

各信号線の意味は表5-7に示す。最終信号線は#12であり、少なくともランプ1か2が点灯状態にあることを表している。

表5-8には各オペレータに与えるデータを示す。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である。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あ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S1の閉指令信号で、オペレータ3の出力信号はスイッチS2の閉指令信号である。

オペレータ4の出力信号は時間経過量をあらわしている。タイム・ポイント4と6において、それぞれ強度10.0の信号を出力するが、これは、タイム・ポイント4はタイム・ポイント3から10時間後であり、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、1,000時間を仮定し、オペレータ8と11のタイプ35オペレータのデータとして、

ランプの使用(点灯)中の故障率0.001/hを与えた。

## (2) 計算手順

表5-9に計算の手順及び表記方法を示す。

表5-5と比較し、タイム・ポイント数及びステップ数が増加している。

第七行目まで、表5-15と同様の手続きである。

第八行目は、オペレータ#8を取り扱うことを示す。このオペレータはランプ1の点灯中の故障をモデル化している。出力信号#8の強度は、タイプ35オペレータの定義式を用いて計算されている。

タイム・ポイント1においては、入力信号強度が0.0であるため出力信号強度も0.0となる。

タイム・ポイント2,3においては、副入力信号のタイム・ポイント3以前の強度がすべて0.0であるため定義式より

$$R(2) = S(2) \times \exp\{-0.0\} = S(2) \quad (5-12)$$

表5-6 タイム・ポイントの定義 (サンプル問題2)

Time Points	作 用	意 味
1		初期時刻
2	信号#1発生開始	電源接続開始
3	信号#2発生	スイッチ1閉指令
4	信号#4強度10.0	タイム・ポイント3から10時間後
5	信号#3発生	スイッチ2閉指令
6	信号#4強度10.0	タイム・ポイント5から10時間後

表5-7 信号の意味 (サンプル問題2)

Signals	意 味
1	電源の接続
2	スイッチ1の閉動作指令
3	スイッチ2の閉動作指令
4	時間経過量
5	電源よりの電圧
6	電圧がランプ1に加えられる
7	ランプ1点灯 (点灯中の故障を考慮せず)
8	ランプ1点灯
9	電圧がランプ2に加えられる
10	ランプ2点灯 (点灯中の故障を考慮せず)
11	ランプ2点灯
12	ランプ1か2が点灯







(BWR)の非常用炉心冷却系, (3) Phased Mission Problemの一種である船用炉非常炉心注入系<sup>(17)</sup>の非常用電源系, (待機冗長系の一種), (4)試験, 修理を考慮した場合の Time Dependent Unavailability の問題<sup>(47)</sup>として加圧水型原子炉の補助給水系 (PWA AFWS系), の4例を選んだ。

### 5.7.1 原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系

#### (1) 系の説明

図5-16に原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系<sup>(17)</sup>を示す。この系は, 他の安全防護系が機能しなくなった場合に, 炉心から崩壊熱を除去する事を目的としている。二基の蒸気発生器が, 非常の場合における熱交換器として使用される。

この系は, 二つの主ループより成り立っている。一つは, 一次系の水を循環するループで, もう一方は, 冷却水を循環するループである。一次水は, 通常運転時に使用されているループを循環する。冷却水は, 非常用水タンクからの純水を用い, 非常用崩壊熱除去ポンプによって循環させられる。ポンプから出た冷却水は, 2つの流路にわかれ, それぞれ, 蒸気発生器A, Bに供給される。蒸気発生器において, 一次側から熱を受け取り, 飽和蒸気となり, 蒸気放出塔から船外へ放出される。

一次水は主循環ポンプにより循環させられるが, 自然循環による除熱も可能である。また, 一基の蒸気発生器によっても十分崩壊熱の除去は可能であるとする。

非常用ディーゼル発電機は, 船の上層部に位置する非常用発電機室に置かれている。非常用発電機は, 主タービン, 及び, 補助発電機が停止した場合に自動的に運転を開始する。更に, 主コンソール室あるいは, 非常用発電機室から手動により運転を開始することもできる。

#### (2) GO-FLOWチャートによる表現

図5-16のシステム図をGO-FLOWチャートに表現すると図5-17のようになる。図中, オペレータ記号の円の中の横線の上の数字は, オペレータ・タイプを示し, 下側の数字は, オペレータの番号を示す。信号線に添えてある番号は, 信号番号を示す。

ここで, タイム・ポイントは表5-10のように定める。各信号線の意味は次のようになっている。信号#5は非常用発電機の起動信号, 信号#6~#8は非常用崩壊熱除去ポンプへの電力, 信号#17はバルブV4, V5の開操作指令, 信号#10は機器の故障をあらわす

オペレータへの副入力信号で, 時間経過量をあらわす。他の信号はすべて, 二次側冷却水の流れをあらわしている。

最終信号線は#46である。この信号の存在は, 少なくとも, どちらか一方の蒸気発生器により除熱が行われることをあらわしている。それ故, 本解析例においては, 信号#46の各タイム・ポイントにおける強度を求める事が解析目的となる。

表5-11に各オペレータに対して与えるデータ及びオペレータの意味, 対応機器を示す。オペレータ#4タイプ25はタイム・ポイント3, 4において強度1.0の信号を発生するが, これは, 今の場合時間経過量10時間を意味している。それ故, この信号を副入力信号としているオペレータ(#12, #13, …)には, 故障率データとして, 10時間当たりの故障確率値を与えてある。

#### (3) 解析結果

解析の手順及び結果を表5-12に示す。表において各オペレータの出力信号番号のみを記し, 入力信号番号の記載は省略した。出力信号欄において, カッコの中に記された番号は, 5.6.3において説明した, 上流において分岐した信号線の番号である。

表5-12より, 信号#46の強度は, タイム・ポイント1~4において, それぞれ0.0, 0.964866, 0.9356109, 0.9063748, であることがわかる。これらの意味は, 系が待機状態にある時の動作確率は0.0, 起動信号により動作を開始する確率が0.964866, 起動後10時間後において動作している確率が0.9356109, 起動後20時間後において動作している確率が0.9063748である。これを系の故障確率で言い換えると, 起動失敗確率が $3.5134 \times 10^{-2}$ , 起動後10時間後における故障確率が $6.4389 \times 10^{-2}$ , 起動後20時間後における故障確率が $9.3625 \times 10^{-2}$ である。

起動失敗確率は, 附録2.2に示したGO手法による解析によると,  $3.51339 \times 10^{-2}$ である。また起動後10時間後における故障確率は, フォールト・ツリー解析<sup>(23)</sup>によると,  $6.4389 \times 10^{-2}$ である。GO-FLOWによる解析では, 一度の解析で, これらの値及び20時間後における故障確率まで求めることができる。

### 5.7.2 沸騰水型原子炉非常用炉心冷却系

#### (1) 系の説明

この系は, Phased Mission Problemの例題として取り上げられたシステムである<sup>(46)</sup>。系のフロー・チャートを図5-18に示す。系は, 高压炉心スプレイ系











圧力が上昇しすぎるのを押えるために必要となる。更に、熱交換器の一つと、対応する LPCI ループが、サプレッション・プール水の冷却のために必要となり、それと共に、炉心とサプレッション・プールとの間の循環のため残りの低圧注入系、低圧炉心スプレイ系、高圧炉心スプレイ系の中のどれか一つが最低必要となる。この場合、サプレッション・プール水の冷却のため V-3 は開いている必要がある。フェーズ 2 の継続時間は 36 時間である。

フェーズ 3 は余熱除去である。このフェーズにおいては、LOCA 部分は補修されていると仮定している。

熱交換器 (Hx) と対応する低圧注入 (LPCI) の動作が一組必要とされる。この場合、バルブ V-2 が開いている必要がある。フェーズ 3 の継続時間は 84 時間である。

(2) GO-FLOW チャートによる表現

図 5-18 のシステム図を GO-FLOW チャートに表現すると図 5-19 のようになる。オペレータの意味は図 5-28 と同様である。図中、各々のシステムに対応したオペレータの脇に、システム名を略記した。他のオペレータは、AND/OR の論理オペレータである。

最終信号線は、#30、#38、#27 であり、それぞ

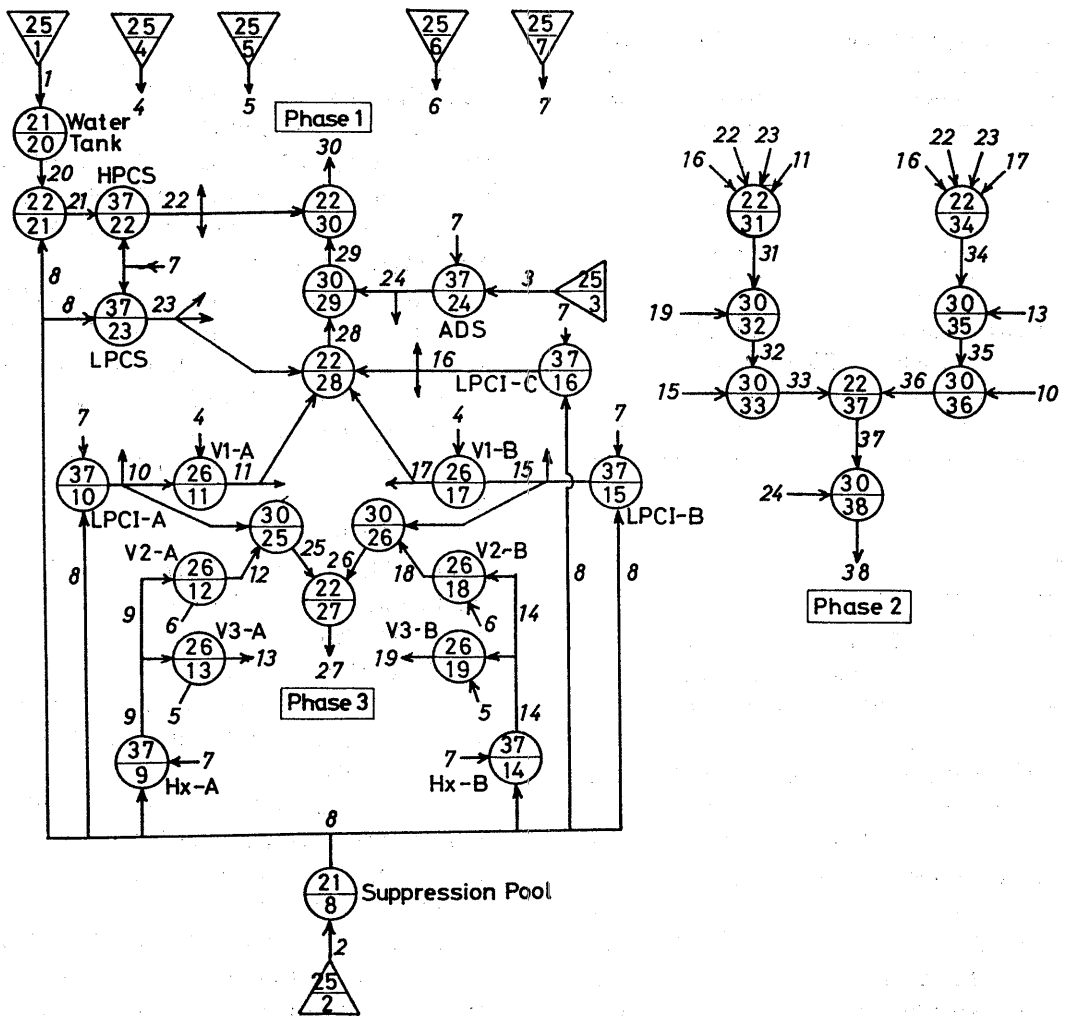


図 5-19 GO-FLOW チャート (BWR 非常用炉心冷却系)







表5-18 解析結果 (BWR 非常用炉心冷却系)

Time Point	State	Unreliability			
		Signal #30 (Phase 1)	Signal #38 (Phase 2)	Signal #27 (Phase 3)	System
1	Stand-by	0.0	1.0	1.0	
2	Phase 1 Demand	0.0	1.0	1.0	0.0
3	30 min. after	$9.45 \times 10^{-10}$	1.0	1.0	$9.45 \times 10^{-10}$
4	Phase 2 Demand	$(9.45 \times 10^{-10})$	$7.00 \times 10^{-6}$	1.0	$7.00 \times 10^{-6}$
5	5 hr. after	$(1.14 \times 10^{-7})$	$7.70 \times 10^{-5}$	1.0	$7.70 \times 10^{-5}$
6	36 hr. after	$(5.01 \times 10^{-6})$	$5.12 \times 10^{-4}$	1.0	$5.12 \times 10^{-4}$
7	Phase 3 Demand	$(5.01 \times 10^{-6})$	$(5.12 \times 10^{-4})$	$1.03 \times 10^{-6}$	$5.13 \times 10^{-4}$
8	84 hr. after	$(5.40 \times 10^{-5})$	$(1.70 \times 10^{-3})$	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.23 \times 10^{-4}$

各フェーズにおいて、炉心からの有効な除熱という指令を満足するためには、各フェーズの対応する系が正常に動作するだけではだめである。例えば、フェーズ2における動作が失敗している場合は、たとえフェーズ3で熱交換器 ( $H_x$ )、低圧注入系 (LPCI) が正常に動作したとしても、フェーズ3における要求は満たされていないと考える。それ故、システム全体として考えた場合の各フェーズにおける動作失敗確率は、それ以前のフェーズにおけるシステムの動作成功/失敗に依存することとなる。表7-9におけるシステム故障確率は各フェーズ以前の故障確率を加え合わせたものとなっている。

図5-20に、動作失敗確率の時間経過による推移を

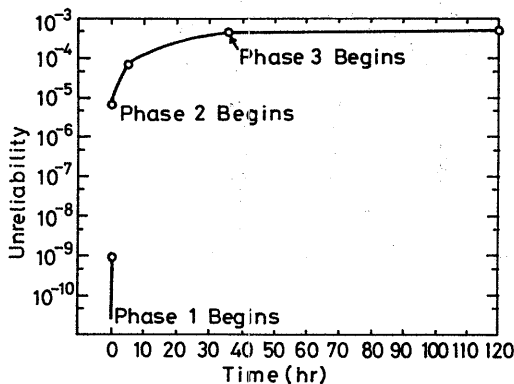


図5-20 解析結果 (BWR 非常用炉心冷却系)

示す。図中、実線は文献(44)に示された解析結果であり、○印は、本解析の結果である。GO-FLOW手法により同一の結果が得られることがわかる。

### 5.7.3 船用炉非常炉心注入系非常用電源系

#### (1) 系の説明

船用炉非常炉心注入系は、図5-21に示すように、独立二系統の高圧注入系 (HPCI)、ポンプ出口がタイラインで接続された二系統の低圧注入系 (LPCI)、及び、再循環冷却系一系統で構成されている。

この系も、LOCA後の炉心からの除熱を目的としており、時間経過に伴い動作モードが順次変化する Phased Mission Problem の一例と言える。

この系の非常用電源としては、補助発電機 (720kW) 2台、非常用発電機 (240kW) 1台の計3台のディーゼル発電機が用意されている。本章では、この非常用電源系の信頼性解析に GO-FLOW 手法を適用した例を示す。

3台のディーゼル発電機のうち1台の機能が満足されれば非常用電源は確保される。そこで(1)LOCA信号発生と共に、ディーゼル発電機3台が同時に起動される、単純な冗長系の場合と、(2)LOCA信号発生と共にディーゼル発電機1台が起動され、他の2台は、バック・アップとして待機状態に置かれている、待機冗長系の場合、の2ケースについて解析を行い相互の比較を行う。また、ケース2の場合については、解析的な解も合わせて求める。



## (2) 冗長系, ケース(1)

非常用電源系の部分を GO-FLOW チャートに表現すると図5-22 のようになる。最終信号線は#14 であり少なくとも1台のディーゼル発電機が動作状態にあること, すなわち, 非常用電源の確保を意味している。

タイム・ポイントは表5-19 のように定義する。LOCA 信号が発せられるまでの系の待機時間は720時間(30日)とした。非常炉心注入系の動作モードの変化に対応して, Phase1 は0~30分, Phase2 は30分~1時間, Phase3 は1~36時間とした。非常用電源系にとっては, これらの区別は特に意味はないが, 非常

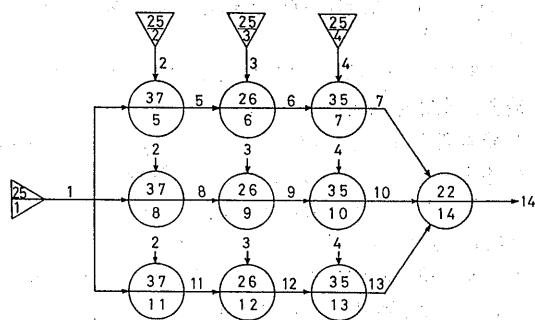


図5-22 GO-FLOW チャート (冗長系)

表5-19 タイム・ポイントの定義 (冗長系)

Time Points	作用	意味
1	信号#1 発生開始	初期時刻
2	信号#2 強度720.0 信号#3 発生	Phase 1 開始
3	信号#4 強度0.25	15分後
4	信号#4 強度0.25	30分後, Phase 1 終了, Phase 2 開始
5	信号#4 強度0.25	45分後
6	信号#4 強度0.25	1時間後, Phase 2 終了, Phase 3 開始
7	信号#4 強度11.0	12時間後
8	信号#4 強度12.0	24時間後
9	信号#4 強度12.0	36時間後, Phase 3 終了

表5-20 オペレータに与えるデータ (冗長系)

Operator	Type	Data	意味、対応機器
1	25	1.0(1~9)	非常用電源系待機開始
2	25	720(2)	待機時間
3	25	1.0(2)	起動信号
4	25	.25(3~6), 11.0(7), 12.0(8~9)	経過時間
5	37	$\lambda = 0.0$	DG 1 待機中の故障
6	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 1 起動
7	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 1 運転中の故障
8	37	$\lambda = 0.0$	DG 2 待機中の故障
9	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 2 起動
10	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 2 運転中の故障
11	37	$\lambda = 0.0$	DG 3 待機中の故障
12	26	$P_f = 3 \times 10^{-2}$	DG 3 起動
13	35	$\lambda = 3 \times 10^{-3}/h$	DG 3 運転中の故障
14	22		OR ゲート









で、ディーゼル発電機2の起動指令が得られる。図5-24に各タイム・ポイントにおけるこの信号の強度を示す。第13行目に、ディーゼル発電機2が起動指令により正常に起動を開始した割合が得られている。これを図に表すと、図5-25となる。

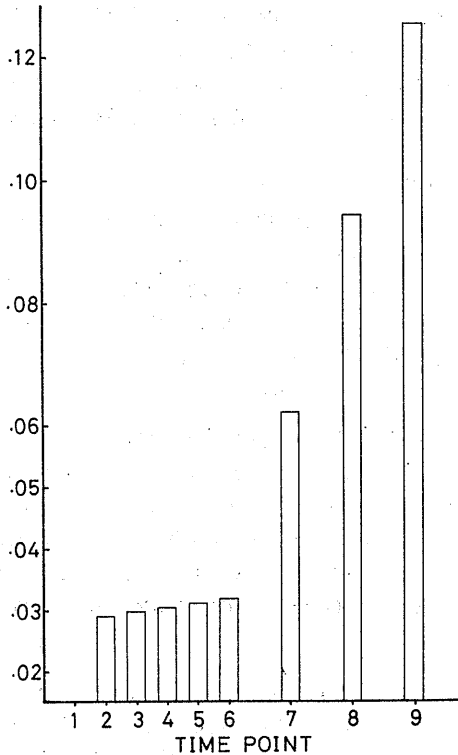


図5-25 ディーゼル発電機2の動作確率

第14行目には、起動を開始したディーゼル発電機2が運転中の故障発生により停止した分だけ減少した運転状態にある割合が記してある。この計算には、タイプ35のオペレータの定義式を用いてある。例えば、タイム・ポイント8における信号#14の強度を与える計算式は次のようになる。

$$14(8) = 0.094463 \times \exp \left\{ -\lambda \times 0.25 \times \frac{0.0291}{0.094463} \right. \\ \left. - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.029805}{0.094463} - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.030510}{0.094463} \right. \\ \left. - \lambda \times 0.25 \times \frac{0.031215}{0.094463} - \lambda \times 11.0 \times \frac{0.031919}{0.094463} \right\}$$

$$-\lambda \times 12.0 \times \frac{0.062370}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000705}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \times \frac{0.000704}{0.094463} - \frac{1}{2} \lambda \times 11.0 \times \frac{0.030451}{0.094463} \\ - \frac{1}{2} \lambda \times 12.0 \times \frac{0.032093}{0.094463} \quad (5-21)$$

指数の中の第一項は、タイム・ポイント2において起動していたディーゼル発電機がタイム・ポイント2～3の間の0.25時間の中に故障する部分で、図5-26①に相当している。

第七項は、タイム・ポイント2～3の間に新たに起動したディーゼル発電機がその間の運転中に故障する割合を計算している。タイム・ポイント3における信号#13の強度は、起動指令により起動を開始したディーゼル発電機のタイム・ポイント3における累積値である。タイム・ポイント2から3の間で絶えず新たな起動指令が発せられ、その間、起動を開始したディー

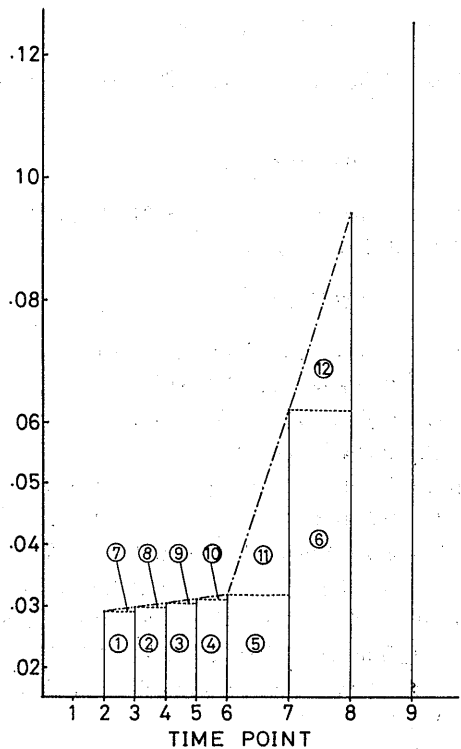


図5-26 タイプ35オペレータの計算式の説明図

ゼル発電機の割合は順次増大していくわけである。タイプ35のオペレータの定義式は、その間、一定割合で起動指令が出るとした場合の近似値となっている。単位時間当たり  $s$  の割合で起動するとすると、 $t_2 \sim t_3$  の間で起動を開始したディーゼル発電機が  $t_3$  において作動している割合は次の式で表せられる。

$$\begin{aligned} \int_{t_2}^{t_3} s e^{-\lambda(t_3-t)} dt &= s \int_0^{t_3-t_2} e^{-\lambda t} dt = \frac{s}{\lambda} (1.0 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}) \\ &= \frac{s}{\lambda} (1.0 - 1.0 + \lambda(t_3-t_2) - \frac{1}{2} \lambda^2 (t_3-t_2)^2) \\ &= s \left( (t_3-t_2) - \frac{1}{2} \lambda (t_3-t_2)^2 \right) \\ &= s \times (t_3-t_2) \left\{ 1.0 - \frac{1}{2} \lambda (t_3-t_2) \right\} \quad (5-22) \end{aligned}$$

ここで  $s \times (t_3-t_2)$  は  $t_2 \sim t_3$  の間で新たに起動を開始した割合、つまり、タイム・ポイント2～3の間での信号#13の増加量である。それ故

$$s \times (t_3-t_2) = \#13(3) - \#13(2) = 0.000705 \quad (5-23)$$

となり、又、 $t_3-t_2 = 0.25$  であるので、元の式は、

$$0.000705 \times \left( 1.0 - \frac{1}{2} \lambda \times 0.25 \right)$$

となる。この結果、 $t_2 \sim t_3$  の間の故障による減少量は

$$0.000705 \times \frac{1}{2} \lambda \times 0.25$$

であることがわかる。一方、(5-21)式を展開し、第7項からの寄与を求めると、

$$-0.000705 \times \frac{1}{2} \lambda \times 0.25$$

である。これにより、(5-21)式、すなわち、タイプ35オペレータの定義式は、この故障発生モデルの近似式となっていることがわかる。図5-26において、⑦の部分、上記検討部分に相当する。

第八～十二項はそれぞれ⑧～⑫に対応する。

なお、今の場合、タイム・ポイント1～2の間については上記7～12項に相当する項は出てこない。これは、タイム・ポイント2における副入力信号#4の強度を0.0にしてあるためである。タイプ35の定義式により、起動指令が順次増大する場合だけでなく、突然、ステップ状に増大する場合も正しく取り扱えることがわかる。

表5-24における第15行目は、ディーゼル発電機1と2どちらかが運転状態にある確率をあらわしてい

る。(タイム・ポイント1における値は除く)

#10のオペレータにより、#9の信号から、#10の信号が得られた際、#10は、#9の補集合となっていた。それ故、#15のオペレータのORゲートの計算の時は、#9と#14の信号で重なり合う部分がないため、単純な加算を行う。

最終オペレータのORゲートも、同様に、信号#8、#14、#20の強度の単純な加算となる。

最終結果は、信号#21の強度である。これは、どれか一台のディーゼル発電機が作動状態にある確率を表している。

(4) 解析的な解法、ケース(2)

ここで、ケース(2)の場合を解析的に解いて、前節のGO-FLOW手法による結果と比較してみる。

ディーゼル発電機1～3の運転状態にある確率を、それぞれ、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ と置く。タイム・ポイント2を時間の原点に取り、 $t=0$ と置く。

$t=0$ における初期値は、

$$\begin{aligned} N_1(0) &= (1.0 - 720 \times \lambda_s) \times (1.0 - Q_d) \\ &= 1.0 \times (1.0 - 0.03) = 0.97 \quad (5-24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2(0) &= (1.0 - N_1(0)) \times (1.0 - 720 \cdot \lambda_s) \times (1.0 - Q_d) \\ &= 0.03 \times 1.0 \times 0.97 = 0.0291 \quad (5-25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_3(0) &= (1.0 - N_1(0) - N_2(0)) \times (1.0 - 720 \cdot \lambda_s) \\ &\quad \times (1.0 - Q_d) = 0.0009 \times 1.0 \times 0.97 = 0.000873 \quad (5-26) \end{aligned}$$

となる。これらは、表5-24の、タイム・ポイント2における信号#8、#14、#20の強度と同じである。なお上記計算において、 $\lambda_s$  (待機中の故障率) = 0.0、 $Q_d$  (起動失敗確率) = 0.03の値を用いた。

$N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ についての式を立てると次のようになる。

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_o \cdot N_1 \quad (5-27)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (1.0 - Q_d) \times \lambda_o \cdot N_1 - \lambda_o \cdot N_2 \quad (5-28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= (1.0 - Q_d) \times Q_d \times \lambda_o \cdot N_1 + (1.0 - Q_d) \\ &\quad \times \lambda_o \cdot N_2 - \lambda_o \cdot N_3 \quad (5-29) \end{aligned}$$

(5-28)式右辺の第一項は、第1のディーゼル発電機が故障した場合に第2のディーゼル発電機が起動される割合である。

(5-29)式の第1項は、第一のディーゼル発電機が故

















表5-28 GO-DLOW 手法による計算手順 (PWR 補助給水系)

Operator	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Type	25	25	25	37	39	37	39	22	37	39	37	39	37	39	22
Signal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Time Point															
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.98488	.98488	.9997714	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.9999997
3	1.0	1.0	1.0	.98488	<u>.8864</u>	.98488	.98488	.99828	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999777
4	1.0	1.0	1.0	.98482	<u>.8863</u>	.98482	.98482	.998274	.9998915	.9998915	.998807	.998807	.998699	.998699	.99999775
5	1.0	1.0	1.0	.98482	.98482	.98482	.98482	.9997696	.9998915	.9998915	.998807	.998807	.998699	.998699	.9999997
6	1.0	1.0	1.0	.98393	.98393	.98393	.98393	.9997418	.9998852	.9998852	.998738	.998738	.998623	.998623	.9999964
7	1.0	1.0	1.0	<u>.999118</u>	.999118	.98393	.98393	.9999858	.9998852	.9998852	.998738	.998738	.998623	.998623	.99999998
8	1.0	1.0	1.0	.98494	.98494	.96976	.96976	.9995446	.999784	.999784	.997624	.997624	.997408	.997408	.99999882
9	1.0	1.0	1.0	.98494	.98494	.96976	.96976	.9995446	.999784	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999545
10	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.96970	.96970	.9995419	.9997835	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999542
11	1.0	1.0	1.0	.98488	.98488	.96970	.96970	.9995419	.9997835	.9997835	.997619	.997619	.997403	.997403	.99999881
12	1.0	1.0	1.0	.98459	.98459	.96940	.96940	.9995285	.9997814	.9997814	.997596	.997596	.997377	.997377	.99999876
13	1.0	1.0	1.0	.98459	.98459	.96940	.96940	.9995285	<u>.9999979</u>	.9999979	.997812	.997812	<u>.997810</u>	.997810	.99999897
14	1.0	1.0	1.0	.98408	.98408	.96890	.96890	.9995049	.9999943	.9999943	.997777	.997777	.997771	.997771	.99999890
15	1.0	1.0	1.0	.98408	.98408	.996890	.96890	.9995049	.9999943	.9999943	<u>.9999373</u>	.9999373	.9999316	.9999316	.99999997
16	1.0	1.0	1.0	.96982	.96982	.95464	.95464	.998631	.9998924	.9998924	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999823
17	1.0	1.0	1.0	.96982	.96982	.95464	<u>.8592</u>	.995751	.9998852	.9998852	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999451
18	1.0	1.0	1.0	.96976	.96976	.95458	<u>.8591</u>	.995739	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999448
19	1.0	1.0	1.0	.96976	.96976	.95458	.95458	.998624	.999892	.999892	.998812	.998812	.998704	.998704	.99999822
20	1.0	1.0	1.0	.96888	.96888	.95369	.95369	.998559	.9998857	.9998857	.998743	.998743	.998629	.998629	.99999802
21	1.0	1.0	1.0	.96888	.96888	<u>.999118</u>	.999118	.9999726	.9998857	.9998857	.998743	.998743	.998629	.998629	.99999996
22	1.0	1.0	1.0	.95470	.95470	.98494	.98494	.9993178	.9997844	.9997844	.997629	.997629	.997413	.997413	.99999824
23	1.0	1.0	1.0	.95470	.95470	.98494	.98494	.9993178	.9997844	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999318
24	1.0	1.0	1.0	.95464	.95464	.98488	.98488	.9993142	.9997840	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.999314
25	1.0	1.0	1.0	.95464	.95464	.98488	.98488	.9993142	.9997840	.9997840	.997624	.997624	.997408	.997408	.99999822
26	1.0	1.0	1.0	.95435	.95435	.98459	.98459	.9992965	.9997819	.9997819	.997601	.997601	.997383	.997383	.99999816
27	1.0	1.0	1.0	.95435	.95435	.98459	.98459	.9992965	<u>.9999979</u>	.9999979	.997817	.997817	<u>.997815</u>	.997815	.99999846
28	1.0	1.0	1.0	.95384	.95384	.98408	.98408	.9992651	.9999943	.9999943	.997777	.997777	.997771	.997771	.99999836
29	1.0	1.0	1.0	.95384	.95384	.98408	.98408	.9992651	.9999943	.9999943	<u>.9999373</u>	.9999373	.9999316	.9999316	.99999995
30	1.0	1.0	1.0	.93958	.93958	.96982	.96982	.998177	.9998924	.9998924	.998817	.998817	.998709	.998709	.99999765

て、別々のオペレータの入力信号となる場合は、それぞれのオペレータの出力信号の間には従属性がある。ただし、タイプ35, 37, 38の副入力信号は時間経過量を表現しているため、上記規則にもかかわらず、相互に独立な信号として扱うこととする。

GO-FLOW チャートを用いて、系の解析を実施するためには、まず機器の故障率データを基に個々のオペレータの動作モードに対して各々の発生率を与える。これは、フォールト・ツリー解析における基本事象の発生確率に対応している。

更に、系の動作モードに対応して、離散的な時刻を示すタイム・ポイントを定義する。このタイム・ポイントは、1, 2, 3, …と番号づけられており、解析対象の動作モードをあらわすために必要な時間区切り数により、その総数は定まる。タイム・ポイントは単に時間の区切りをあらわすだけであるため、順序は実際の時刻順であるが、タイム・ポイント間の間隔は実時間において均一である必要はない。

計算は、信号発生オペレータ（タイプ25）から出発し、順次、入力信号の強度がすべて求められているオペレータについて、その出力信号の強度を求める。この手順を繰り返すことにより、すべての信号の強度がすべてのタイム・ポイントにおいて求まる。

最後に、系の解析の目的となる信号線の強度から、系の動作の成功/失敗確率が、各々の時刻、状態において求まる。

## 5.9 考 察

GO-FLOW 手法は、GO 手法を基本とし、その特長を生かしたまま、GO 手法解析における限界を克服するために開発した信頼性解析手法である。それ故、第7章の解析実施例からもわかるように、GO 手法あるいはフォールト・ツリー解析、等、従来の解析方法では実施が困難であった種類の解析も可能となり、信頼性解析の実際の系への適用における、有用な解析手法と言える。

GO 手法と同様に、解析対象の系をモデル化して表現する GO-FLOW チャートはシステムの P&I ダイアグラム、シーケンス・ダイアグラム等と視覚的に対応している。それ故、

- (1) GO-FLOW チャート作成が機械的に実行できる。
- (2) GO-FLOW チャート作成の際解析者の恣意が入りにくい。

(3) GO-FLOW チャート作成に要する時間が短い。

(4) GO-FLOW チャートの理解、再検討が容易で、チャートの正当性を確認しやすい。

(5) 解析対象の系の構造が変更になった場合容易に対応できる。  
等の長所を保持している。

GO 手法解析の限界を克服した本解析方法の最大の特徴は、信号の意味を GO 手法とは異なったものに取り、それを基本的な出発点として解析手法の体系を組み立てた点にある。GO 手法においては、信号は、“On-to-Off” か “Off-to-On” の信号であり、状態の変化の発生をあらわしている。信号が存在することは、状態が変化することを意味し、信号が存在しないことは、一定の状態を継続することを意味する。これに対して、GO-FLOW 手法では、“信号の存在”とは実際の流体、情報の流れの存在あるいは存在する可能性を意味している。

信号の意味する所が GO 手法とは異なっているため GO 手法におけるオペレータの定義式は、タイプ5の信号発生器の様な一部オペレータを除いて、GO-FLOW 手法においては使用できない。それ故、新たに、GO-FLOW 手法におけるオペレータ群を定義した。これらの中には、タイプ23, 24, 35, 39等、GO-FLOW 手法特有なオペレータが存在する。

この新たな信号の意味、オペレータ群の定義から、更に信号の“強度”を定義し、タイム・ポイントの取り方を定めて作成したのが GO-FLOW 手法と言える。

GO-FLOW 手法の新たな信号を用いることにより、状態が Off→On→Off のような任意の変化をする系を取り扱うことが可能となった。GO 手法においては、信号は “On→to-Off” あるいは “Off-to-On” であったため、系の状態の変化としては Off→On あるいは On→Off の変化のような一方向の変化しか取り扱えなかった。この点が、GO 手法による解析の大きな制約となっていたわけである。

Off→On→Off の状態変化をする系としては、5.7、解析例(1)で示した原子力船“むつ”の非常用崩壊熱除去系がある。この系は最初待機状態 (Off) に置かれ、起動指令により動作を開始する (On)。系の運転継続中に故障発生により機能停止 (Off) に致する。この解析例(1)では、各時刻における系の動作成功/失敗確率が一つの GO-FLOW チャートにより、一度の計算で得られることが示されている。

解析例(2)は沸騰水型原子炉非常用炉心冷却系で、解