信頼性予測のための フォールト・ツリー手法の有効性

石井博司・飛岡利明・中野一夫

1. はじめに

複雑なシステムの信頼性や安全性を評価し解析する手法の1つに，フォールト・ツリー解析手法がある．この手法は，ミニットマン・ミサイルの開発計画の中で，米国の Bell and Telephone 研究所の H. A. Watson が1961～1962年に開発したものである．その後，主として航空機，宇宙あるいは軍事産業の分野で発展をとげてきた．

これらの産業と並んで，いやそれ以上に巨大ともいえる原子力の分野でも，1975年に公刊されたWASH-1400 [1]（プロジェクト・リーダーの名前をとってラスムッセン研究としても良く知られている）の中でフォールト・ツリー解析が広く使われている．WASH-1400は，米国で100基の軽水炉を運転するとして，それにともなって発生するリスク（好ましくない事象の影響と生起確率の積，すなわち期待値で定義している）を評価したものである．その中で，フォールト・ツリー解析は起因事象の影響緩和の役をはたすシステム（これを安全系と呼ぶ）のアンアベイラビリティ（unavailability）の評価に使用されている．すなわち，原子力発電の歴史は浅く，しかもその間安全系の機能が要求されるような事象の発生がほとんどなかったので，これらの系統のデマンド時の機能喪失の頻度を過去の統計データから得ることがむずかしく，フォールト・ツリー手法によって予測せざるを得なかったのである．

これを契機に，原子力の分野でも他分野に負けずにフォールト・ツリー手法がシステム解析の手段として広く使われるようになった．Fussel によると，フォールト・ツリー手法の利点は次のとおりである[2]．

① あらゆる故障を探し出すことができる．

② 興味の対象とする故障に限って重要な箇所をシステムの中からぬき出すことができる．

③ システムの設計変更にともなって生じる信頼性上の問題の検討を目視できる形で提供できる．

④ システムの信頼性解析の道具として，定性的評価にも定量的評価にも使用できる．

⑤ 解析者は，一時にある特定のシステム故障だけに注目して解析を進めることができる．

⑥ システムのふるまいに対して洞察力を与える．

としている．解析結果を視覚的に表現できるこの手法の特徴は，⑥に述べたように解析者にとってシステムを十分良く理解する道具として役立つだけでなく，その解析結果を第三者に理解できる形で情報伝達できる道具としての利点ともなる．この他，つけ加えなければならないことは，1970年以降，各種の計算コード類が開発され，計算機を用いたフォールト・ツリー解析が容易になったことであろう．

これが，特に複雑なシステムの信頼性解析の分野で，従来のブロック図法などにかわって，フォールト・ツリー解析が行なわれるようになった最大の要因であるといっても過言ではない．報告者たちも，首尾一貫してフォールト・ツリー解析ができるコード[1]体系 FTA-J を開発中であり，現在その原型版ができ，各種の性能評価を続けている．

以上述べた特徴に対し，この手法にも他の手法と同じようにいくつかの問題点や限界がある．たとえばラスムッセン研究の公式の批判ともいうべき米国のルイス委員会の報告書 [3] などにまとめられている．その中でも主要なものの中に，モデル化の際にすべての事象を完璧に組み込んだことの検証ができないこと，ならびにデータ・ベースが必ずしも十分ではないこと，の2つを挙げることができる．

たとえば前者について，ルイス報告は，

「フォールト・ツリーを作る際に，すべての事象を

いしい ひろし，なかの かずお　構造計画研究所
とびおか としあき　日本原子力研究所

1) コードとはプログラムのこと

完璧に組み込むというのはそもそも不可能である.問題となるのは,完全に近づく方法であり，小さな寄与をするものだけが除かれていることを合理的に保証し，これを示すことができるか否かである.」としている．また，データについては，統計学上の問題(データは十分にあるか)と工学的な問題(データは適切であるか)を指摘し，結果に報告された以上の大きな不確実さがあるとしている．

報告者たちは，過去に十分な運転実績があって，統計的な故障データが得られている複雑なシステムについて,フォールト・ツリー解析を行なって，その結果を統計データと比較しこれらの問題点の検討を行なった．この目的で，①連続運転時の故障（タービン船主機ボイラー)，②デマンド時故障(ディーゼル発電機の起動失敗）のフォールト・ツリー解析を行なった．ここでは，連続運転時の故障について，評価結果を報告する．フォールト・ツリー解析によって予測した平均故障間隔（MTBF）と，統計データを比較し，この手法の信頼性や問題点について言及する．また対象システムのフォールト・ツリー解析の過程で行なった感度解析や誤差の波及・伝播解析を行なったので，それらを紹介して，システム解析の道具としてフォールト・ツリー解析手法の有効性を示す．

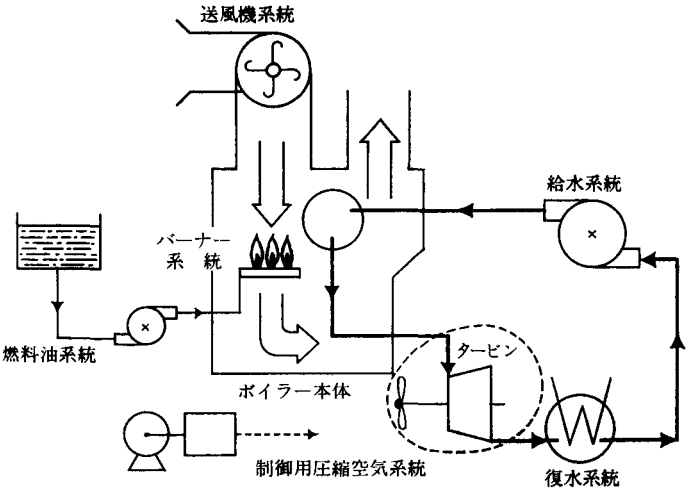


図 1　ボイラーシステム概略図

2. 主機駆動用ボイラーシステムのフォールト・ツリー解析

2.1 対象システムの選定

解析対象としては，タービン船の主機駆動用ボイラーシステムを選択した．これはこのシステムがフォールト・ツリー解析を行なううえで適当な複雑さを備えていること，システム情報の収集が比較的容易なこと，および同型式のタービン船が過去約30年にわたり，わが国で実用に供されており，統計的な故障データが得られていること［4］などによる．報告者たちが，フォールト・ツリー解析の主対象としている原子力発電所の安全系などとシステムの構成が類似していることも，当該システムを選択した理由の1つである．

2.2 主機タービン・駆動用ボイラー

実在タンカー船(約20万ＤＷＴ)に搭載された主機タービン駆動用ボイラーを対象とした．このタンカー船には同型式の独立した2缶のボイラー(1缶の定常時出力は，過熱器出口側で蒸気温度515°C，蒸気圧力62 kg/cm²G，蒸発量57000kg/時）があり，並列運転している．いずれの1缶たりとも，その機能喪失はタービン船の通常運転機能喪失につながり，比較する統計データ［4］で定義される重大故障になる．

そこで，1系列のボイラーシステムだけに着目して，フォールト・ツリーを構築する．解析対象の頂上事象（Top Event）としては，ボイラー1缶の機能喪失，すなわち「航行中に，No.1 ボイラーから主機タービンへ所定の蒸気量が供給されない」事象ととる．これは，同系統のボイラー過熱器出口側に配された主蒸気管の流量加減弁（BV-302）に着目して“Insufficient Steam Available From BV-302”としてフォールト・ツリーを構築する．ここで，フォールト・ツリー構築に必要な範囲でボイラーシステムを説明する．

システムは，図1に概要を示す7種類のサブシステムからなる．各サブシステムの構成および機能は次のとおりである．

① ボイラー本体……給水系統から給水弁(BV-102)，エコノマイザーを経て，蒸気ドラムに至る本体内部の給水ラインと蒸気ドラム，水ドラムを含む本体内部配管および蒸気ドラムから過熱器を経て蒸気加減弁(BV-302)に至る蒸気系統からなる．蒸発缶により，所定の蒸気量を発生する．

② 給水系統……復水系統から復水を受けるデアレーターから，主給水ポンプおよび高圧給水加熱器を経てボイラー本体の給水弁（BV-102）に至る系統からなる．この系統には補助給水系統が設けられている．主給水ポンプは蒸気駆動2台（1台予備）である．主給水ポンプは，高圧給水加熱器下流の52V弁を介した圧力低信号により待機中のポンプの蒸気入口弁を開にし自動切替する．この系統は，復水をタ

ービン本体に給水する機能をもつ.

③ 復水系統……主機低圧タービンから主復水器で復水しデアレーターに送るまでの系統である. 主復水ポンプは電動で2台あり, 常時は1台運転, 1台待機. 2台のポンプはポンプ吐出側圧力検出による自動切替である. この系統は, タービンで仕事を終えた蒸気を冷却し水にもどして給水系統に供給する.

④ バーナー系統……3本のバーナーからなり, 燃料油系統から供給される燃料油を自動燃焼制御装置により燃焼. ボイラー本体内に設置され, 蒸気発生に必要な熱を発生する.

⑤ 燃料油系統……バーナー・ヘッダーに適圧, 適性粘度の燃料油を送る系統. 噴焼ポンプは電動・ギア式2台あり, 常時は1台運転, 1台待機. 系統切替えは吐出圧低による. この系統はバーナーによる燃焼に必要な重油を供給する.

⑥ 送風機系統……蒸気駆動の1台の送風機によって外部空気をボイラーへ送風する系統. 各ボイラーごとに1台の送風機が装備され, 2系統2基の送風路はゲートダンパー(常時閉)を介し連結されている. この系統は, 重油燃焼に必要な空気の供給と燃焼熱エネルギーの伝達を行なう.

⑦ 制御用圧縮空気系統……主機, 補機を遠隔または, 自動制御する操作媒体として圧縮空気を供給する系統. 制御用および雑用の2台の独立した電動コンプレッサーをもち自動発停している.

以上のサブシステムに関する情報は, モデル船の設計情報にもとづくとともに, その機能や運転などに関しては舶用ボイラーに関する一般参考書[5]で補塡した. また, 舶用機装関係の専門家からも詳しい説明を受けた. しかし, 当該モデル船を運航しているシップ・オーナーから, 運転やメインテナンスに関する詳細情報や, 運転経験に関する情報を入手することはできなかった.

フォールト・ツリーを構築するに当っては, 以上述べた入手情報の不足を補うため, 工学的判断にもとづいていくつかの仮定をたてた. 仮定相互については, できるかぎり矛盾がないよう考慮し, 解析結果に無用のあいまいさが導入されないよう努めた. 特に重要な仮定について, いくつかのものを以下に例示しよう.

① 主流配管の口径の1/3以下の配管については, 影響のない漏出流路として無視する. それ以上の配管およびそれに直接ついている弁の破損については, フォールトとする.

② 給水系統には, 非常用給水系統が設けられている. しかし, 非常用給水系統単独では, 主機ボイラーの長期連続運転は不可能であると想定し, 主給水系統の機能喪失に対しては, この系統はバックアップにならない, とする.

③ 動力用電源, 制御用電源, バッテリー電源は相互に従属性のない独立3系統と想定する. 配電系統のフォールトは考慮せず, 電源自体の喪失をもって, 各使用末端への電源喪失とした. この仮定は非保守的な仮定であるが, 配電系統図の詳細が入手できなかったため設けたものである.

④ 電源や制御用空気喪失時の電動弁, 空気作動弁の開閉については, 設計用図面に特記された以外のものについては, フェール・セーフの状態を想定する.

以上, 主機ボイラーの構成について説明し, ハードウェアについてフォールト・ツリー構築上の主要仮定についてまとめた. 次に, システム解析上必要な運転員の問題について言及しよう.

この主機ボイラーシステムは, 自動化の程度が高く, 通常運転中は, 原則としてほとんど運転員操作を必要としない. しかし, 原子力発電所や航空機などの複雑で巨大なシステムは, 発生した異常や故障, 事故のうち20～80%は人間側に起因するとしている[6]. そこで, 本解析の中でも人間—機械のインターフェースで発生する人的過誤がシステムの機能喪失にいかなる影響をおよぼすかを検討する必要があろう. その検討に必要な範囲で運転員操作をまとめよう.

①運転員操作は, システムにとって好ましくない状態をつくり出す行為と, システムの異常を発見し好ましい状態にもどす行為にわけて考えられる. 結果として, システムにとって好ましからざる状態をつくることを, ここでは広い意味で人的過誤と呼ぼう. 人的過誤の分類方法はいくつかあるが, ここでは(i)やり忘れ (Error of Ommission)と, (ii)やり損い(Error of Commission)を考える. (i)としては, たとえばアラーム警報が出ているのに, それに気づかない, あるいは無視して回復操作に失敗することがあげられる. (ii)としては, たとえば運転員がボイラーの主要部の点検時に, 誤って開にすべき弁を閉にしてしまった, など Reverse Error と称されるものを含める.

②冗長性をもつシステムについては, 連続運転中でも, 待機中の系列を試験あるいは保守することは可能である. しかし, この試験および保守作業によるシステムの機能喪失は, 検討対象外とし, 本フォールト・ツリー解析には含めない. これは, 詳細な運転, 保守に関する情報が入手できなかったためである. この仮定は, 解析結果を実際よりも, より信頼性が高くなる方向に推定することに役立つ.

2.3 フォールト・ツリーの構築

以上の情報をもとに，頂上事象“Insufficient Steam Available From BV-302”に対して，フォールト・ツリーを構築した．フォールト・ツリー構築に際しては，通常のフォールト・ツリー構築の教科書の原則[7][8][9]にしたがった．作成したフォールト・ツリーはゲート数約200，基本事象数約340となった．これはWASH-1400の詳細フォールト・ツリーと同程度の大きさである．フォールト・ツリーの作図は，FTA-Jコードシステムの構成コードであるWAMDRAWコードによった．これは，事象とゲートのつながりを解析者が入力で与えて，計算機が自動的に作図するものである．

2.4 故障率データ

頂上事象の生起確率を求めるために，作成したフォールト・ツリーの基礎事象の生起確保が必要となる．本解析に当っては，基礎事象の生起確率は原則としてWASH-1400のデータを使用した．ここで予想される問題は，次のデータの十分性に関するものである．

① WASH-1400には，約60種のコンポーネントの故障率しか含まれていない．

② WASH-1400のデータは，陸上経験にもとづいており，使用環境の異なるタービン船のコンポーネント故障への適用性は問題がある．

まず①に関しては，WASH-1400のAppendix Ⅲにデータがあるものについてはそのまま，ないものについては，WASH-1400のAppendix Ⅱにある類似サブシステムの解析結果などを利用した．たとえば，静的機器故障の例をあげると，本解析の中の基礎事象“Piping Rupture or Leak (B 001)”の生起確率としてはWASH-1400 Appendix Ⅱ，崩壊熱除去系配管破損事象(APPRH 16R)の生起確率1×10^{-10}/hrを代用した．これは，3インチより太い口径の配管（長さは原子力発電所の崩壊熱除去系配管に同じ）の破損率である．

また動的機器故障の例をあげると，本解析の“No. 1 Running Pump Primary Failure (B 707)”事象については，WASH-1400 Appendix Ⅱの類似事象，“Pump A01 Fails to Continue to Run with Sufficient Output (BPMOA1F)”の生起確率3×10^{-5}/hrを使用して定量化した．連続運転している機器については，指数分布を想定し使命時間τ^*以前に故障が発生する確率は，$R(\tau^*)=1-\exp(-\lambda\tau^*)\approx\lambda\tau^*$で与えられることから，評価対象時間(1時間)当りのアンアベイラビリティに換算した．上式でλは通常の時間当りの故障率である．

最後に運転過誤について言及しよう．たとえば本解析に出てくる“Operator Erroneously Closes BV 208 (BV 208)”事象である．これは巡視点検中に誤って運転員が常時開のデアレータ出口弁を閉にしてしまう過誤，いわゆるReverse Errorと呼ばれるものである．

これに対しては，WASH-1400 Appendix Ⅱの“Operator Error Valve A03 Closed (BXVA 003X)”のデマンド当りの過誤率1×10^{-4}を使用した．ただしこのモデル船では，4時間の勤務交代制をとっており，その間に1回巡視点検にゆくとして，評価対象時間のアンアベイラビリティは，$1.0\times10^{-4}\times1/4=2.5\times10^{-5}$とした．Reverse Errorであることを考えれば，この過誤率はかなり高いものといえるかもしれない．また，この過誤率は弁の設置場所，銘板やタグの有無，鎖ロックの存在その他マン・マシンインターフェースでの過誤防止の配慮がどこまできているかに大いに関係してこよう．しかし本解析ではごく一般的な過誤率を割りつけるとともに，後述する感度解析を行なったにとどめている．

次に②の使用環境の問題である．これは，タービン船環境のコンポーネント故障率など，特定条件のデータ・ベースがそろっていない現状では，この種の一般的なデータ・ベースに依存せざるを得ないであろう．今後，より詳細な，現実的な評価をする場合にはこの問題は十分に検討する必要があろう．

2.5 フォールト・ツリーの評価

2.2で構築したフォールト・ツリーをもとに，2.3で述べた基礎事象の生起確率を用いて，フォールト・ツリーの評価を行なう．まず，点推定の頂上事象の生起確率はWAMBAMコードで計算した結果をまとめて表1に示そう．WAMBAMコードは，真理表を使って直接頂上事象の点推定の確率を計算するコードである．(なお，フォールト・ツリー解析用の計算コードについては，文献[8]，[10]などに詳しい説明がなされている．)頂上事象の生起確率は4.9×10^{-4}/hrと計算される．MTBFに換算すると2.04×10^{3}hrである．

次に，PREPコードを用いて，ミニマル・カットセット*を求めた．PREPコードはWASH-1400の解析に

表1 中間事象の生起確率

中間事象	生起確率(／時間)
給水系統の故障	1.1×10^{-4}
復水系統の故障	8.7×10^{-5}
バーナー系統の故障	4.5×10^{-4}
燃料油系統の故障	1.7×10^{-4}
送風機系統の故障	3.3×10^{-5}
制御用圧縮空気系統の故障	3.1×10^{-5}

*ミニマル・カットセット(MCS)；基礎事象の集合で，どの1つの要素が生起しなければ頂上事象が発生しなくなる最小の組合せをいう．

使われた計算コードで，1970年に公開されたこの種のコードの最初のもので，ブール代数によってミニマル・カットセットを求めるものである．本解析の頂上事象の生起確率に大きく寄与する 1×10^{-5}/hr 以上の要素を示すと図2のようになる．本解析では，2次以上の事象の寄与はほとんど無視できるといえよう．ここで，共通要因故障の寄与が無視できるほどに小さいとしていることに注意してほしい．これは1つには解析対象システムに冗長性が乏しいこと(これは2次のミニマル・カットセットの寄与がきわめて小さいことからもわかる）を反映している．冗長性をもつ制御用圧縮空気系では，2台のコンプレッサーの同時故障で機能喪失となるが，コンプレッサーの単体の故障率がたとえば 10^{-5}/hr のオーダーと十分低いので，2台のコンプレッサーに完全従属性（1台のコンプレッサーが故障した場合，待機中の他の1台も故障する確率が1であるとする）を想定しても図3に示す1次事象の寄与よりは小さく，無視できると考えられる．

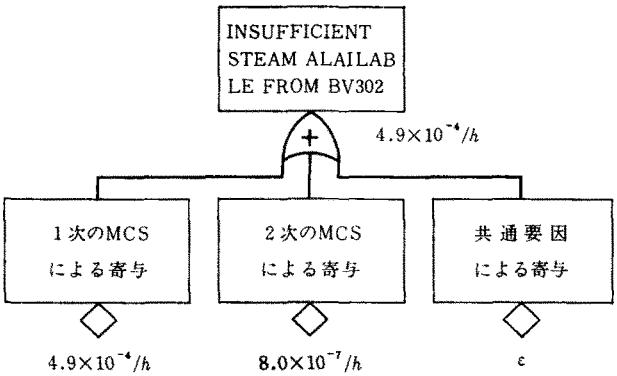


図 2　頂上事象に寄与する基本事象の分類

PREPコードで得られたミニマル・カットセットをもとに，本システムの故障に対する簡略化されたフォールト・ツリー(Reduced Fault Tree)を作成すると，図3のようになる．

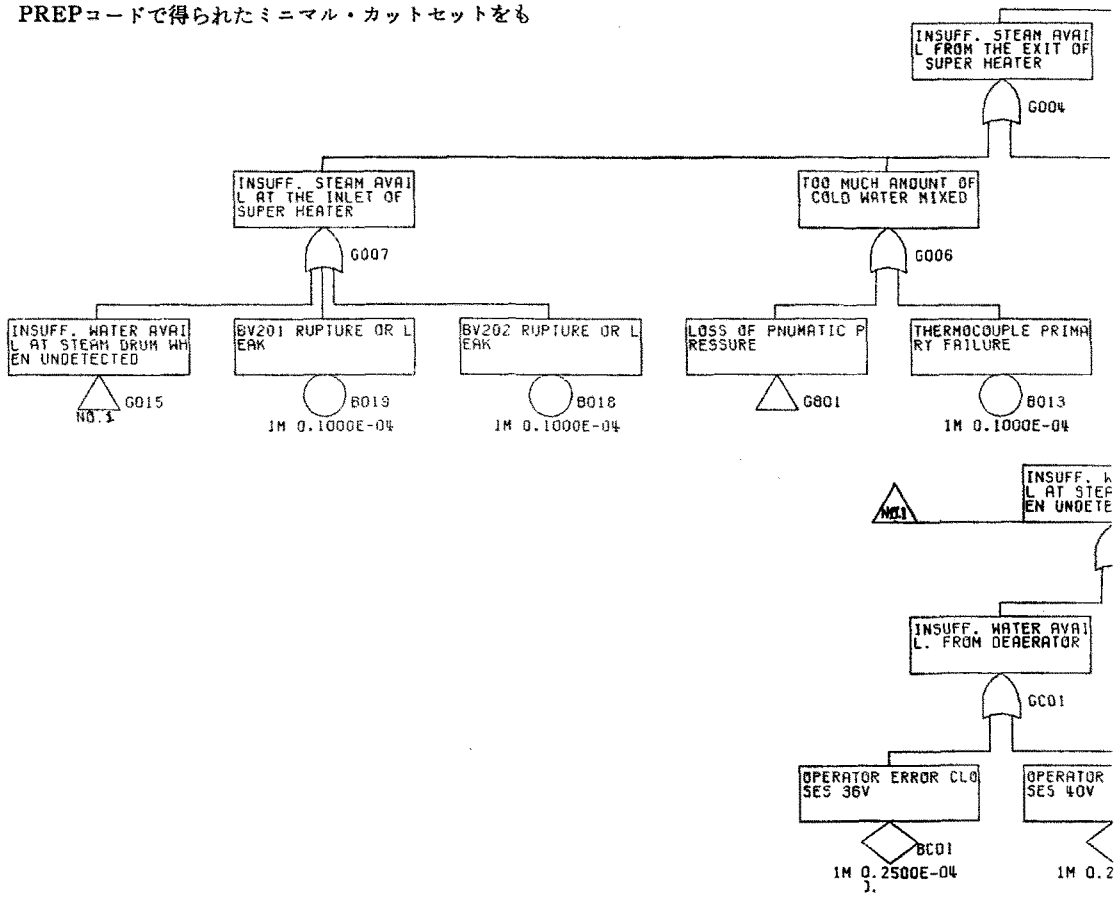


図 3　ボイラーシステムに

2.6 感度解析

図3に示した簡略化されたフォールト・ツリーから頂上事象の発生に寄与する重大な故障(シーケンス)は，次の3種類である．

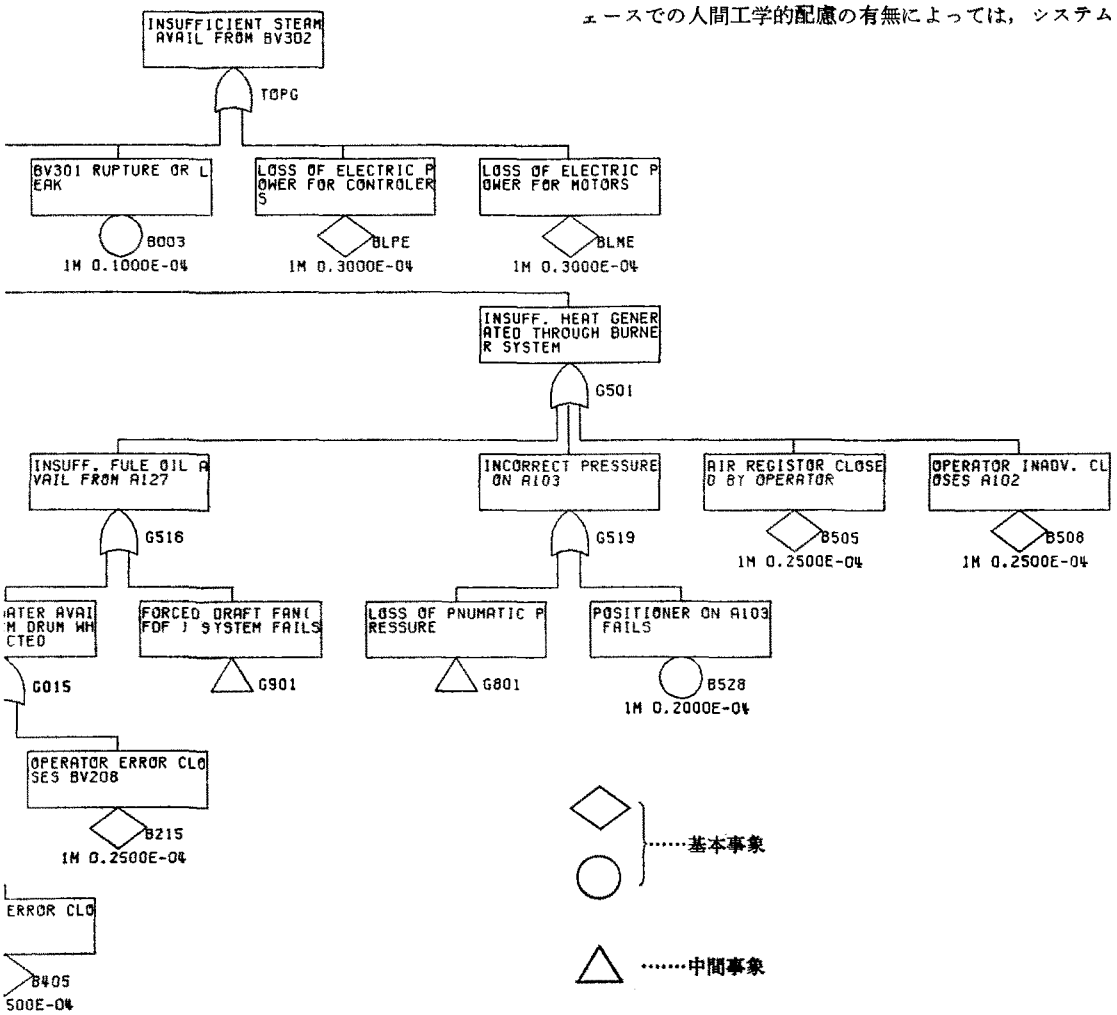
① 電源の喪失 ② 運転員誤操作 ③ コンポーネント単体の故障

2.2で述べたように電源系統については十分な情報が得られなかったために，本解析では電力を必要とするコンポーネントに対しては発電機から直接給電されていると仮定している．そして定量化に当っては，WASH-1400の商用電源喪失の生起確率 3×10^{-5}/hr を基準に感度解析を行なった．その結果を示すと，表2のようになる．電源喪失の生起確率を1桁上げると，その寄与のためにボイラーシステムの重大故障発生頻度よりもいちじるしく高いアンアベイラビリティを与えることになり，現実的でなくなるので，ここではWASH-1400のデータの直接適用で良しとした．

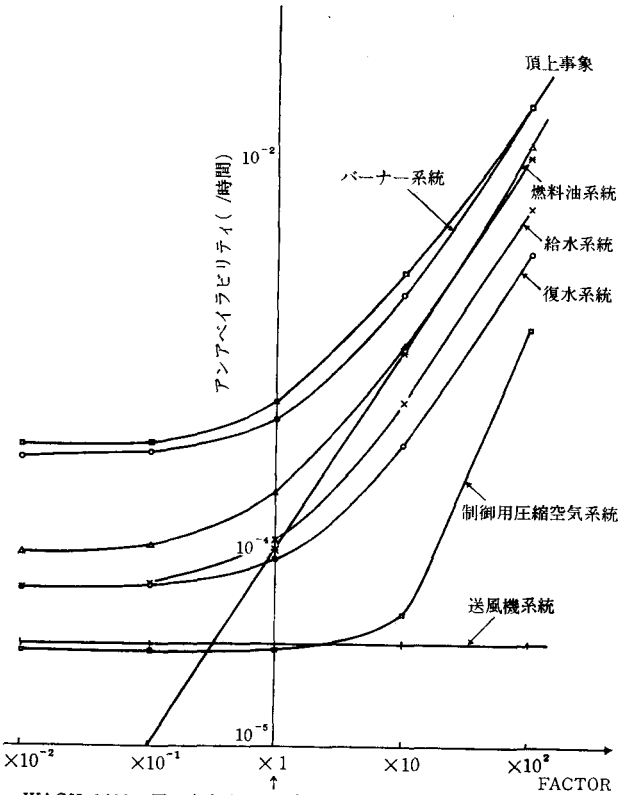
表 2 電源系統に関する頂上事象の感度

電源系統の故障率 (/hr)	3.0×10^{-6}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-4}
頂上事象の発生確率 (/hr)	4.6×10^{-4}	4.9×10^{-4}	1.1×10^{-3}

②の運転員過誤については，前述したようにWASH-1400で使われた値をそのまま使用したが，この過誤率を基準としてその1/100から100倍まで一様に変化させた時，各サブシステムのアンアベイラビリティがどのように変化するかを調べた．これを示すと図4のようになる．ベースでは，現場操作の過誤率を 1×10^{-3}，制御室操作の過誤率を 1×10^{-4} としているが，これを約1桁上げると，頂上事象の生起確率は 2.06×10^{-3} と4倍になる．これに対して1/10にしても 3.37×10^{-4} で30%程度の改善にすぎない．この図に示すようにこのシステムは人的過誤に比較的鋭敏であり，マン・マシンインターフェースでの人間工学的配慮の有無によっては，システム



関する Reduced Tree



WASH-1400で用いられたDataを1とした時のFactor.

図 4 人的過誤による各系統の感度

のアンアベイラビリティがかなり変動し得ることに注目する必要があろう．

2.7 誤差伝播・波及効果

WASH-1400では，故障率として対数正規分布を想定し，エラー・ファクターとして10，30，…などをあてはめている．エラー・ファクターは統計的な不確実さを反映した尺度である．本解析においては，図3の縮約したフォールト・ツリーに対し，各事象のエラー・ファクターとして10を想定してモンテカルロ法による信頼区間の推定を行なった．使用した計算コードは SPASM である．このコードは WASH-1400 で使われた SAMPLE コードを拡張したもので，使用できる確率分布の種類が SAMPLE よりは増大している．試行回数は，パラメトリックに変化させたが2000回以上で一様になるので，3000回とした．得られた結果は，表3に示すとおりである．これからメディアン値では，6.8×10^{-4} となる．95％信頼限界をとると 1.84×10^{-3}，5％信頼限界をとると 3.1×10^{-4} である．

2.8 システムの改良

ここで簡単に本解析の結果として，システムの改良について信頼度の観点からとりまとめよう．2.6感度解析で，電源系統と人的過誤の問題を述べたが，ここではハードウェア故障の観点から，このシステムの問題点のうち重要な部分を述べる．

① バーナー系統：燃料油圧制御弁（A 103）の故障がほとんどこの系統の故障を支配している，といって良い．同弁の位置指示計の信頼性向上の検討が必要である．システム改良に最も有効である．

② 燃料油系統：かなりの冗長性を備えているが，2器ある燃料油加熱器の加熱蒸気系統が共通の温度制御弁から分岐し独立性を備えていない．温度制御弁，蒸気源の故障は即燃料油系統の故障となる．

③ ボイラー本体：過熱器出口側の逃し安全弁の設定値以下での誤開による漏洩が本解析では支配的である．また過熱器出口蒸気温度制御用の熱電対の故障の寄与も大きい．これらの定期的な点検が必要である．

④ 給水系統：人的過誤の感度解析で述べたBV208の誤閉など，本系統のいくつかの弁についての問題が最大である．現場手動弁については，重要なものはロックが必要である．またデアレータ側の循環水もどし弁40Vを誤閉すると，2台の給水ポンプが同時に機能喪失することに注意しなければならない．

これらの評価結果は，各サブシステムごとのフォールト・ツリーのミニマル・カットセットを評価することに

表 3 頂上事象の確率分布

DISTRIBUTION CONFIDENCE LIMITS	
CONFIDENCE (PER CENT)	FUNCTION VALUE
0.5	2.0725E−04
1.0	2.3704E−04
2.5	2.7901E−04
5.0	3.1113E−04
10.0	3.7273E−04
20.0	4.6122E−04
25.0	4.9755E−04
30.0	5.3550E−04
40.0	6.0878E−04
50.0	6.8214E−04
60.0	7.8759E−04
70.0	9.1081E−04
75.0	9.8974E−04
80.0	1.0805E−03
90.0	1.4244E−03
95.0	1.8396E−03
97.5	2.3620E−03
99.0	3.6540E−03
99.5	4.4740E−03

表 4　重大故障に関する諸数値の比較

調査資料番号	調査対象船就航時期	平均アベイラビリティ	MTBF (時間)	平均故障時間	
1	1965～1969 1966中心	0.9936	1110	15.6 (11.8)	7.11
2	平均1967	0.9969	1547	10.45	4.84
3	1965～1972 平均1969	0.995	～1200		5.5
4	1972～1974 1973中心	0.9975	3717	9.60 (7.65)	

よった．このように，フォールト・ツリー解析はシステムの弱点を見つけ，それを除去するうえでの有効な対策を検討するうえでも有効である．

3.　統計データとの比較

比較対象は日本舶用機械学会ボイラー研究委員会が1977年時点で就航期間4～5年のタービン船(15)を対象にアンケート調査にもとづいて集計したものである[4]．その結果を示すと表4のようになる．4回の調査で平均アンアベイラビリティは0.0064～0.0025である．最も新しい調査はMTBFが3717時間，アンアベイラビリティ0.0025である．ただしこの統計には，報告者たちの解析対象外とした推進系統，潤滑油系統およびタービン系統の故障が含まれているが，その寄与はあまり大きくない．時代の進展とともに信頼度が向上しているのは，初期故障が少なくなっていくためと考えられる．これは，文献[4]によると，最も故障率への寄与が大きいボイラー系(これはフォールト・ツリー解析のボイラー本体とバーナー系統を含む)が全体の56%であり，また故障事象別分類でみると，全体の40%近くが弁，フランジからの漏洩であることからも明らかである．

表5に，フォールト・ツリー解析の結果と文献[4]の統計を並べて記載する．フォールト・ツリー解析の結果としては若干問題もあるが，通常良く行なわれるメディアン値をもとにした点推定値があげてある．(誤差伝播解析をもとにした頂上事象生起確率のメディアン値は表3に示したように 6.82×10^{-4} となる．)

表4で比べると，MTBFでフォールト・ツリー解析では2000時間であり，故障統計は3700時間である．このように，両者が少なくともオーダーで一致していることは，フォールト・ツリー解析の威力を示すものとして特記できよう．フォールト・ツリー構築に当って入手したプラント情報の完全さや，フォールト・ツリー定量化に当っての故障率データの十分さなどに関しては，大いに

表 5　重大故障に寄与する各系統の割合
(フォールト・ツリーの結果と統計値との比較)

参考統計資料		フォールト・ツリー解析結果		
分　類	割合 (%)	分　類	故障率 (/hr)	割合 (%)
全体システム	100	全体システム	4.9×10^{-4}	100.0
ボイラー系	56.0	ボイラー本体	6.5×10^{-5}	14.0
		バーナー系統	2.5×10^{-4}	54.0
空気燃料系	2.6	送風機系統	3×10^{-6}	0.6
		燃料油系統	2.5×10^{-5}	5.4
給水系	8.8	給水系統	3.4×10^{-5}	7.4
タービン系	16.7	復水系統	2.5×10^{-5}	5.4
電気自動化系	3.5	電源系統	6.0×10^{-5}	13.0

問題はあるものの，フォールト・ツリー解析はこの程度にアンアベイラビリティを推定できるのである．まったく統計的データが得られない新しいシステムの信頼性の評価にもフォールト・ツリー手法が有効であるといえよう．

各系統のシステム故障に対する寄与度を表5で比較すると，電源系統(フォールト・ツリー解析)と電気自動化系(統計データ)の寄与度，タービン系と復水系統の対応する部分にかなりの違いがみられる．

これは，フォールト・ツリー解析の電源系統で説明したようにシステム情報の不足と，システム境界の差違(たとえば，フォールト・ツリー解析ではタービン本体はシステム境界外としている)の問題なども反映しているといえよう．

図4から容易にわかるように，もし人的過誤がまったくなければ，フォールト・ツリー解析によるMTBFは3000時間になる．システムの仮定によって，フォールト・ツリー解析結果と統計データは容易に一致し得る程度に変化し得るといえよう．

統計データと比較してみて，これらのデータ収集，整理の方法に若干問題があることが判明した．今後望まれることは，

① 故障データの収集に当っては，分類項目が互いに独立であるよう注意すること．

② 代表的な故障モードについては，故障内容の詳細な記述を付すこと．

③ 故障統計としては，分布形の推定に関する情報を付すこと．

などである．

4. まとめ

本報告書では，タービン船の主機駆動用ボイラーの機能喪失を対象にフォールト・ツリー解析を行なってアンアベイラビリティを推定し，運転経験から得られた統計データとの比較を行なった．MTBFで点推定値は約2000時間である．これに対して過去の統計は，1110～3717時間である．データの十分さ，完全性の問題などを考慮しても，両者の一致は現時点ではほぼ満足できる程度に良いと結論づけて良いであろう．運転経験のまったくないような新しいシステムの信頼度も，フォールト・ツリー解析でかなりの確からしさをもって推定できる，といって良い．

プラント・データの不足は，フォールト・ツリー構築に当っては，常に存在する．この場合，本解析で行なったように工学的判断にもとづいた仮定をたてて，その仮定相互間に矛盾がないようにして解析を進めることが唯一の方法であろう．その仮定については，本解析で行なったように感度解析を行なって，重要性を評価することが大切であろう．システムの信頼度にその仮定が大きな影響をおよぼすことがわかったら，その仮定の妥当性をさらに詳細に詰める必要があろう．

また，フォールト・ツリーの感度解析は，人的過誤の例で示したように，システムの弱点を見つけるうえでも有効である．構成サブシステムの中で，どのシステムが人的過誤に弱いかなどといった問題に対し，この手法は有効であろう．ミニマル・カットセットからの情報は，システムやサブ・システムの信頼度を阻害している基礎事象は何かを示唆する．システムの改良案の検討にきわめて有効である．単に設計の検討だけでなく，運転や保守などを含めた総合的な信頼性を，系統的かつ論理的に検討するこの手法のシステム解析の道具としての期待は高い．各種の用途の計算コードが，フォールト・ツリー解析の分野で公開され実用に供されるに至っていることは，今後ますますこの手法が使われるようになるであろう．

引用文献

[1] 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

[2] J. Fussel, "Fault Tree Analysis—Concepts and Techniques", in Generic Techniques in Reliability Assessment, E. J. Henley and J. Lynn, (eds.), Nordoff Publishing Co., Leyden, Holland, 1976

[3] H. W. Lewis et al., "Risk Assessment Review Group to the U. S. Nuclear Regulatory Commission", NUREG-CR-0400, 1978

[4] 西川栄一，"最近の就行中タービン船における重大故障について"，日本舶用機関学会誌，**14**-9，p.754～p.762，1979

[5] 日本造船学会，艤装委員会編，"自動化船の機関艤装"，海文堂，1976

[6] 飛岡利明，行待武生，"原子力発電所における人的過誤とその評価"，行動計量学，**8**-2，27～45，1981

[7] H. E. Lambert, "System Analysis and Fault Tree Analysis", UCID-16238, 1973

[8] N. H. Roberts, D. F. Haasl, W. E. Veseley and F. F. Goldberg, "Fault Tree Handbook", NUREG-0492, 1981

[9] 井上威恭監修，"FTA 安全工学"，日刊工業新聞社，1979

[10] E. J. Henley and H. Kumamoto, "Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1981