

原子力プラントの確率論的安全解析支援用プログラムの開発

Development of Programs to Assist Probabilistic Safety Analysis for Nuclear Power Plants

近年、原子力プラントの安全性を検証するため、確率論的安全解析手法が広く用いられ始めている。この解析の主要部分をなすイベントツリー分析、及びフォルトツリー分析を支援するコンピュータプログラムとして、それぞれ“PANET”及び“SUPKIT”を開発した。

“PANET”はFortranⅣで約8,000ステップのプログラムで、複数の系統間に共通原因故障がある場合にも、正しく事故リスク(事故発生頻度×影響の大きさ)の推定が可能である。一方、“SUPKIT”は、FortranⅣで約4,000ステップのプログラムで、ヒューマンエラーなども考慮しながら、系統の故障確率の計算が可能である。本プログラムを外部電源喪失事故の分析に適用した結果、同様な事故解析に対する本プログラムの実用性を確認することができた。

佐々木良一*
大沢康男**
富永研司***

Ryôichi Sasaki
Yasuo Ôsawa
Kenji Tominaga

1 緒言

近年、原子力プラントのいっそうの安全性向上が要求されている。この安全性を検証するため、米国原子力規制委員会のラスムッセン報告で提案された確率論的安全解析手法¹⁾が広く用いられ始めている。従来の安全解析は、あらかじめ想定された特定の重大事故のプロセスとその影響解析にとどまっていたが、上記手法を用いて解析すれば、発生するかも知れない事故の種々の形態を広く漏れなく扱え、事故のプロセスや影響だけでなく、機器の信頼性や安全装置の信頼度と関係付けて事故の発生頻度及びリスク(「事故影響×発生頻度」と

定義)の推定が可能である。
しかし、この解析には多大の計算量を必要とするので、効率的かつ正確な計算のためには、解析支援用プログラムの整備が必要とされていた。本論文では、上記の目的のために日立製作所で開発した二つのコンピュータプログラムの機能とBWR(Boiling Water Reactor)プラントの安全解析への適用に基づく、同プログラムの有効性の検証結果について述べる。

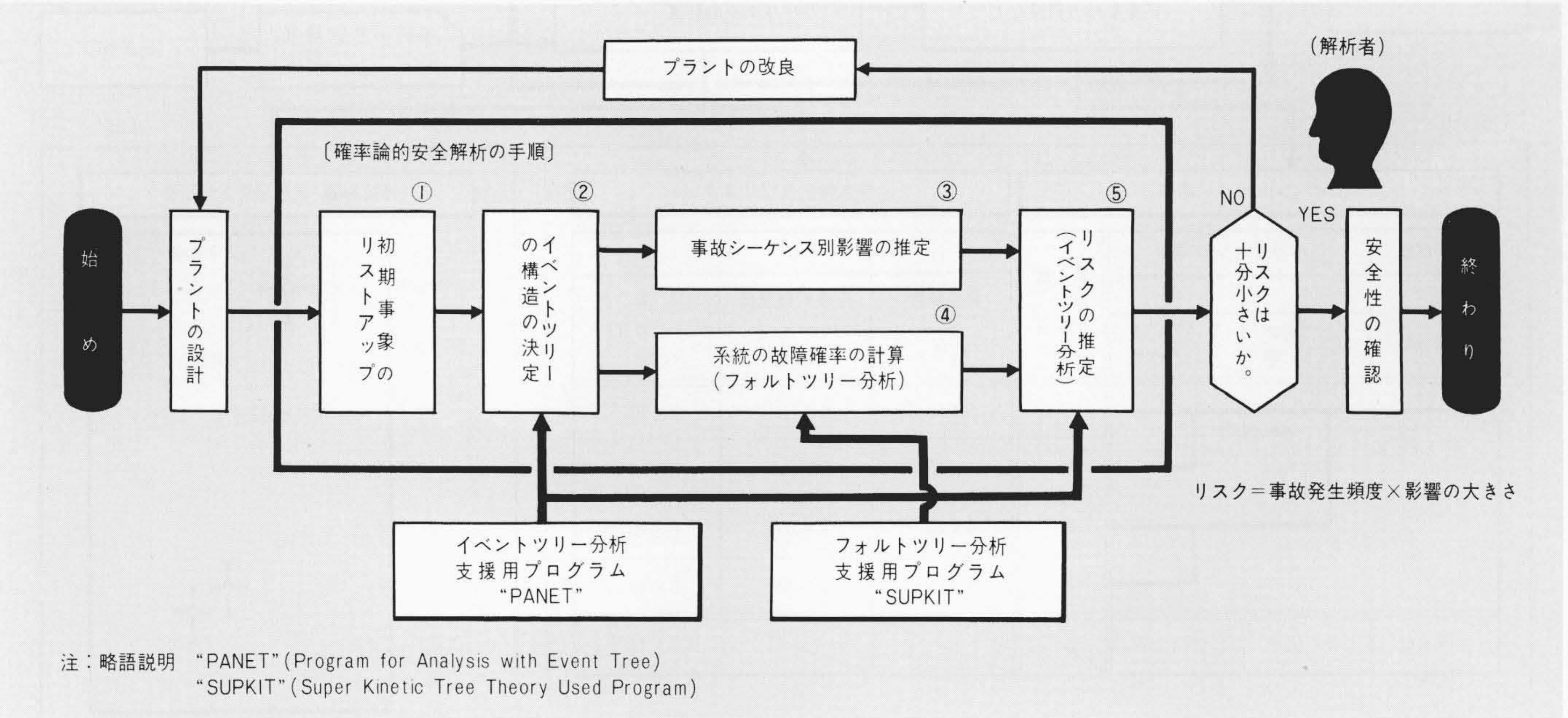


図1 確率論的安全解析の手順と支援用プログラム 確率論的安全解析の主要部分は、イベントツリー分析とフォルトツリー分析から成っている。これらの解析結果は、プラントを改良したり、プラントの安全性を確認するのに用いられる。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 *** 日立製作所電力事業本部

2 解析支援用プログラムの開発

確率論的安全解析は、ETA(イベントツリー分析)とFTA(フォルトツリー分析)を組み合わせ、図1に示すような手順で実施するものである。ETAの実施を助けるためプログラム“PANET”(Program for Analysis with Event Tree)を開発し²⁾、FTAの実施を助けるためプログラム“SUPKIT”(Super Kinetic Tree Theory Used Program)を開発した³⁾。

2.1 イベントツリー分析支援用プログラム“PANET”

ETAは、次の二つの過程から成っている。

(1) 定性的ETA過程(図1中の②)

大事故の引き金となる可能性のある異常事象(初期事象と呼ぶ。)と、事故の拡大を防止する諸系統(炉停止系、非常用炉心冷却系など)の作動の成功、失敗によって生ずるすべての事故波及過程(事故シーケンスと呼ぶ。)を、1枚のET(イベントツリー)図を用いることにより、樹木状に表示することができる。上流側の弁閉鎖機能及びフィルタリング機能という二つの事故拡大防止機能がある系で、初期事象として配管破断が生じた場合の各事故シーケンスは、図2の左下部のようなETで表示することができる。このETで、例えば、事故シーケンス S_3 は、配管破断が生じた際に上流側の弁の閉鎖には失敗するが、放射能除去フィルタの機能は正しく働く場合を表わしている。

(2) 定量的ETA過程(図1中の⑤)

FTAにより計算した諸系統の故障確率(非信頼度)と、各種の事故影響推定モデルにより計算した影響の大きさをを用いて、事故シーケンス別に発生頻度とリスクを推定することが

できる。図2の例では、影響として住民被曝線量を採用しており、リスクは単位時間当たりの被曝線量で与えられている。

このようなETAを実施することにより、発生の可能性のある事故シーケンスを、広範囲かつ漏れなく表現できるとともに、事故シーケンス別のリスクの推定が容易となっている。これを支援するために開発したプログラム“PANET”は、Fortran IVで約8,000ステップから成り、約500kバイトのメモリを必要とする。その入出力及び構成は、図2に示すとおりであり“PANET-Pre”は過程(1)を、“PANET-Main”は過程(2)をそれぞれ実施するためのものである。

本プログラムを使用することにより、特に次のような効果が期待できる。

(1) 複数の系統(安全防護系など)間に共通原因故障がある場合の解析の容易化・正確化

系統間に共通原因故障がある場合には、共通原因となる故障(例えば、全通常電源喪失故障)が認識できても、事故シーケンス発生頻度の正確な計算は容易でなく、従来は複雑な条件付確率演算を繰返し実施しなければならなかった。共通原因故障を無視して計算を行なうと、発生頻度を大幅に過少評価してしまう可能性があり、この計算を容易化することの必要性は高かった。

このため、故障原因の共通性さえ指定すれば、正しく自動的に計算を行なえるようにするため、信頼性理論の分野で近年用いられ始めたプライムインプリカントセット法⁴⁾を“PANET-Main”に導入している。

(2) 事故シーケンス発生頻度推定値確率分布計算の容易化・高速化

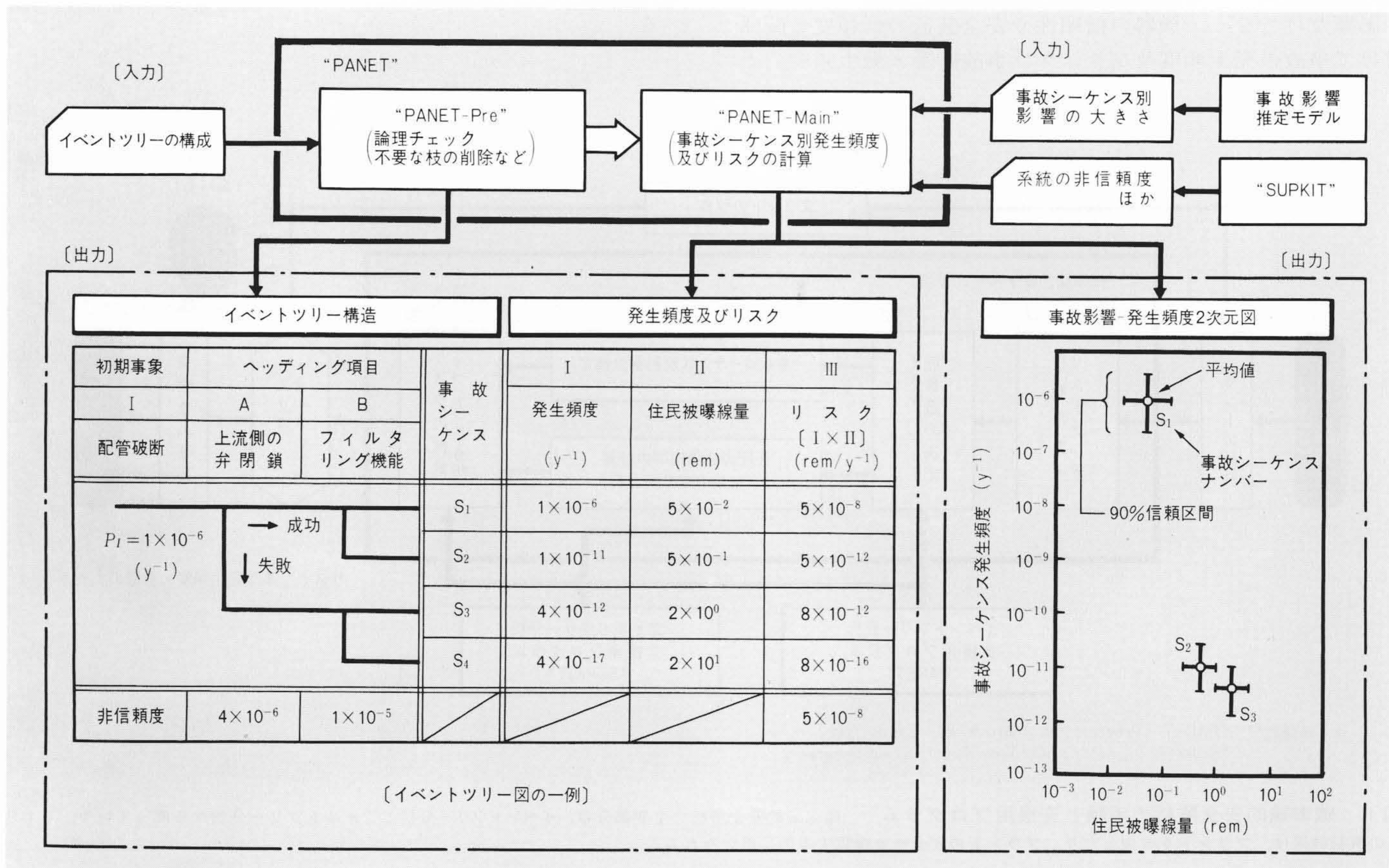


図2 “PANET”の構成と入出力 イベントツリー分析支援用プログラム“PANET”は、Fortran IVで約8,000ステップから成る。“SUPKIT”によって計算された事故拡大防護系の非信頼度(アンアベイラビリティ)などを入力として、事故シーケンス別のリスクを計算する。

各機器の故障率に不確実性があるため、それらを用いて計算した事故シーケンス発生頻度に生ずる不確実性も考慮せざるを得ない。したがって、事故シーケンス発生頻度推定値の確率分布を計算しておくことが望ましい。このため、計算時間—推定精度比が良いとされている(a)カンテリーの不等式を用いる方法、(b)ジョンソンの S_B 分布を用いる方法、(c)数値積分を用いる方法の三つをプログラムに組み込んでいる^{2),5)}。計算時間は、(c)、(b)、(a)の順に小さくなり、計算精度は、(a)、(b)、(c)の順に良くなるので、目的に応じて計算方法を使い分けることができる。

(3) E T図やリスク比較図の作成、修正に要するマンパワーの低減

E Tの一つの枝の追加、削除を行なうと、E Tは構造的変化を伴うため、大幅な図の変更と修正に、多大の時間を要していた。このため、入力データの簡単な修正により、出力の修正ができるようにしている。また、出力結果をそのまま提出資料として使えるようにするため、出力フォーマットに配慮するとともに、X-Yプロッタによる出力も可能としている。

このような機能をもつプログラムについては、その必要性が指摘されながら⁶⁾、国内外で開発がなされていなかったものである。

2.2 フォルトツリー分析支援用プログラム“SUPKIT”

F T Aでは、E Tに示された事故の拡大を防止する諸系統の非信頼度を、次の手順により計算する。

(1) 系統が機能を喪失するに至る原因をF T(フォルトツリー)で表現する。図2の例で示した上流側の弁閉鎖失敗に関するF Tは、例えば、図3の左下部に示すようになる。

- (2) 系統の非信頼度計算に必要な構成機器の故障率、系統の点検周期、系統の動作時間などを与える。
- (3) 系統を故障に至らせるための必要最小の機器故障の組合せ(最小カットセット)を求める。
- (4) 最小カットセットを用いて確率演算を行ない、系統の非信頼度を計算する。

F T Aでは、信頼性ブロック図などを用いる場合と異なり、機器故障だけでなく、ヒューマンエラーも容易に扱えるという長所をもっている。

これを実行するプログラム“SUPKIT”(Fortran IV 4,000ステップ)の入出力及び構成は、図3に示すとおりである。“SUPKIT”は、三つのサブプログラムから構成されている。TREELは、F Tの論理エラーのチェックと、計算に便利な形へのツリーの変換を行なう。MICSUPは、TREELで編集したF Tの論理に従って最小カットセットを数え上げる。SUPER-KITTは、この最小カットセットを用いて、任意の点検周期での系統の非信頼度の計算を行なう。系統の非信頼度は、モンテカルロシミュレーションを用いることにより、平均値だけでなく分布も求めることができる。これら“SUPKIT”の出力は、図3に示すようなものであり、X-Yプロッタによる出力も可能である。

本プログラムの出力は、“PANET”の入力として、事故シーケンス発生頻度を推定するのに用いられる。

なお、“SUPKIT”単独に、次のような目的に使用することも可能である。

- (1) 点検周期が系統の非信頼度に与える影響
- (2) 各機器の故障の系統故障への寄与の評価

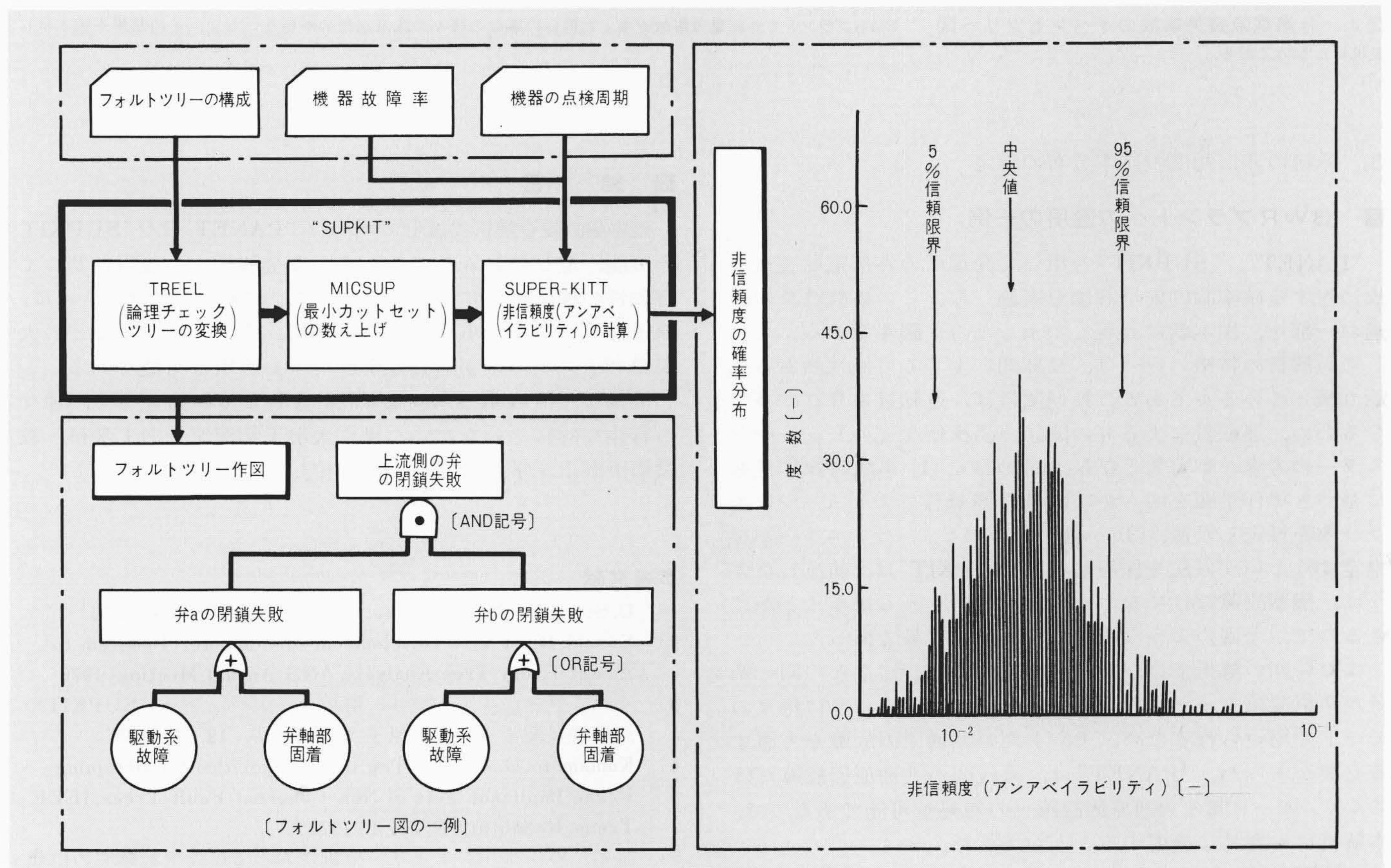


図3 “SUPKIT”の構成と入出力 フォルトツリー分析支援用プログラム“SUPKIT”は、Fortran IVで約4,000ステップから成る。“SUPKIT”の出力は“PANET”の入力として用いられるほか、単独に系統の信頼性の検討にも用いることができる。

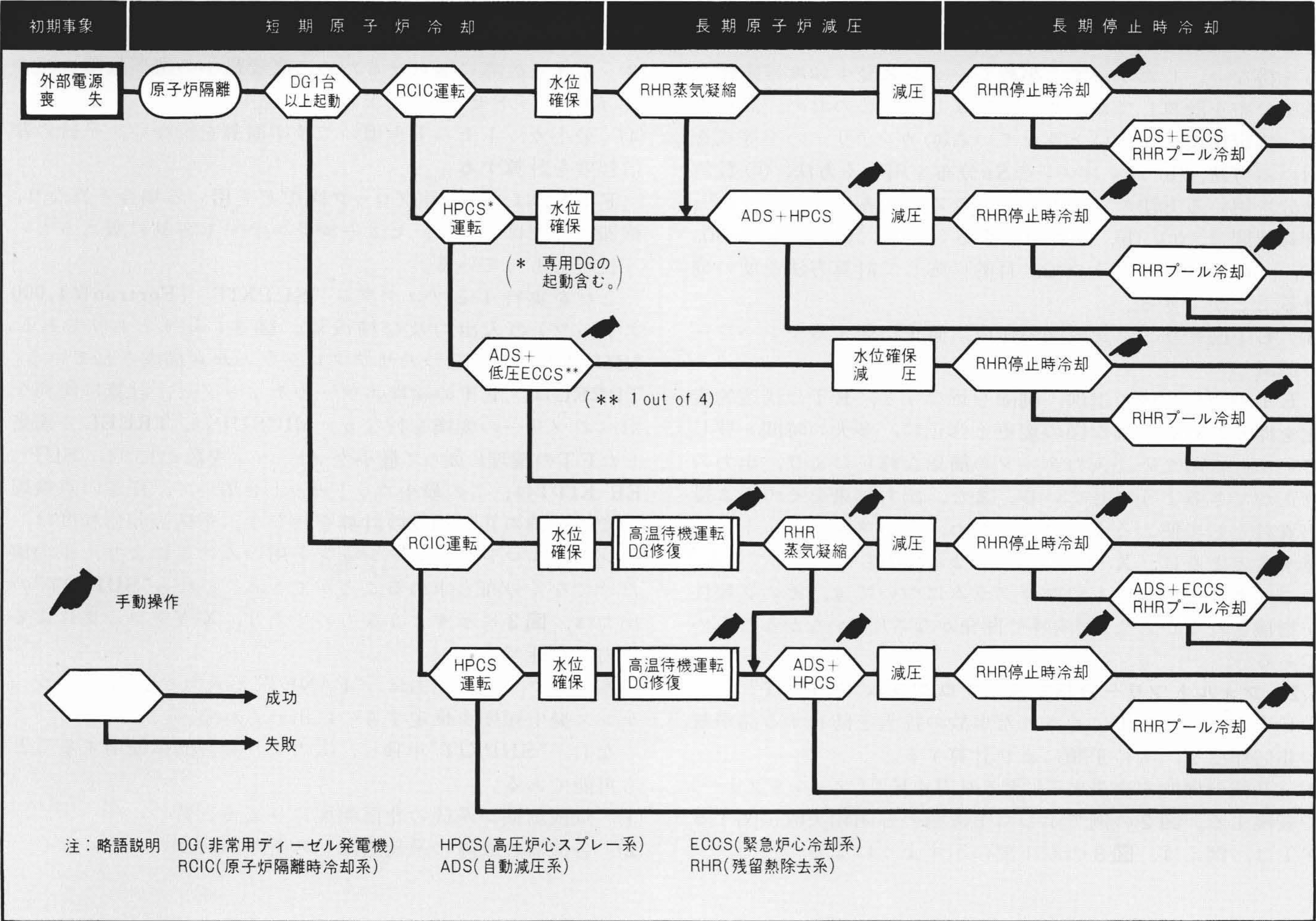


図4 外部電源喪失事故のイベントツリー図 BWRプラントで外部電源事故が生じた場合の事故の種々の波及過程の解析を行ない、その結果を樹木状に表現したものである。

(3) 系統の非信頼度の確率分布の推定

3 BWRプラントへの適用の一例

“PANET”, “SUPKIT”を用いて発電所の外部電源喪失事故に対する確率論的安全評価を実施した。この事故波及の経過の一部を、樹木状に表現して示したのが図4である。

この解析の特徴の一つは、長期間に生ずる可能性のある故障も扱っている点である。長期間には、運転員の介在が多くなるため、運転員による弁の閉鎖の誤操作などのヒューマンエラーの考慮が不可欠となる。このため、(1) 事故時操作基準に基づき操作手順を明らかにし、(2) 各操作でのヒューマンエラー率を推定した後、(3) 一連の操作のヒューマンエラー率を推定するという方法を採用した。“SUPKIT”は、前述したように、機器故障だけでなくヒューマンエラーも扱うことができるので、今回のような場合でも適用が容易であった。

また今回の解析では、RHR(残留熱除去系)などの同一系統が蒸気凝縮モードや停止時冷却モードというように種々のモードで用いられるため、モード間の共通原因故障を考慮する必要があった。“PANET”は、系統間の共通原因故障だけでなく、モード間の共通原因故障への対処も可能であるので、本解析にも容易に適用することができた。

本適用により、“PANET”, “SUPKIT”両プログラムの具体レベルでの有効性が確認できた。

4 結 言

確率論的安全解析支援用プログラム“PANET”及び“SUPKIT”の機能、並びにBWRプラントの安全解析への適用に基づく有効性の検証結果について報告した。これらのプログラムは、原子力プラントの事故解析に限らず、化学プラントなどの大規模プラントの確率論的安全解析にも適用が可能である。

最後に、“PANET”の基本設計を行なうに当たって、種々の有益な助言をいただいた東京大学工学部原子力工学科・教授都甲泰正工学博士に対し深謝申し上げる。

参考文献

- 1) U.S.NRC: Reactor Safety Study, WASH-1400(1975)
- 2) Sasaki, R., et al.: Development of Computer Program to Assist Event Tree Analysis, ANS Annual Meeting (1979)
- 3) 小林: フォールト・ツリー解析コードパッケージSUPKITの適用性に関する検討, 原子力学会雑誌, 19, 11(1977)
- 4) Kumamoto, H. et al.: Top-down Algorithm for Obtaining Prime Implicant Sets of Non-Coherent Fault Trees, IEEE Trans. Reliability, R-27, 4 (1978)
- 5) 宝木, 外: イベントツリー分析における事故生起確率の信頼区間推定方法の改良, 昭和55年電気学会全国大会予講集
- 6) 竹村: 確率論的安全評価手法, 原子力工業, Vol. 24, No. 9 (1978)