船舶技術研究所報告　第31巻　第6号　（平成6年12月）総合報告

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 became 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. 不確実さ解析機能 ……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実さ解析機能 ……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 不確実さ解析結果 ……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、舶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の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、舶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．不確実さ解析機能の整備

この信頼性解析手法GO-FLOWの解析体系は、舶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ーズド・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.Farmer[7]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ラスムッセン教授を主査とするReactor Safety Study（RSS）[1]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って良い。

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

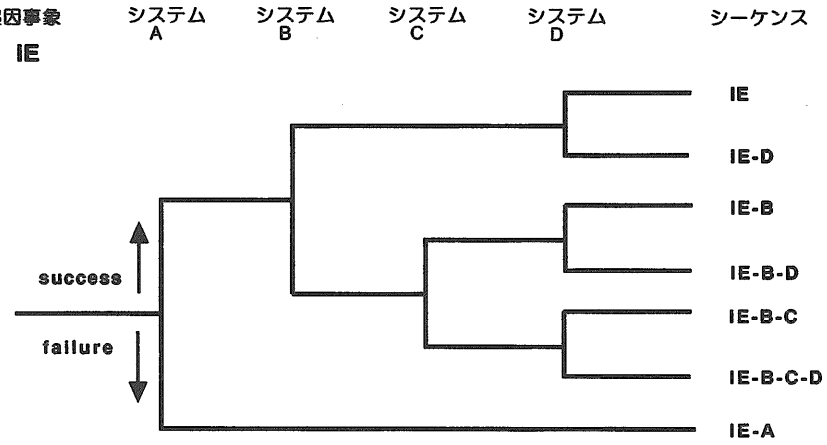
事故の発生頻度の評価は、起因事象の発生頻度と安全防護系の信頼度の評価から成り立っている。起因事象、例えば主給水系ポンプの停止、だけでは大事故には至らない。システム中の安全装置がすべて作動しない場合に限って原子炉が危険な状態になり大事故が発生するといえる。つまり、システム中の安全機能の異常・故障の様々な組み合せを体系的に分析する必要がある。

この分析手段としてラスム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。

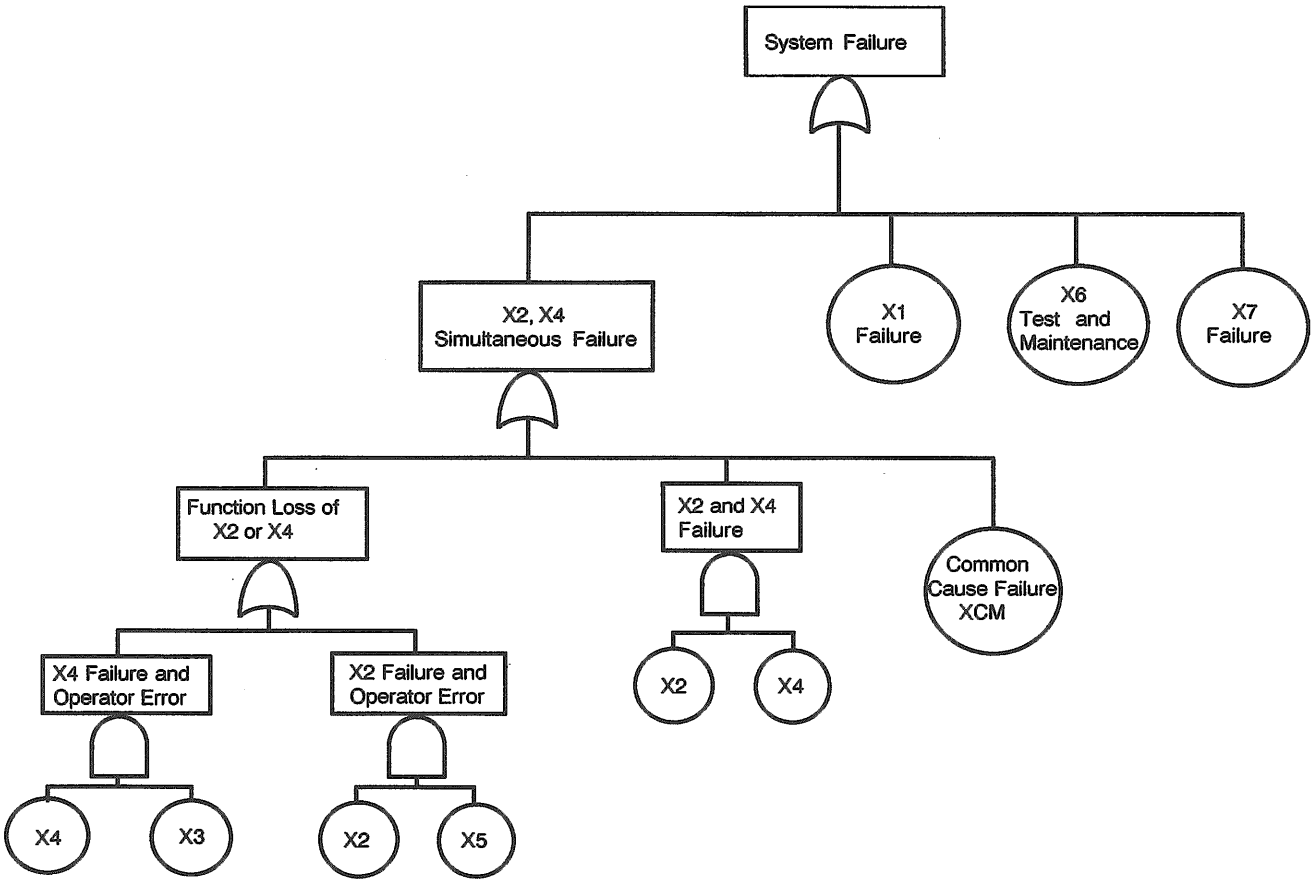
イベント・ツリーは炉心損傷につながり得る複雑なプラント内の事故シーケンスの展開に適した解析方法で図－1に示す様なツリー構造を持っている。左端に起因事象が置かれ、順次各種安全機能／安全系統を表す見出し（ヘディング）が上部に書かれている。各ヘディングにおける機能の成否に対応して事故のシーケンスが上下に分岐して行く。この様にして、論理的に起こり得る全ての事故シーケンスを同定することができる。

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系統を後ろへ置く。

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、ラスム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とする。

（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・ダイヤグラム[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）ペトリ・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・ツリーとペトリ・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様になっており、システム状態の全ての組み合せを考えるため事故シーケンス数は膨大なものとなってしまう。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証するのが難しい、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、まず作動要求時に正常に起動するかどうかが問題となり、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は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。

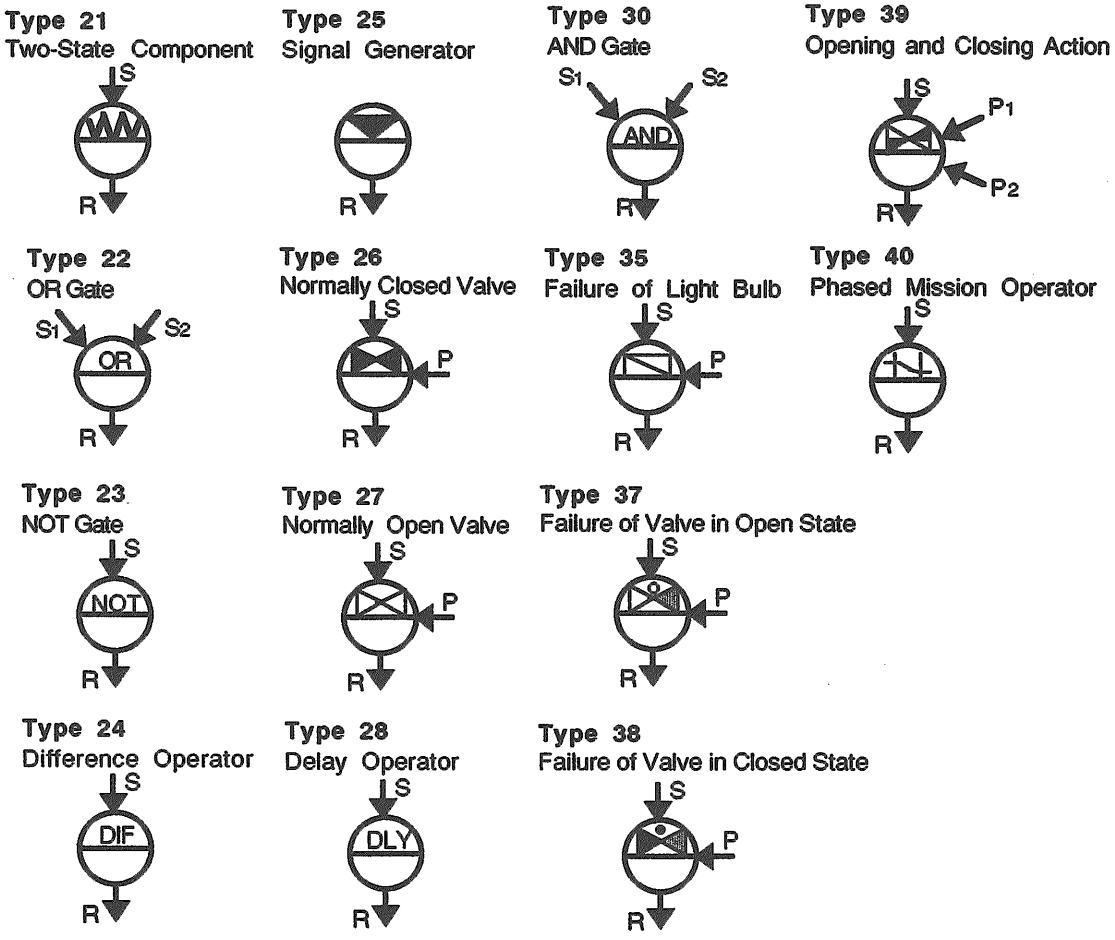
（1）タイム・ポイントtにおける主入力信号S（t）は出力信号R（t）のみに影響する。

（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′ ≦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－I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_g　　：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	utput Signal Intensity
21	$S(t)$	― ― ―	$R(t)=S(t)\cdot P_g$
22	$S_1(t), S_2(t), \ldots, Sn(t)$	― ― ―	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	$S_1(t), S_2(t), \ldots, S_n(t)$	― ― ―	Probability that all the input signals exist
35	$S(t_1).S(t_2), \ldots, S(t)$	$P_1(t_1), \ldots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \ldots, P_2(t_n)$ ...	$R(t)=S(t)\cdot \exp\left\{-\lambda \sum_i \sum_{t_k \le t} Pi(t_k) \min[1.0, S(t_k)/S(t)]\right\}$
37	$S(t)$	$P_1(t_1), \ldots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \ldots, P_2(t_n)$ ...	$R(t)=S(t)\cdot \exp\left[-\lambda \sum_i \sum_{t_k \le t} P_i(t_k)\right]$
38	$S(t)$	$P_1(t_1), \ldots, P_1(t_n)$ $P_2(t_1), \ldots, P_2(t_n)$	$R(t)=S(t)\cdot \left\{1.0-\exp\left[-\lambda \sum_i \sum_{t_k \le t} P_i(t_k)\right]\right\}$
39	$S(t)$	$P_1(t)$ $P_2(t)$	$R(t)=S(t)\cdot O(t),$ $O(t)=O(t')+[1.0-O(t')]\cdot P_1(t)\cdot P_o$ $R(t)=S(t)\cdot O(t), \quad O(t)=O(t')\cdot[1.0-P_2(t)\cdot P_c]$
40	$S(t)$	― ― ―	$R(t)=1.0 \quad (t<t_i)$ $R(t)=S(t) \quad (t_i \le t \le t_j)$ $R(t)=S(t_j) \quad (t>t_j)$

P_p=probability for premature operation　　P_o=probability for valve successfully open
P_g=probability for successful operation　　P_c=probability for valve successfully close.
t'=time point immediately before the time point t　　$O(t)$=probability for valve in open state

P_f　：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。

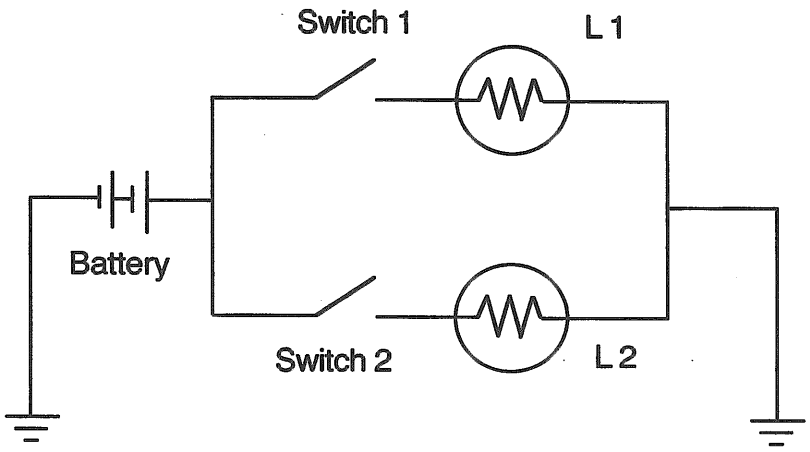
一方、時間経過に伴う機器の故障をモデル化したオペレータ（タイプ35、37、38）の副入力信号は時間経過量を表すために用いられているため、信号の強度は1.0以下である必要はない。逆に、この場合は最小単位量（単位時間間隔）の整数倍の値を取ることが多い。

6.5　解析手順

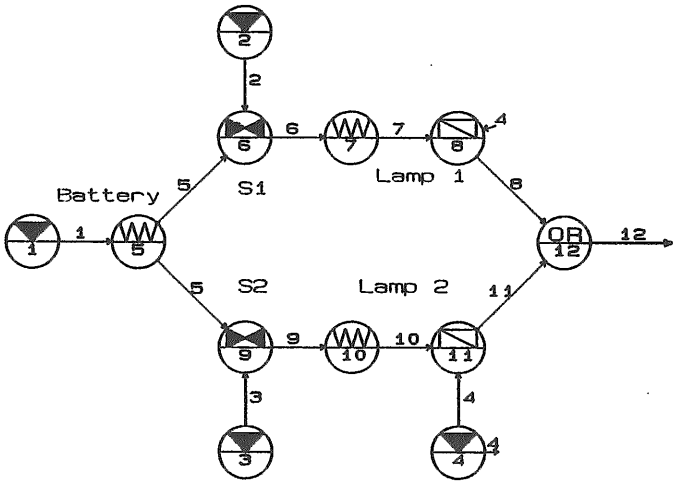
解析の手順は、信号の発生源（タイプ25のオペレータ）から出発し、順次信号の流れの方向に沿って計算を実施していく。各オペレータの機能に従い、主、副入力信号から、出力信号を求め、これを次に位置するオペレータの入力信号とする。この手順を繰り返すことにより、最後に最終出力信号（系の動作状態を判断する信号）の全ての時刻（タイム・ポイント）における強度が求まる。

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の様に定義する。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)～R(6)=1.0
2	25	スイッチ1閉指令発生	R(2)=1.0, その他=0.0
3	25	スイッチ2閉指令発生	R(5)=1.0, その他=0.0
4	25	時間経過量生成	R(4)=10.0, R(6)=10.0, その他=0.0
5	21	バッテリーの機能正常	Pg=0.9
6	26	スイッチ1の正常動作確率	Pp=0.1, Pg=0.7
7	21	ランプ1の点灯時の正常確率	Pg=0.8
8	35	ランプ1の点灯中の故障発生	λ=0.001/h
9	26	スイッチ2の正常動作確率	Pp=0.1, Pg=0.7
10	21	ランプ2の点灯時の正常確率	Pg=0.8
11	35	ランプ2の点灯中の故障発生	λ=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