を賜り深く感謝の意を表わす次第であります。

日本原子力研究所リスク評価解析室飛岡利明室長はじめ研究室の皆様方には、多くの計算プログラムの使用の機会を与えて下さると共に、貴重な助言を数多く賜りましたことに深く感謝の意を表します。

筑波大学構造工学系成合英樹教授には、筆者がこの分野での研究に携る端緒を与えて下さり、今日に至るまで親身に御指導とお励ましを戴きましたことに心からお礼申し上げます。

船舶技術研究所原子力技術部小林道幸室長には、本研究実施の環境を長年にわたり整えて下さると共に、御指導を賜りました事厚く感謝致します。同部稲坂富士夫研究官には、数多くの計算プログラムを実際に動かすに当り助力をいただきました事厚くお礼申し上げます。また、原子力船部前部長中田正也博士及び原子力技術部部長布施卓嘉氏には、本研究遂行にあたり種々御援助戴いたこと御礼申し上げます。

付録1 GO手法における標準オペレータ

GO手法の概略は既に第二章「GO手法の特徴及び限界」において説明されているので、ここでは、GO手法において定義されている標準オペレータについて説明する。標準オペレータは、タイプ1～17の16種類(タイプ4は欠番)が定義されている。

以下一般的説明、オペレータの機能、その他のコメントを与える。GOチャートにおける記号表現はまとめて図付-1に示す。また以下の説明において共通に使用されている記号には次のものがある。

S : 入力信号

R : 出力信号

P_g : 正常動作する確率

P_p : 早まって作動する確率

P_f : 作動失敗する確率

∞ : タイム・ポイント値の最大値

付1.1 オペレータ・タイプ1

このオペレータは、最も一般的なタイプのオペレータで、二つの状態を記述したい時に用いる。即ち、オペレータ自体は信号を発しないが、信号を通すか否かといった機能を持っている。機器の正常/故障状態をモデル化したオペレータである。

表付-1にオペレータの機能を示す。オペレータに与えるデータは、 P_g 、 P_f の値である。

表付-1 タイプ1オペレータ

入力信号 タイム・ポイント	出力信号	
	タイム・ポイント	確率
∞	∞	1.0
$t < \infty$	t	P_g
	∞	P_f

適用コンポーネント例としては、抵抗(正常、断線)、電球(正常、断線)、配管(正常、閉塞)等がある。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ21である。

付1.2 オペレータ・タイプ2

このオペレータは複数の入力信号のうちタイム・ポイント値の最小のものを出力信号のタイム・ポイント値として取る。つまり、いくつかの信号のうち最も早く到達した信号により出力が決定される。フォールト・ツリーで用いられるORゲートに相当する。

このオペレータの機能を具体的な例について見てみると次のようになる。入力信号 S_1, S_2 共に“0”, “1”, “2”のタイム・ポイントにおいてそれぞれ、0.25, 0.5, 0.25の確率で信号が来るとする。出力信号Rが各タイム・ポイントにおいて存在する確率は、表付-2の様になる。

表付-2 タイプ2オペレータの機能の数値による説明例

出力信号 タイム・ポイント	確率	計算方法
0	0.4375	$0.25 + 0.25 - 0.25 \times 0.25$
1	0.5000	$1.0 - R(0) - R(2)$
2	0.0625	0.25×0.25

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ22である。

付1.3 オペレータ・タイプ3

このオペレータは、一つの入力信号に対し、出力信号を1つ発する。オペレータの動作モードによっては入力信号がなくとも、出力信号を発することもある。これは熱、衝撃等により、機器が作動してしまうことをモデル化している。

表付-3にオペレータの機能を示す。このオペレータにおいて、 $P_p=0.0$ の場合は、タイプ1のオペレータと同じ機能となる。オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

表付-3 タイプ3オペレータ

入力信号 タイム・ポイント	出力信号	
	タイム・ポイント	確率
∞	0	P_p
	∞	P_g+P_f
0	0	P_g+P_p
	∞	P_f
$0 < t < \infty$	0	P_p
	t	P_g
	∞	P_f

付1.4 オペレータ・タイプ5

このオペレータは、信号発生器をモデル化している。解析対象とするシステムの外部入力信号に用いることが多い。GOチャート中に、二つ以上このオペレータが存在する場合は、各々、独立した信号を出す。

オペレータに与えるデータは、各タイム・ポイントにおける信号発生確率である。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ25である。

付1.5 オペレータ・タイプ6

このオペレータは通常開いているスイッチが入力信号 S_2 が到達した時に閉じ、入力信号 S_1 をRへと伝達する事をモデル化している。

表付-4にオペレータの機能を示す。入力信号 S_1 と S_2 とでは、表付-4よりわかるように役割が異なっている。又、入出力信号としては、Off-to-On信号を考えている。

このオペレータは、通常閉状態のバルブが指令により開かれる場合も表現できる。

オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

GO-FLOWにおいて、対応するオペレータはタイプ26である。

付1.6 オペレータ・タイプ7

このオペレータは、タイプ6の逆で、通常は閉じているスイッチが、入力信号 S_2 が到達した時に開き、 S_1 の通路が不通になるという働きをモデル化している。

表付-5にオペレータの機能を示す。表の機能を理解するためには、信号はOff-to-On信号であり、各タイム・ポイントにおける確率とは、信号がそのタイム・ポイントにおいて到達する確率であることを念頭に置く必要がある。

表付-4 タイプ6オペレータ

入力信号 S_1 タイム・ポイントt	入力信号 S_2 タイム・ポイントt'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
∞	any	∞	1.0
t < ∞	∞	t	P_p
		∞	P_g+P_f
	t' ≤ t	t	P_g+P_p
		∞	P_f
	t < t' < ∞	t	P_p
		t'	P_g
		∞	P_f

れる。入力信号，出力信号共複数個ある。

オペレータに対するデータとして，事前に，特定の入力信号のタイム・ポイントの組合せに対応して出力信号のタイム・ポイントの組合せ及び確率Pを与えておく。例えば， $(S_1, S_2, S_3) = (0, 1, 2)$ に対して $(R_1, R_2) = (2, 0)$ ， $P = 0.8$ を与えておくと，入力信号1, 2, 3にそれぞれタイム・ポイント0, 1, 2に信号があった場合，出力信号1, 2にそれぞれタイム・ポイント2, 0で信号が出て行く確率が0.8となる。

もし，入力信号が事前に定義された組合せの中のない場合は，出力信号はすべて“∞”のタイム・ポイント値において出て行く。

付1.13 オペレータ・タイプ14

このオペレータは複数の入力信号線と，一本の出力信号線を持っている。

入力信号のタイム・ポイント値に対して，線型結合の結果得られる値により，出力信号のタイム・ポイント値が決定される。入力信号のタイム・ポイント値を $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ とすると，

$$A = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times T_i$$

の式により得られる値Aを用いて，出力信号のタイム・ポイント値 T_R は

$$T_R = \max(0, \min(A, \infty))$$

により与えられる。出力信号の確率は，入力信号のタイム・ポイントが T_1, T_2, \dots, T_n の値を取る場合の確率に等しい。

オペレータに与えるデータは， a_0, a_1, a_n の値である。

付1.14 オペレータ・タイプ15

このオペレータは，入力信号に対するゲートの役割を果している。入力信号があるタイム・ポイントの間 ($T_3 \sim T_4$) に到着し，なおかつ，入力信号の確率が $P_1 \sim P_2$ の間の値を取る時，出力信号はタイム・ポイント T_1 において確率 P_s (入力信号の有する確率値) の値を持つ。入力信号が上記条件を満たさない場合は，出力信号はタイム・ポイント T_2 において確率 P_s の値を持つ。

オペレータに与えるデータは， $T_1, T_2, T_3, T_4, P_1, P_2$ の値である。もし， T_1 の値として負の値を与えた場合は，出力信号のタイム・ポイント値は入力信号のタイム・ポイント値と同一となる。

付1.15 オペレータ・タイプ16

このオペレータは On-to-Off 信号を扱う系において閉じていたスイッチが開く場合をモデル化したものである。入力信号1は On-to-Off 信号，つまり「信号の停止」を知らせるものでなくてはならない。入力信号2は On-to-Off 信号でも Off-to-On 信号でも良い。出力信号も On-to-Off 信号である。

表付-6にこのオペレータの機能を示す。この表において， P_g は正常動作する確率， P_f は作動失敗する確率で，タイム・ポイント0においてスイッチが開いてしまう確率， P_p は早まって動作する確率で，スイッチが閉じたままである確率をあらわす。

オペレータに与えるデータは P_g, P_f, P_p の値である。

このオペレータにより，開状態のバルブが閉じる場合，作動中のポンプが停止する場合等も表現できる。

表付-6 タイプ16オペレータ

入 力 信 号 S_1 タイム・ポイント t	入 力 信 号 S_2 タイム・ポイント t'	出 力 信 号	
		タイム・ポイント	確 率
0	any	0	1.0
$t > 0$	$t' \leq t$	0	P_f
		t	P_p
		t'	P_g
	$t' > t$	0	P_f
		t	$P_g + P_p$

付1.16 オペレータ・タイプ17

このオペレータは開いていたスイッチが閉じる場合をモデル化したものである。入力信号1は On-to-Off 信号であり、入力信号2は On-to-Off 信号でも、Off-to-On 信号でも良い。出力信号は Off-to-On 信号である。この点は、タイプ16とは異なり、On-to-Off の入力信号が Off-to-On の出力信号へと変換されている。

表付-7 にこのオペレータの機能を示す。表において、 P_f は作動失敗する確率で、スイッチがタイム・ポイント0から閉じてしまっている確率、 P_p は早まった動作する確率で、スイッチが開いたままである確率をあらわす。

オペレータに与えるデータは、 P_g, P_f, P_p の値である。

表付-7 タイプ17オペレータ

入力信号S ₁ タイム・ポイントt	入力信号S ₂ タイム・ポイントt'	出力信号	
		タイム・ポイント	確率
0	any	∞	1.0
t > 0	t > t'	0	P_f
		∞	P_p
		t'	P_g
	t ≤ t'	0	P_f
		∞	$P_g + P_p$

付録2 GO手法による解析例

ここではGO手法による具体的な解析例2例を示す。GO-FLOW手法との比較も考慮して、解析対象としては、第六章において使用したサンプル問題(1)及び第七章において解析を実施した原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系を選んだ。

付2.1 サンプル問題

付2.1.1 GOチャートによる表現

対象とする系は、第五章において使用した電気回路であり、図5-1にその回路図が示されている。

図5-1の回路をGOチャートに表現すると図付-2のようになる。図中、オペレータの円内の最初の数字はオペレータ・タイプを示し、後の数字はオペレータ番号を示す。表付-8に、各オペレータに与えたデータ及び、オペレータの意味、対応機器を示す。

解析実施結果の出力を図付-4~6に示す。

表付-8 オペレータに与えるデータ (サンプル問題1)

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

付2.1.2 GO1 ステップ

図付-4 は GO1 ステップの実施結果で、対象とする系を GO チャートに表現した場合の構造、タイム・ポイントの取り方、が示されている。

第4行目から15行目は、オペレータに関する情報である。第1列はオペレータ番号、第2列はオペレータ・タイプ、第3列はカインド番号である。カインド番号はオペレータにデータを与える時用いる。第4列目以降は入出力信号線の番号である。

例えば、第11行目においては、5番のオペレータは、タイプ6のオペレータであり、カインド番号は5番、入力信号は、2番と3番で、出力信号は4番であることを示している。

第16行目は最終信号線の番号を示す。

第17行目～24行目はタイム・ポイントの定義である。

第25行目～37行目は信号線の連結状態を示している。第1列は信号線番号、第2列は、信号線が出るオペレータの番号、第3,4列は、そのオペレータのタイプ、カインド番号である。第5列以降は信号の到達するオペレータの番号である。

付2.1.3 GO2 ステップ

図付-5 は GO2 ステップの実施結果で、オペレータに与えた、動作確率のデータが示されている。

第1,2行目は GO2 ステップのタイトル、実行実施年月日時刻を示す。第3,4行目は、GO1 ステップの結果を参照することを示す。

第5行目～第16行目にオペレータに与えたデータが示されている。第1列は行番号、第2列はオペレータのカインド番号、第3列はオペレータ・タイプを示す。第4列以降は動作確率の値である。例えば、第7行目タイプ5のオペレータの場合は、信号発生は1つのタイム・ポイントにおいてあり、タイム・ポイント1において、1.0の確率で信号が出ることを意味している。第10行目、タイプ1のオペレータの場合は、 $P_g=0.9$ 、 $P_f=0.1$ の値が与えられていることを示す。第11行目タイプ6のオペレータの場合は、 $P_g=0.7$ 、 $P_f=0.2$ 、 $P_p=0.1$ の値が与えられていることを示す。

第15行目は、入力データの終了を示している。

第17行目以降は、以上のデータの要約である。

付2.1.4 GO3 ステップ

図付-6 は GO3 ステップの実施結果で、計算の途中過程及び結果が示されている。

第9行目～12行目は、計算実施時の条件である。

第13行目～65行目は、計算の途中経過の記録である。

第16行目は、1番のタイプ5のオペレータを示す。

第17行目は、上記オペレータの動作の結果1番の信号がタイム・ポイント1において発生する確率が1.0であることを示している。

第22行目は、4番のタイプ1のオペレータを示す。

第23行目は、4番のオペレータの動作の結果、2番の信号がタイム・ポイント4において存在し、3番の信号がタイム・ポイント2において存在し、さらに6番の信号がタイム・ポイント3において存在している場合の確率が、 1.0×10^{-1} であることを示している。

同様に、第61行目は、9番のタイプ2のオペレータを示している。第62～65行目は、9番の信号がそれぞれ1～4のタイム・ポイントにおいて存在する確率を示している。

第66～76行目は、最終信号線9番の存在確率値の再掲である。

第78行目は計算結果の誤差を示している。これは計算過程において、端数の取り扱いに起因して発生する誤差である。

第79行目～85行目に、タイム・ポイント値の順に最終信号の存在確率を示したもので、解析の最終結果である。

付2.1.5 解析結果

本解析結果の意味は次のようになる。

最終信号9番の存在は、少なくとも1つのランプが点灯状態になることを意味している。それ故、最後の結果は、

電源接続時(タイム・ポイント1)に少なくとも1つのランプが点灯する確率が 1.3824×10^{-1} 、

スイッチ1を閉じる指令を出した時(タイム・ポイント2)に少なくとも1つのランプが、点灯状態になる確率が 4.6368×10^{-1} 、

スイッチ2を閉じる指令を出した時(タイム・ポイント3)に少なくとも1つのランプが、点灯状態になる確率が 1.8144×10^{-1} 、

どちらのランプも点灯しない(タイム・ポイント4)確率が 2.1664×10^{-1} 、

なお、本解析例では FF コード群による出力結果は省略した。

