

分置

# 事故後事象推移の動的解析手法の開発

1995年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 事故後事象推移の動的解析手法の開発

日置 一雅\*

### 要 旨

事故発生後の事象推移において、プラントの温度・流量・液位等のプロセス変数、機器の状態、運転員の診断・操作の失敗確率は互いに影響し合う。したがって、緊急時運転手順（EOP）などのアクシデントマネージメント（AM）の効果を検討するためには、時々刻々の機器状態、運転員操作に応じたプロセス変数を動的に計算し、事故シーケンスの確率評価に組み込んでいく必要がある。しかし、フォールトツリー・イベントツリーなどの従来の手法では事象推移をダイナミックに取り扱うことができない。また、これまでに提案されている動的解析手法は、計算機のメモリーあるいは計算時間の制約から、実機プラントの評価に用いるのは困難である。そこで、レベル1 PSAで選定した起因事象と作成したフォールトツリーから求めたミニマルカットセットを利用し、目的をEOP等のAMの効果の評価に限定することにより、サポートシステムまで含めた大きなシステムの評価や実機プラントの事故シーケンス発生頻度の評価が可能な事象推移の動的解析手法を開発する。

Development of Dynamic Analysis Method  
for Post-Accident Event Sequence

Kazumasa HIOKI\*

ABSTRACT

The process variables, the status of the components and the Human Error Probabilities (HEPs) affect each other. Therefore, it is necessary to dynamically calculate the process variables such as the temperature, the flow rate and the liquid level considering the HEPs and the components' status in order to evaluate the efficiency of the Accident Management (AM) including the Emergency Operating Procedures (EOPs).

As the traditional methods with the event trees and the fault trees cannot deal with the event sequences dynamically, several dynamic methods have been proposed. These methods, however, cannot evaluate the efficiency of EOPs of real plants because of the large memory size and long calculation time which they need.

A new dynamic analysis method for post accident event sequences is developed that utilizes the initiating events and the minimal cutsets which have already been obtained through the Level-1 PSA. By concentrating the objective to the evaluation of the efficiency of EOPs, this new method can deal with large systems including the support systems and real size plant within the limited computer memory in tolerable time.

\*: Nuclear System Safety and Reliability Research Section,  
Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

# 事故後事象推移の動的解析手法の開発

## 目次

1.	序 .....	1
2.	モデルプラントの概要 .....	1
3.	緊急時運転手順 (EOP) .....	1
4.	手法 .....	4
4.1	手法の概要 .....	4
4.2	事象推移モデル .....	5
4.3	プラントモデル .....	7
4.3.1	初期状態の設定 .....	7
4.3.2	プロセス変数の計算 .....	7
4.4	判定条件と内容 .....	8
4.4.1	EOP導入の判定 .....	8
4.4.2	EOP操作の有効・無効の判定 .....	8
4.4.3	炉心損傷判定 .....	10
4.5	運転員モデル .....	11
4.5.1	モンテカルロ法による計算 .....	12
4.5.2	タイムメッシュ法による計算 .....	13
4.6	炉心損傷発生頻度の計算 .....	14
5.	適用 .....	15
6.	結論と今後の課題 .....	16
7.	謝辞 .....	18
8.	参考文献 .....	18

## 事故後事象推移の動的解析手法の開発

## 図表リスト

図-1 EOP導入条件が満たされるまでの事象推移	19
図-2 モンテカルロ法におけるアンリライアビリティの発生時刻決定方法	20
図-3 EOP導入条件が満たされた後の事象推移	21
図-4 原子炉トリップ後の冷却材温度制御	22
図-5 操作1と2が無効、操作3が有効なカットセットに対するイベントツリー	23
図-6 操作1が無効、操作2と3が有効なカットセットに対するイベントツリー	24
図-7 操作1、2、3が全て有効なカットセットに対するイベントツリー	25
図-8 診断失敗確率と時間の関係	26
図-9 操作の行われる時刻の分布	27
図-10 操作失敗確率	28
図-11 モンテカルロ法における事象推移図	29
図-12 正しい診断が下される累積確率と時間の関係	30
図-13 操作の行われる累積確率と時間の関係	31
図-14 プロセス変数とPSFの関係	32
図-15 タイムメッシュ法によるシーケンスの模擬	33
図-16 タイムメッシュ法における計算フロー図	34
図-17 各タイムメッシュ毎に正しい診断が下される確率	35
図-18 各タイムメッシュ毎に操作の行われる確率	36
図-19 タイムメッシュ法における操作失敗確率の計算方法	37
図-20 バイアス法によるアンリライアビリティの発生時刻の決定方法	38
図-21 プログラムフローチャート	39
図-22 解析結果例	48

## 1. 序

プラントの温度・流量・液位等のプロセス変数は機器の状態によって影響を受け、逆に、運転員の診断・操作の失敗確率の値はその時点でのプロセス変数によって影響を受ける。したがって、緊急時運転手順（EOP）などのアクシデントマネージメント（AM）の効果を検討するためには、時々刻々のプロセス変数に応じた運転員操作を考慮し、それに応じた機器状態にしたがってプロセス変数を計算して、プラントが低温停止に至る確率、炉心損傷に至る確率を計算する必要がある。

確率論的安全評価において、事故シーケンスの発生頻度を求めるために、最も広く用いられている手法としてフォールトツリー／イベントツリー手法がある。しかし、従来のイベントツリー手法では、運転現場において実際に運転員が対峙している事象推移をダイナミックに取り扱うことができない。また、これまでに提案されている動的解析手法は、いずれもプラントのシステムや機器の状態を全て定義するため、計算機のメモリー容量や計算時間等の制約から、小さなモデルにしか適用されておらず、実機プラントの評価に用いるのは困難である。

そこで、レベル1 PSAで選定した起因事象と作成したフォールトツリーから求めたミニマルカットセットを利用し、目的をEOP等のAMの効果の評価に限定することにより、サポートシステムまで含めた大きなシステムの評価や実機プラントの炉心損傷発生頻度の評価が可能な事象推移の動的解析手法を開発した。本報告書では手法の内容と、本手法を液体金属冷却高速炉のモデルプラントのEOPに適用した結果を報告する。

## 2. モデルプラントの概要

解析対象とした高速増殖炉はナトリウム冷却・ループ型炉で、原子炉冷却系は3系統で構成されており、それぞれ1次ナトリウム冷却系、2次ナトリウム冷却系、水・蒸気系を備えている。

1次系ナトリウム配管・機器のうち低所となる原子炉容器、主ポンプ、中間熱交換にはガードベッセルが設けられている。1次主冷却系からの漏洩時には、1次主冷却系循環ポンプ主モータトリップ、1次カバーガス系隔離、1次ナトリウムオーバフロー系による原子炉容器へのナトリウムの汲み上げが行われる。

主冷却系以外に、燃料交換時及び緊急時等の原子炉停止時に炉心の熱を除去するため、補助冷却設備が設けられている。補助冷却設備は3系統ある2次主冷却系より分岐し、それぞれ蒸気発生器、と並列に空気冷却器を備えている。補助冷却設備起動時には主ポンプはボニーモータにより駆動される。また、自然循環によっても炉心冷却が行えるよう、炉心、中間熱交換器、空気冷却器の伝熱中心高低差を持たせる設計となっている。さらに1次主冷却系設備等のメンテナンス時に炉心を冷却するために、メンテナンス冷却系が備えられている。

### 3. 緊急時運転手順 (EOP)

本手法で評価の対象としたEOPは以下の4種類である。

#### 不測事態#1 「崩壊熱除去機能喪失」時のEOP

原子炉トリップ時に3ループ全てが下記のいずれかの状態になると導入条件-2が満たされる。

- ・ 1次主循環ポンプの回転数<6%
- ・ ACS空気冷却器出口ナトリウム流量<200t/h
- ・ ACS空気冷却器出口ナトリウム温度 $\geq 390^{\circ}\text{C}$

これらの条件は補助冷却設備が強制循環に失敗していることを意味しており、放置するとPLOHS (Protected Loss of Heat Sink) に至る考えられる。

導入条件-2が満たされた場合には下記の手順に沿って操作が行われる。

- 1) 自然循環除熱運転移行失敗ループのACS手動操作切替スイッチを「自然循環」位置にする。
- 2) 弁、ダンパ、ペーン等機器の不作動で自然循環除熱運転が阻害されている場合は、速やかに現場に行き、手動で「開」操作を行う。
- 3) メンテナンス冷却系を起動する。

#### 不測事態#2 「液位確保失敗」時のEOP

1次主冷却系ナトリウム漏洩時に、下記の状態になると、導入条件-3が満たされる。

原子炉容器ナトリウム液位 $\leq$ EsL

この条件は1次ナトリウムオーバフロー系が機能していないことを意味しており、放置するとLORL (Loss of Reactor Level) に至ると考えられる。

導入条件-3が満たされた場合には下記の手順に沿って操作が行われる。

- 1) 1次ナトリウムオーバフロー系を手動起動する。
- 2) 原子炉容器ナトリウム温度を維持し、シュリンクによる液位低下を防止する。
- 3) 1次ナトリウムオーバフロー系故障の復旧操作を行う。
- 4) メンテナンス冷却系を起動する。

1次主冷却系ナトリウム漏洩時に、下記の状態になると、導入条件-4が満たされる。

漏洩ループの1次主冷却系流量 $\geq$ 20%

この条件は1次主冷却系循環ポンプのトリップに失敗していることを意味しており、放置するとLORLに至ると考えられる。

導入条件-4が満たされた場合には下記の手順に沿って操作が行われる。

- 1) 1次主冷却系循環ポンプM-Gセット一括操作スイッチを「停止」位置とする。
- 2) 1次主冷却系循環ポンプM-Gセット発電機界磁遮断器を手動で「切り」とする。

1次主冷却系ナトリウム漏洩時に、下記の状態になると、導入条件-5が満たされる。

1次アルゴンガス系浄化ガス供給タンク圧力 $\geq 2.1\text{kg/cm}^2$

この条件は1次アルゴンガス系の隔離に失敗していることを意味しており、放置するとLORLに至ると考えられる。

導入条件-5が満たされた場合には下記の手順に沿って操作が行われる。

- 1) 1次アルゴンガス系格納容器入口外側隔離弁（150MV30）及び内側隔離弁（150MV31）の操作スイッチを「全閉」とする。
- 2) 1次アルゴンガス系減衰タンク出口弁（150MV26）操作スイッチを全閉とする。
- 3) 1次アルゴンガス系格納容器入口外側隔離弁（150MV30）を現場にて手動で閉とする。
- 4) メンテナンス冷却系を起動する。

#### 4. 手法

##### 4.1 手法の概要

本手法はレベル1PSA（参考文献1）すでに求めてある起因事象とユニークシステムコンビネーションのミニマルカットを利用し、EOPの効果を定量化する。EOPの効果は、EOPが存在する場合の炉心損傷発生頻度と、EOPが存在しない場合の炉心損傷発生頻度の比として求められる。炉心損傷発生頻度は起因事象の発生頻度とミニマルカットセットの確率の積に、EOPの失敗確率を乗じたものである。EOPの失敗確率は運転員の診断・操作の失敗確率やEOPで用いるハードウェアの故障確率から成る。運転員の診断・操作の失敗確率の値はその時点でのプロセス変数によって影響を受けるので、各時刻におけるプロセス変数を計算することと、EOPの各診断・操作の行われる時刻を計算することが必要となる。

EOPが行われる時刻とその成功・失敗に応じて、プロセス変数を計算し、炉心損傷の発生時刻とその確率を計算する。

EOPはプラントの徵候によって複数存在するので、起因事象及びミニマルカットセットの組み合わせによって、どのEOPの導入条件が満たされるかが決まる。

EOPの各診断・操作の時刻及び確率の決定方法としては、乱数を用いるモンテカルロ法と、 $\Delta t$ 毎に全ての場合を追跡するタイムメッシュ法の2種類の手法がある。本報告書では両方の手法について述べる。

故障の内容によっては各操作が成功しても、その操作が無効な場合がある。そこでフルトツリーモデルを基に、イベントコードで分類したルールに従って、起因事象及びミニマルカットセットを構成する素事象の全てについて、EOP操作の各々が有効か無効かを判断する。

なお、事故カテゴリーがPLOHSの場合、起因事象が発生した当該ループもEOPによって崩壊熱除去に使用できると考えられる。これを無視すると、EOP操作の効果が薄れてしまうので起因事象もEOP操作の対象とする。

#### 4.2 事象推移モデル

EOPの導入条件が満たされるまでの事象推移を図-1に示す。

$t = 0$ 時間で起因事象が発生し、 $t = T_{mcs}$ 時間でミニマルカットセットが成立する。

$T_{mcs}$ は以下のようにして計算で求める。ミニマルカットセットに含まれる事象のうちアンアベイラビリティ (UA) は起因事象と同時に発生するので、ミニマルカットセットがUAのみから成り、アンリライアビリティ (UR) が含まれていない場合には $T_{mcs} = 0$

時間である。カットセットにURが1個含まれている場合には、そのURの発生時刻がTmcsである。カットセットにURが複数個含まれている場合には、最後のURの発生時刻がTmcsである。URの発生時刻及び確率の決定は、診断・操作と同様、モンテカルロ法とタイムメッシュ法の2種類の手法を用いる。モンテカルロ法の場合には、図-2に示すように、発生させた乱数を用いてURの発生時刻を決定し、Tmcsを決定する。URが使命時間内に発生する確率より乱数が大きい場合にはURが使命時間以後に発生することになるので、炉心損傷は発生しないことになる。タイムメッシュ法の場合には、使命時間を通じて、 $\Delta t$ （例えば1時間）毎にURが発生する場合としない場合の全てのシーケンスの確率を計算するので、予めURの発生時刻は決定しない。

ミニマルカットセットが成立してからTeop時間経過後にEOPの導入条件が満たされる。ミニマルカットセットが成立した時刻によって、そのときの崩壊熱レベルなどの初期条件が異なるので、Teopはプラントモデルを用いて計算で求める。

EOPの導入条件が満たされた後の事象推移を図-3に示す。

1つのEOPは、複数の診断と操作から成る。EOPの導入条件が満たされると、運転員による診断・操作が開始され、その成功・失敗に応じて、プロセス変数を計算し、低温停止あるいは炉心損傷に至る時刻と確率を計算する。

操作が成功しても、プロセス変数が変化し始めるには一定の時間がかかる。ある操作が行われてからすぐに診断を行うと、前の操作が成功していても失敗したものと判定される可能性がある。そこで、ある操作が行われてから、その操作が有効であったかどうかの診断を開始するまでに「待ち時間」を考慮する。「待ち時間」は操作毎に入力で与えることができるが、標準値は10分とする。

操作の行われる場所によって、操作開始までにかかる時間が異なる。そこで、操作に要する時間に加えて、「移動時間」を考慮する。「移動時間」は操作場所によって異なるので操作毎に入力で与えることができるが、標準値は操作が中央制御室で行われる場合には0分、現場で行われる場合には10分とする。

### 4.3 プラントモデル

#### 4.3.1 初期状態の設定

起因事象に対応したプラント初期状態を設定する。なお、原子炉のトリップには成功しているものとする。また、崩壊熱は入力で与えたデジタル値を用いる。

#### 4.3.2 プロセス変数の計算

機器状態に応じて、温度・流量・液位等の各種パラメータの時間変化を計算する。

フローモデルとしては、1次主冷却系、補助冷却設備、メンテナンス冷却系、1次ナトリウムオーバーフロー系、ガードベッセル等を考慮し、蒸気発生器以降の2次主冷却系及び水・蒸気系は無視する。

伝熱モデルでは、中間熱交換器及び空気冷却器における熱伝達面積、係数、温度差を考慮する。

ただし、PLOHSシーケンスではミニマルカットセットが成立するまでは、崩壊熱除去に使用可能なループ数が2ループであっても1ループであっても、原子炉冷却材温度は図-4に示すように規定どおり、原子炉トリップ後初めの13時間は325°C一定制御、その後は約200°Cまで15°C/hourで温度を降下させていくので、プロセス変数の計算はミニマルカットセットが成立した時点から開始する。

液位モデルでは、オーバフロー系による汲み上げ、温度低下によるシュリンケージ、漏洩の効果をも考慮する。また、漏洩量の計算にあたっては、ガードベッセルの有無、破損口の内外圧差を考慮する。

#### 4.4 判定条件と内容

##### 4.4.1 EOP導入の判定

ミニマルカットセットが成立すると、各プロセス変数を計算し、第1章で述べたEOP導入条件と比較して、条件が満たされたかどうかを判定し、その時刻を記録する。

##### 4.4.2 EOP操作の有効・無効の判定

プロセス変数を計算するためには、まず、カットセットに含まれる各事象毎に、各EOP操作が有効か無効かを判定する必要がある。そこで以下に述べるルールに従って読み込んだカットセットを分類する。

不測事態#1「崩壊熱除去機能喪失」、導入条件-2の緊急時運転操作について

- 1) 強制循環を阻害する事象のうち、自然循環は阻害しない事象（強制循環のみを阻害する事象）（例えばプロワ、ポニーモータ、蒸気発生器出入り口止め弁及びそれらのサポートシステムの故障）は、中央制御室から遠隔操作により自然循環へ移行させることが可能である。補助冷却設備のサポートシステムである機器冷却系等は外部漏洩・閉塞・内部漏洩があっても、自然循環移行は可能である。
- 2) 自然循環を阻害する事象のうち、空気冷却器出口止め弁・ダンパ・ベーンのサポートシステムの故障を含むカットセットは、現場における手動操作により自然循環へ移行可能である。
- 3) 補助冷却設備の外部漏洩・閉塞・内部漏洩事象、空気冷却器出口止め弁・ダンパ・

ペーン等の機器故障は復旧操作不可能である。

- 4) 非常用電源が喪失していないシーケンスに対しては、メンテナンス冷却系による復旧操作が可能である。メンテナンス冷却系の起動はメンテナンス冷却系のサポートシステムが両系統とも機能を喪失していないカットセットに対して有効である。

不測事態#2「液位確保失敗」、導入条件-3の緊急時運転操作について

- 1) 1次ナトリウムオーバフロー系が自動インターロック信号で起動していないので、故障原因是機器の起動失敗あるいは信号系の故障であると考えられる。中央制御室から遠隔操作により手動操作を行っても起動はできないと保守的に仮定する。よって、本操作で対象となる事象はない。
- 2) 原子炉容器ナトリウム温度維持は全ての事象が対象となる。
- 3) 1次ナトリウムオーバフロー系故障復旧操作は、故障機器が格納容器外にあり、故障モードが漏洩・閉塞以外の事象に対して有効である。この条件を満たすのは、全てサポートシステムとなる。
- 4) メンテナンス冷却系の起動はメンテナンス冷却系のサポートシステムが両系統とも機能を喪失していないカットセットに対して有効である。

不測事態#2「液位確保失敗」、導入条件-4の緊急時運転操作について

- 1) 1次主冷却系循環ポンプ主モータが自動インターロック信号でトリップしていないので、故障原因是遮断器の開失敗あるいは信号系の故障であると考えられる。中央制御室から遠隔操作により手動操作を行ってもトリップはできないと保守的に仮定する。よって、本操作で対象となる事象はない。
- 2) 1次系M-Gセット発電機界磁遮断器を手動で「切」とする操作は全てのカットセットに対して有効である。

## 不測事態#2「液位確保失敗」、導入条件-5の緊急時運転操作について

- 1) 格納容器入口外側隔離弁（150MV30）と内側隔離弁（150MV31）が両方とも自動インターロック信号で閉となっていないので、故障原因は弁の閉失敗あるいは信号系の故障であると考えられる。中央制御室から遠隔操作により手動操作を行っても隔離はできないと保守的に仮定する。よって、本操作で対象となる事象はない。
- 2) 1次アルゴンガス系減衰タンク出口弁（150MV26）操作スイッチを全閉とする操作は全てのカットセットに対して有効である。
- 3) 1次アルゴンガス系格納容器入口外側隔離弁（150MV30）を現場にて手動で閉とする操作は、150MV30の故障以外の事象について有効である。
- 4) メンテナンス冷却系の起動はメンテナンス冷却系のサポートシステムが両系統とも機能を喪失していないカットセットに対して有効である。

4.4.3 炉心損傷判定

EOP導入後は、運転員による診断・操作の成功・失敗と、図-5～図-7に示すようなイベントツリーに応じた各操作の有効・無効に応じて、プロセス変数を計算し、下記の炉心損傷発生条件と比較して、条件が満たされたかどうかを判定し、その時刻を記録する。

原子炉容器出口ナトリウム温度が650°Cをこえた時点でPLOHSに至ったとして、計算を終了する。これを失敗シーケンスとする。

原子炉容器液位が、原子炉容器出口ノズル上端以下に低下した時点でLORLに至ったとして、計算を終了する。これを失敗シーケンスとする。

EOP操作を行った後に、原子炉容器出口ナトリウム温度が予め設定した温度を下回ったら、計算を終了する。これを成功シーケンスとする。

#### 4.5 運転員モデル

異常発生時に事象が同定できた場合にはイベントベースの「異常時運転手順」が用いられるが、ここで評価するEOPは事象の同定ができなかった場合に用いられる徴候ベースのものである。したがって、EOPに入った時点では、運転員はどの機器が壊れているかはわからないものとする。また、手順を省略することはせず、EOPに従うものとする。なお、EOPは、導入条件ごとに操作条件、操作場所、操作内容を入力で与えておく。

診断や操作などの運転員のヒューマンエラーのモデルについては、これまでに多数の研究がなされており、その確率についても種々の値が提案されている。本手法では過去の研究を参考にし、以下に示すような診断・操作の行われる時刻と確率の関係を用いる。

正しい診断を下すことに失敗する確率と時間の関係には、参考文献2、3に提案されている値を基に、図-8に示すように、より簡易でなおかつ保守的な関係を採用する。すなわち、正しい診断を下すことに失敗する確率を $p$ 、時間を $t$ とすると、

$$\ln p = a * \ln t + b$$

$$\therefore p = \exp(a * \ln t + b) \equiv 1 - F(t)$$

ただし、 $a$ 、 $b$ は定数である。定数 $a$ 、 $b$ は、正しい診断が下されない確率が5分で1.0、300分で1000分の1となるように定める。

診断が下されない場合には操作は行われないものとし、以下に診断が下された場合の操作について述べる。操作については、それが行われる時間と、操作は行ったものの間違った操作を行う確率の2段階に分けて考える。まず、操作の行われる時間の分布は、図-9に示すように正規分布 ( $g(t)$ ) を仮定し、その平均値には操作所要時間の平均値を用い

る。なお、操作所要時間は各操作によって異なる。次に、操作は行われたが、操作に失敗する確率は図-10に示すように、操作の行われる時間には関係がないものとし、その確率は入力で与えることができるが、デフォルト値はルールベース（参考文献2）のヒューマンエラー確率の標準的な値である100分の1一定とする。

EOPの各診断及び操作の行われる時刻は、上記の分布を基に、モンテカルロ法またはタイムメッシュ法を用いて計算する。モンテカルロ法については4.5.1で、タイムメッシュ法については4.5.2でそれぞれ述べる。

#### 4.5.1 モンテカルロ法による計算

モンテカルロ法における事象推移を図-11に示す。炉心損傷発生頻度は、炉心損傷に至る試行回数を総試行回数でわって求める。

診断については、図-8に示した診断失敗確率と時間の関係 ( $1 - F(t)$ ) から、正しい診断が下される累積確率と時間との関係 ( $F(t)$ ) を求めたものを図-12に示す。発生させた乱数を累積確率とすることにより、正しい診断の下されるまでの時間を決定する。

次に、操作については、図-9に示した操作の行われる時間の分布 ( $g(t)$ ) を積分することにより、図-13に示すように操作の行われる累積確率と時間との関係 ( $G(t)$ ) を求めることにより、操作の行われるまでの時間を決定する。なお、操作は行われたが操作に失敗する確率は上述の如く、操作の行われる時間に関係なく100分の1一定とする。なお、診断に失敗した場合には操作は行われないものとするものとする。

なお、プラント状態が炉心損傷に至るまでの猶予時間が短くなってきたときの、運転員

のストレスの高まりが操作失敗確率に与える影響を考慮するために、ある時刻におけるプロセス変数の関数であるPSF (performance shaping factor)を操作失敗確率に乗じる。PSFは原子炉容器出口温度などのプロセス変数が通常状態と等しい時には1.0、炉心損傷条件に等しい時は5.0とする。その間は図-14に示すように線形に変化するものとする。

#### 4.5.2 タイムメッシュ法による計算

タイムメッシュ法の場合には図-15に示すように、予め時刻は決定せず、 $\Delta t$ （例えば5分）毎に診断・操作が行われる場合と行われない場合の全てのシーケンスの確率を計算する。図-16に診断と操作にかかる計算のフロー図を示す。

各タイムメッシュ毎に正しい診断の行われる確率は、図-17に示すとおり、図-12に示した正しい診断が下される累積確率と時間との関係 ( $F(t)$ ) より下式により求める。

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t) dt = [ F(t) ]_{t_{k-1}}^{t_k}$$

各タイムメッシュ毎に操作が行われる確率は図-18に示すように、図-13に示した操作の行われる累積確率と時間との関係 ( $G(t)$ ) より下式により求める。

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} g(t) dt = [ G(t) ]_{t_{k-1}}^{t_k}$$

操作に失敗する確率はモンテカルロ法の場合と同様に、操作の行われる時間に関係なく100分の1一定とする。操作が成功するのは、図-19に示すように、操作が行われて、なつかつ操作が成功した場合である。

なお、診断に失敗した場合には操作は行われないものとする。また、ある時刻におけるプロセス変数の関数であるPSF (performance shaping factor)を操作失敗確率に乗じることもモンテカルロ法の場合と同様である。

#### 4.6 炉心損傷発生頻度の計算

モンテカルロ法の場合には、まず、URの発生時刻を乱数を用いて決定する。URが使命時間内に発生する確率 ( $\lambda \times T_m$ ) より発生させた乱数が大きい場合にはURが使命時間以後に発生することになるので、ミニマルカットセットが成立せず、炉心損傷は発生しないことになる。しかし通常  $\lambda \times T_m$  は1よりはるかに小さいので、この手法ではサンプリングのほとんどが「成功」シーケンスと評価されてしまい、計算効率が悪い。そこで図-20に示すように、発生させた乱数にバイアス値を乗じ、URの発生時刻を決定し、後に「失敗」と評価されたシーケンスの数をバイアス値を乗じる方法を用いる。

次に、診断、操作の行われる時間を各々の回数だけサンプリングして、ミニマルカットセットが使命時間内に成立しないか、あるいは、ミニマルカットセットが使命時間内に成立しても、炉心損傷に至るまでにEOP操作が成功すれば「成功」とする。ミニマルカットセットが使命時間内に成立し、炉心損傷に至るまでにEOP操作が行われないか、あるいは行われても失敗した場合は「失敗」とする。これで1つのカットセットに対するサンプリングが1回終了する。

以上を多数回繰り返し、「失敗」に至った数を全サンプリング数で割って炉心損傷発生頻度を求める。これをカットセットの数だけ繰り返し、1つの初期状態に対する解析が終了する。さらに以上を各々の初期状態に対して実施することにより、炉心損傷発生頻度を求める。

タイムメッシュ法の場合は、1つのカットセットに対して、各  $\Delta t$  毎にURの発生確率、診断・操作の失敗確率を求めて全ての場合の確率を計算し、失敗に至る確率を合計する。EOPがない場合のシーケンスの発生頻度は、

$f(IE) * p(mcs)$  で表される。ここで、 $f(IE)$  は起因事象の発生頻度、 $p(mcs)$  はミニマル

カットセットの発生確率である。

EOPが存在する場合、URがないカットセットに対しては、

$$f(IE) * UA1 * UA2 * p(t) \quad (\text{ただし、以下、ミニマルカットセットは2次であると仮定})$$

である。ここで、UAkはアンアベイラビリティの発生確率、p(t)は時刻 t から開始した場合のEOPの失敗確率である。

URを1つ含むカットセットに対しては、

$$\int_0^{T_m} f(IE) * UA1 * \lambda_1 * p(t_1) dt_1 \quad \text{である。}$$

ここで、 $\lambda_k$  はURkの時間当たりの発生確率、Tmは使命時間である。

URを2つ含むカットセットに対しては、

$$\int_0^{T_m} \int_0^{T_m} f(IE) * \lambda_1 * \lambda_2 * p(t_1) dt_1 dt_2 \quad \text{となる。}$$

ここで、 $t_k$  はURkの発生時刻、 $t_3 = \max(t_1, t_2)$  である。

で計算できる。以上をカットセットの数だけ繰り返し、1つの初期状態に対する解析が終了する。さらに以上を各々の初期状態に対して実施することにより、炉心損傷発生頻度を求める。

膨大な数の事故シーケンスを効率的に計算するため、タイムメッシュ法の場合は、発生頻度による裾切り(truncation)を行う。(起因事象発生頻度×ミニマルカットセットの発生確率×EOPの失敗確率) が、あらかじめ決めた裾切り値(例えば $10^{-10}$ )未満になったらそのシーケンスは裾切りする。このシーケンスは成功、失敗に関係なしとする。

## 5. 適用

本手法を実機の事故シーケンスに適用するため、プログラム化した。プログラムのフローチャートを図-21(その1)から(その9)に示す。モンテカルロ法とタイムメッシュ法とでは処理が異なる部分が多いので、ほぼ2つのプログラムが存在することになる。

実機の解析結果の出力は事象推移の途中経過を表示するため膨大なページ数となるので、

図-22には結果のまとめの例だけを示す。モンテカルロ法、タイムメッシュ法とも書式は共通である。起因事象×ミニマルカットセットの一覧をEOP前・後別に発生確率でソートして表示し、EOPの効果はEOP後の炉心損傷発生頻度をEOP前の炉心損傷発生頻度で除した値であるノンリカバリーファクタ（NRF）で表す。本手法で求めたNRFはおおむね $1.0 \times 10^{-2}$ から $1.0 \times 10^{-3}$ の発生頻度にあり、従来のレベル1 PSA（参考文献1）で求めてあるNRFとほぼ同じ範囲にあるが、個々のカットセット毎によりきめ細かな評価ができる。

## 6. 結論と今後の課題

運転現場において運転員が実際に対峙している事象推移を動的に評価する手法を開発した。これにより、時事刻々の機器状態・運転員操作を考慮して、温度・流量・液位等のプロセス変数を動的に評価し、緊急時運転手順（EOP）などのアクシデントマネージメント（AM）の効果を定量化することが可能となった。

従来のイベントツリー・フォールトツリー手法では、運転員による修復の効果は、カットセットに含まれる事象毎に操作内容、操作場所、猶予時間に従って非修復確率を定め、これを1つのカットセットに対して1つずつ適用して評価していた。この方法では現実のEOPにあるような診断と操作の区別や、複数の操作の効果なども詳細には評価していなかった。また、アンリライアビリティの発生確率には長い使命時間中に発生する確率を用いる一方、非修復確率の決定にあたってはアンリライアビリティ事象が原子炉停止直後に発生した場合の猶予時間を用いていた。これは保守的な仮定であった。なぜならば、アンリライアビリティが原子炉停止後長時間経過後に発生した場合には、崩壊熱レベルや系統温度がすでに低下しており、猶予時間は原子炉停止直後よりも相当長いからである。

本手法では、ミニマルカットセット毎にアンリライアビリティ事象の発生時刻に従って、その発生確率とプロセス変数に応じた運転員の診断・操作失敗確率を求めることができる。また、ミニマルカットセットに加えて起因事象で機能を喪失したループをも、運転員の操作により崩壊熱除去に使用できる効果を考慮することにより、より現実的な評価を可能とした。

これまでにも事象推移の動的解析手法はいくつか提案されているが（参考文献4～6）、いずれもプラントのシステムや機器の状態を全て定義するため、計算機のメモリー容量や計算時間等の制約から、小さなモデルにしか適用されておらず、実機プラントの評価に用いるのは困難であった。本手法はレベル1PSAで選定した起因事象と作成したフォールトツリーから求めたミニマルカットセットを利用し、目的をEOP等のAMの効果の評価に限定することにより、サポートシステムまで含めた大きなシステムの評価や実機プラントの炉心損傷発生頻度の評価を可能である。今後は本手法を用いて、より効果的なAMの策定に資するため検討を行う。

日進月歩の計算機の能力向上により、従来では不可能であったような多数回のモンテカルロシミュレーションや、タイムメッシュを細かく取った際に生じる膨大な数のシーケンスの評価が現実的な時間内に実行可能となったが、それでもまだ実機プラントの炉心損傷シーケンスを全て評価するには、多大の計算時間を要する。また計算終了後に特定シーケンスの計算途中経過を追跡してチェックするためには、全てのシーケンスの途中経過を保存する必要があり、ワークステーションといえどもハードディスクやメモリの容量が不足したり、データのI/Oに計算の数倍の時間を費やしたりしてしまう。したがって今後は計算ルーチンの改良などにより、これらの問題を解決し、本手法をLiving PSAプログラムに組み込んで運用していく予定である。

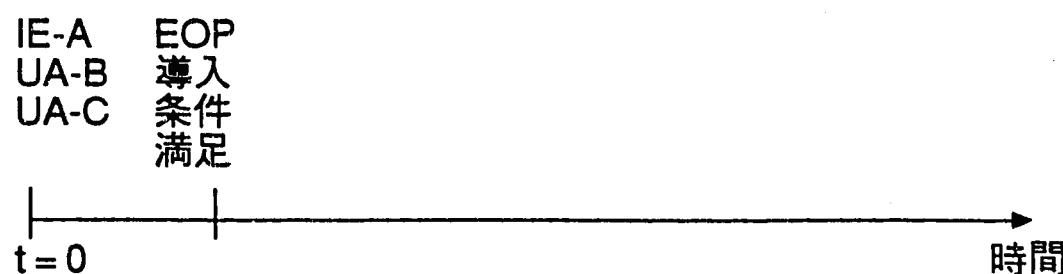
## 7. 謝辞

本研究の実施にあたっては、リスク評価技術開発室の研究員各位からは適切なコメントを頂きました。株式会社CRCの田村一雄氏には本手法のプログラム化を、また、株式会社CSKの長久保宜克氏には各種解析作業を支援して頂きました。以上の方々に感謝致します。

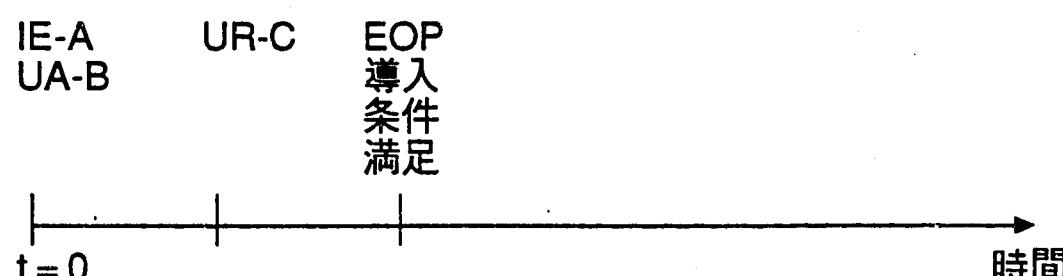
## 8. 参考文献

- 1) PNC ZN9410 91-381 高速増殖炉のレベル1PSA
- 2) Swain, A. D. and Guttman, H. E., "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications," NUREG/CR-1278, August 1983.
- 3) Wreathall, J. W., "Operator Action Trees (OAT), An Approach to Quantifying Operator Error Probability During Accident Sequences," NUS 4159, July, 1982.
- 4) Acosta, C. G. and Siu, N., "Dynamic Event Tree Analysis Method (DETAM) for Accident Sequence Analysis," NUREG/CR-5608, 1991.
- 5) Cacciabue, P. C. and Amendola, A., "Dynamic Logical Analytical Methodology (DYLAM) versus fault tree: The case study for the auxiliary feedwater system of a nuclear power plant," Nuclear Technology, 74 (1986) 195-208.
- 6) Devooght, J. and Smidts, C., "Probabilistic reactor dynamics-I: The theory of continuous event trees (CET)," Nuclear Science and Engineering, 111 (1992) 229-240

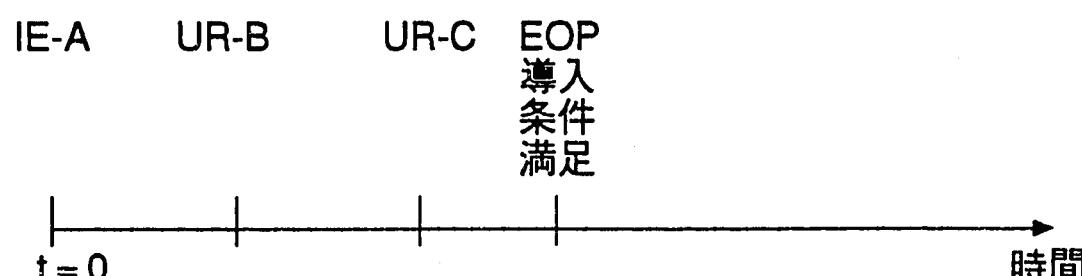
アンリライアビリティを含まないカットセット  
に対する事象推移



アンリライアビリティを1つ含むカットセット  
に対する事象推移

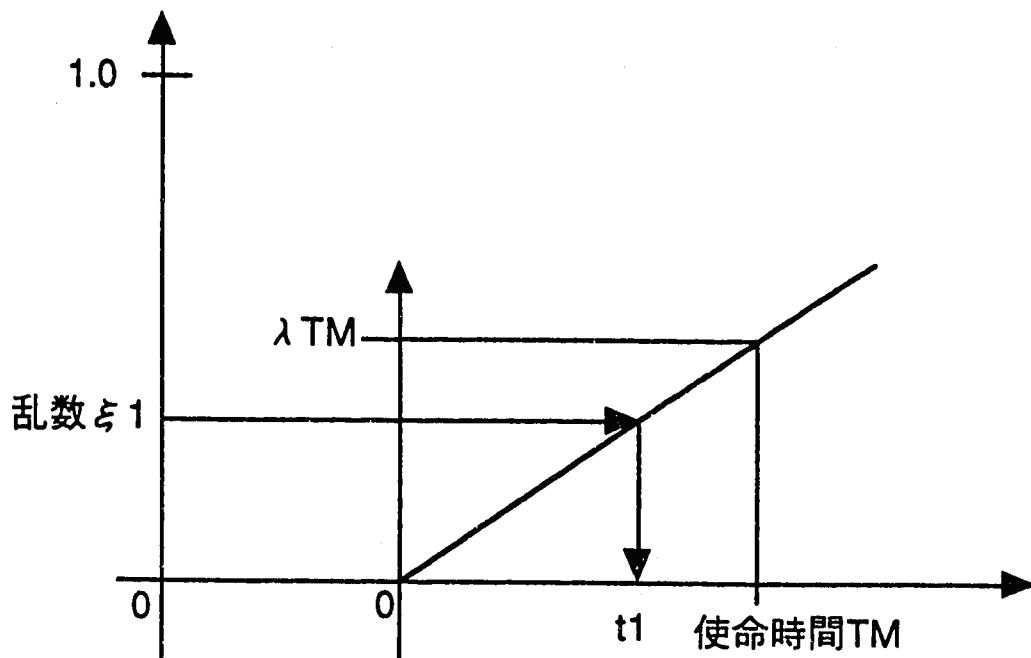


アンリライアビリティを2つ含むカットセット  
に対する事象推移



IE：起因事象、UA：アンアベイラビリティ、UR：アンリライアビリティ、EOP：緊急時運転手順

図-1 EOP導入条件が満たされるまでの事象推移



$\lambda$  : アンリライアビリティの単位時間当たりの発生確率

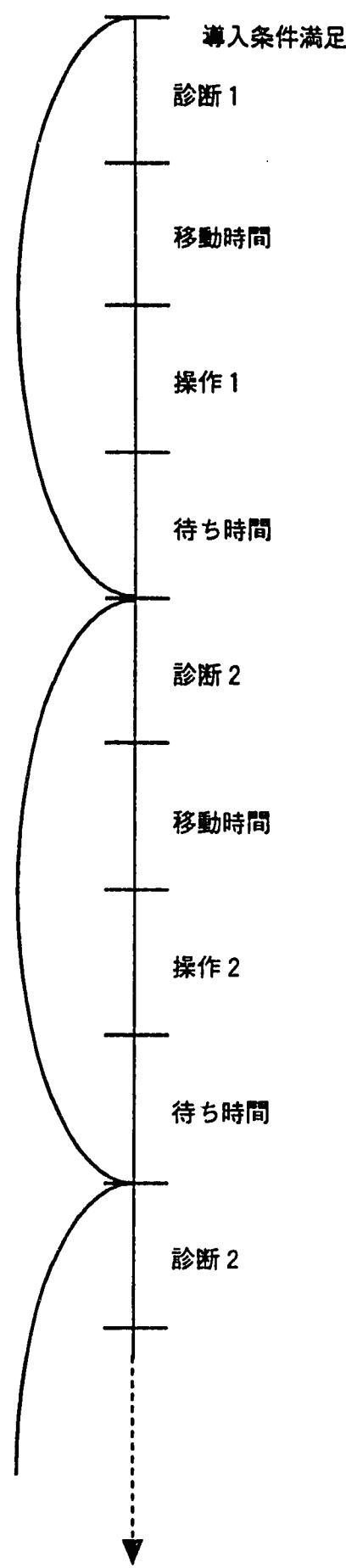
$$p_1 = \int_0^{t_1} f(t) dt = 1 - \exp(-\lambda t_1) \doteq \lambda t_1$$

$$p_1 = \xi_1 \text{ とおくことにより、} \xi_1 = \lambda t_1$$

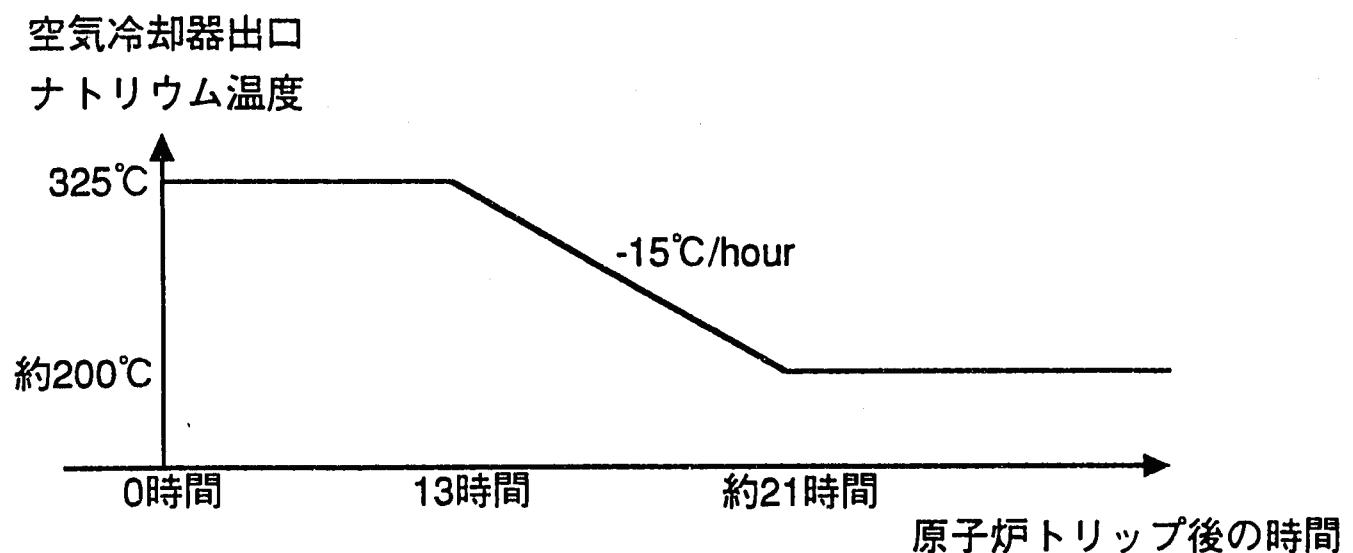
∴

$$t_1 = \xi_1 / \lambda$$

図-2 モンテカルロ法におけるアンリライアビリティの発生時刻決定方法



図一 3 EOP導入条件が満たされた後の事象推移図



原子炉トリップ後は、補助冷却設備空気冷却器入口ベーン、出  
口ダンバの開度を調節して、空気冷却器出口ナトリウム温度  
を、初めの13時間は325°C一定に保ち、その後約200°Cまで15°C  
／時間で降温するように制御する。この間1次主冷却系流量は  
定格の10%、2次主冷却系流量は7%で一定に保たれる。

図一4 原子炉トリップ後の冷却材温度制御

ET001

診断1	操作1	診断2	操作2	診断3	操作3
-----	-----	-----	-----	-----	-----

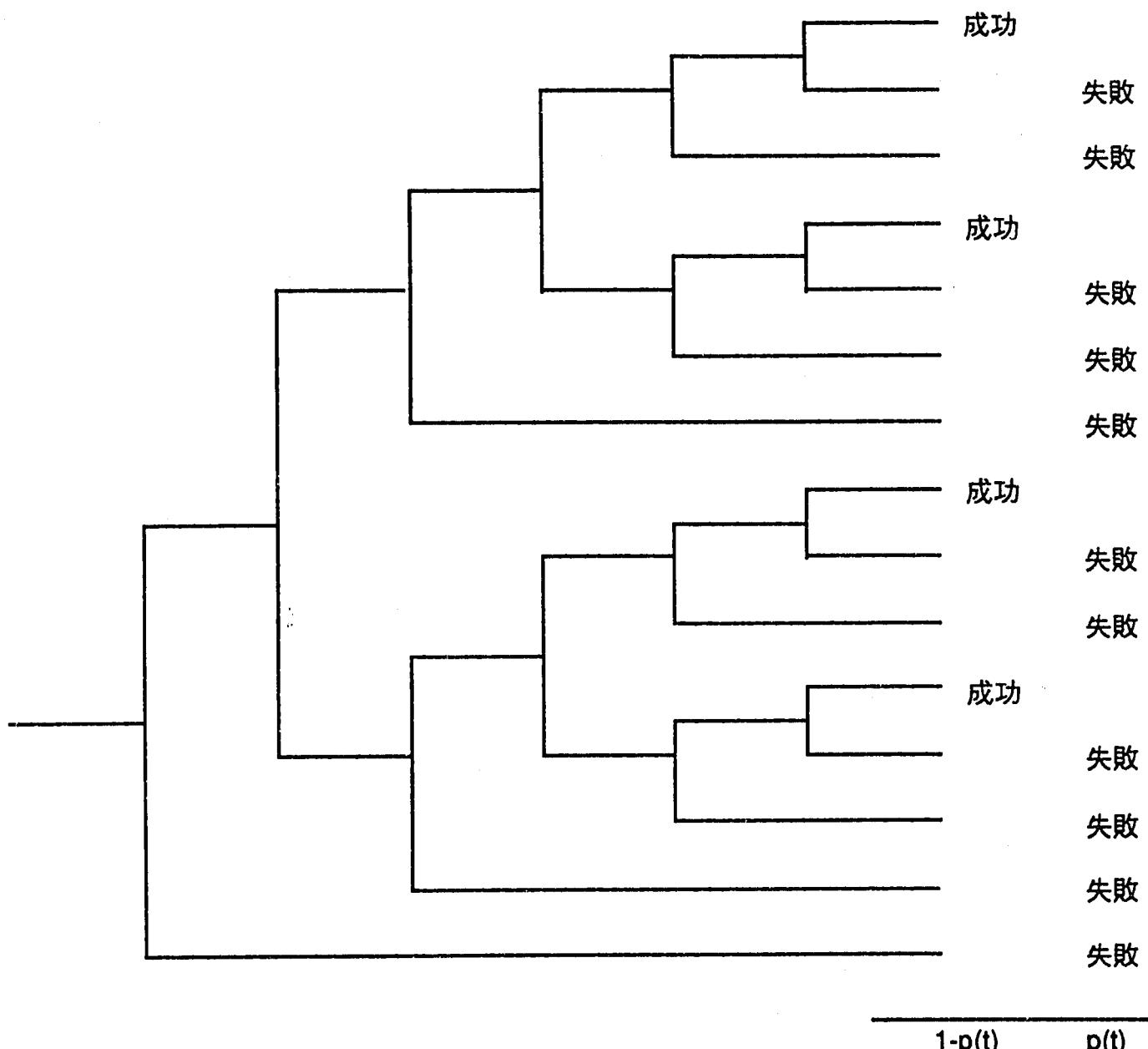


図-5 操作1と2が無効、操作3が有効なカットセットに対するイベントツリー

ET011

診断1	操作1	診断2	操作2	診断3	操作3
-----	-----	-----	-----	-----	-----

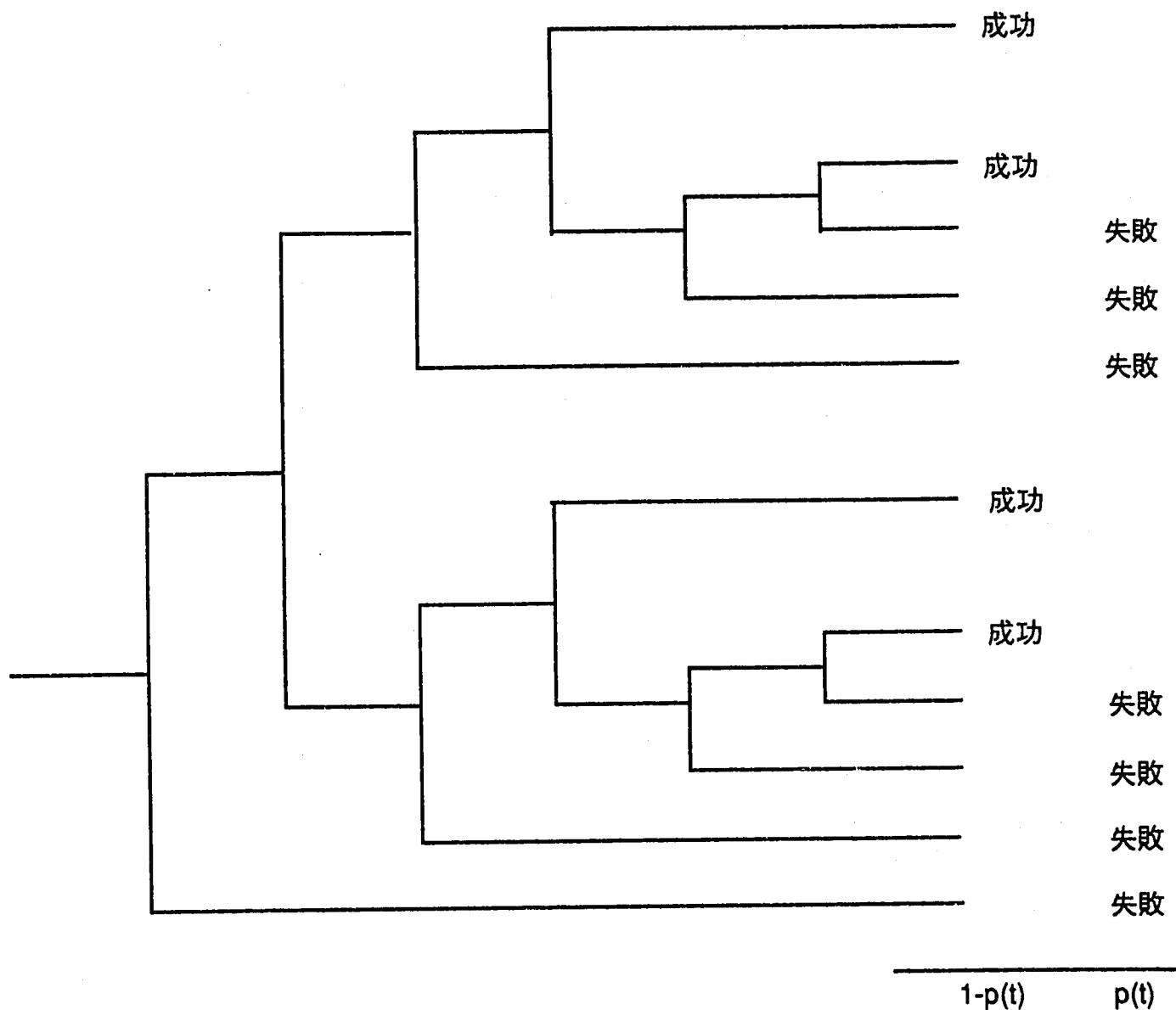
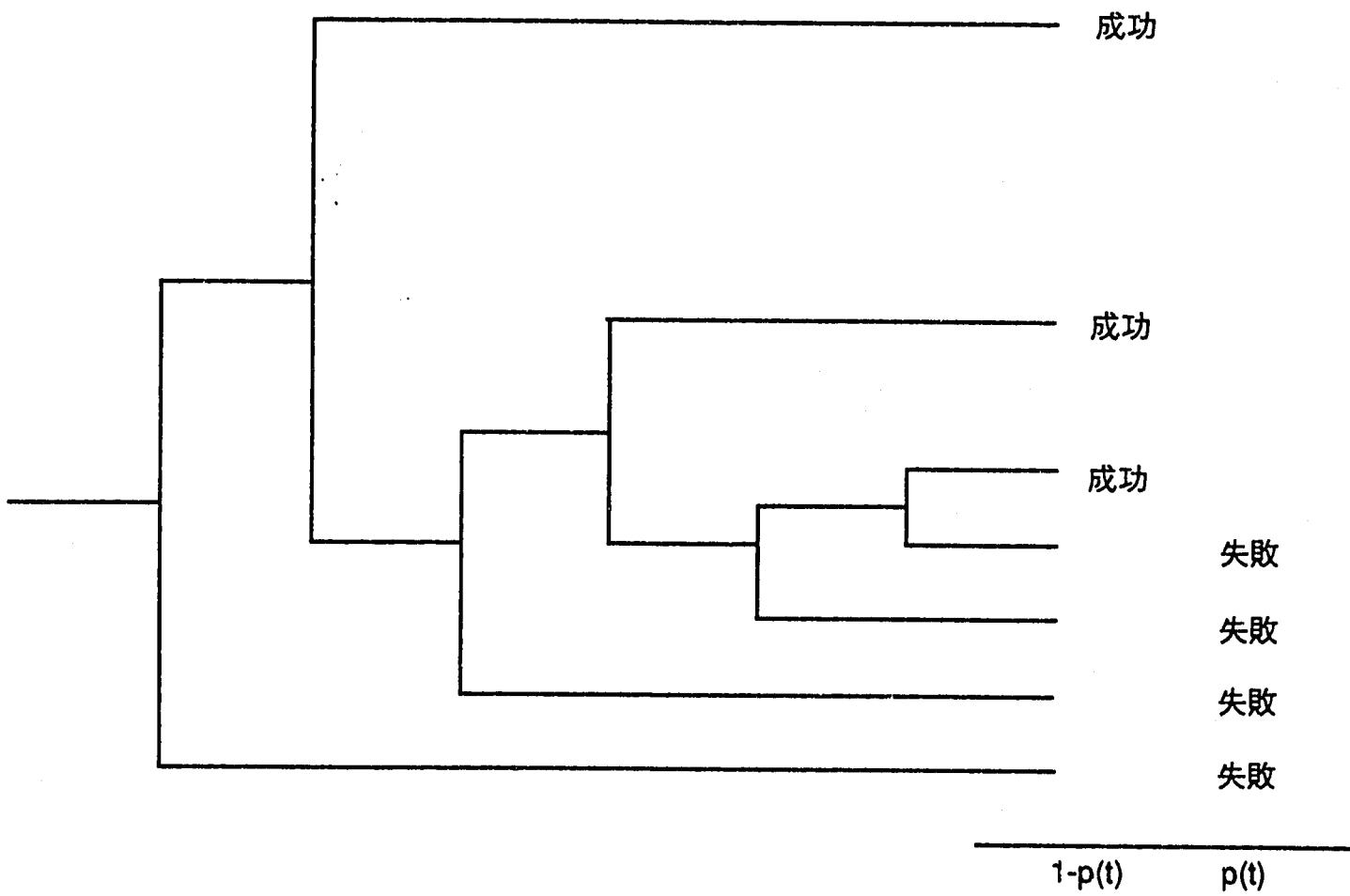


図-6 操作1が無効、操作2と3が有効なカットセットに対するイベントツリー

ET111

診断1	操作1	診断2	操作2	診断3	操作3
-----	-----	-----	-----	-----	-----



図一七 操作1、2、3が全て有効なカットセットに対するイベントツリー

## 診断失敗確率

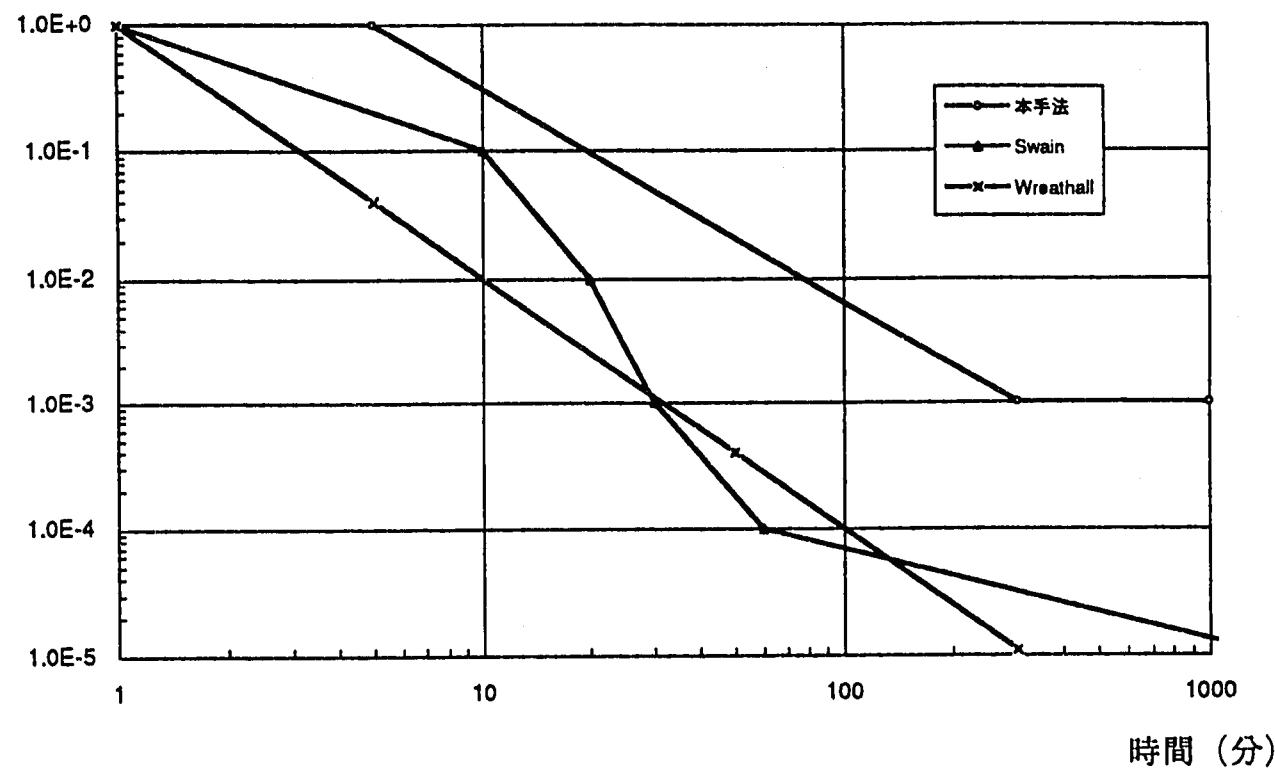


図-8 診断失敗確率と時間の関係

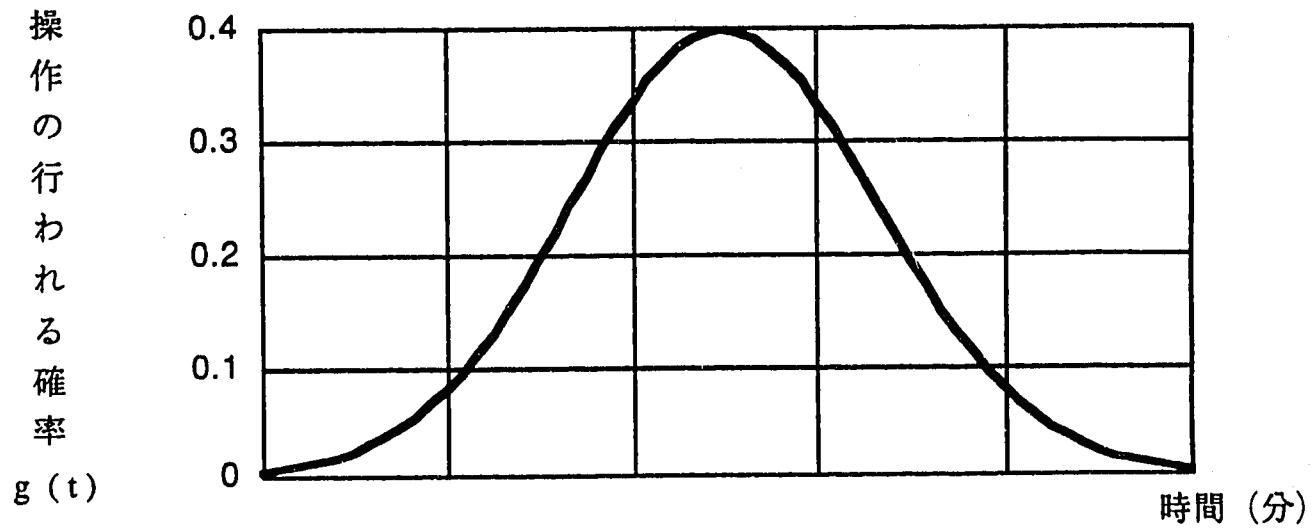


図-9 操作の行われる時刻の分布

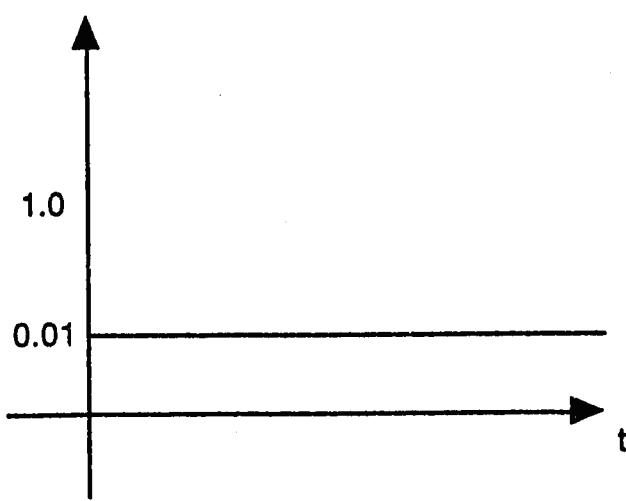


図-10 操作失敗確率

ミニマル カットセッ トが使命時 間に	1回目の操作 を行ったと きに炉心損 傷条件が	1回目の操作 が	2回目の操作 を行ったと きに炉心損 傷条件が	2回目の操作 が	3回目の操作 を行ったと きに炉心損 傷条件が	3回目の操作 が
------------------------------	----------------------------------	-------------	----------------------------------	-------------	----------------------------------	-------------

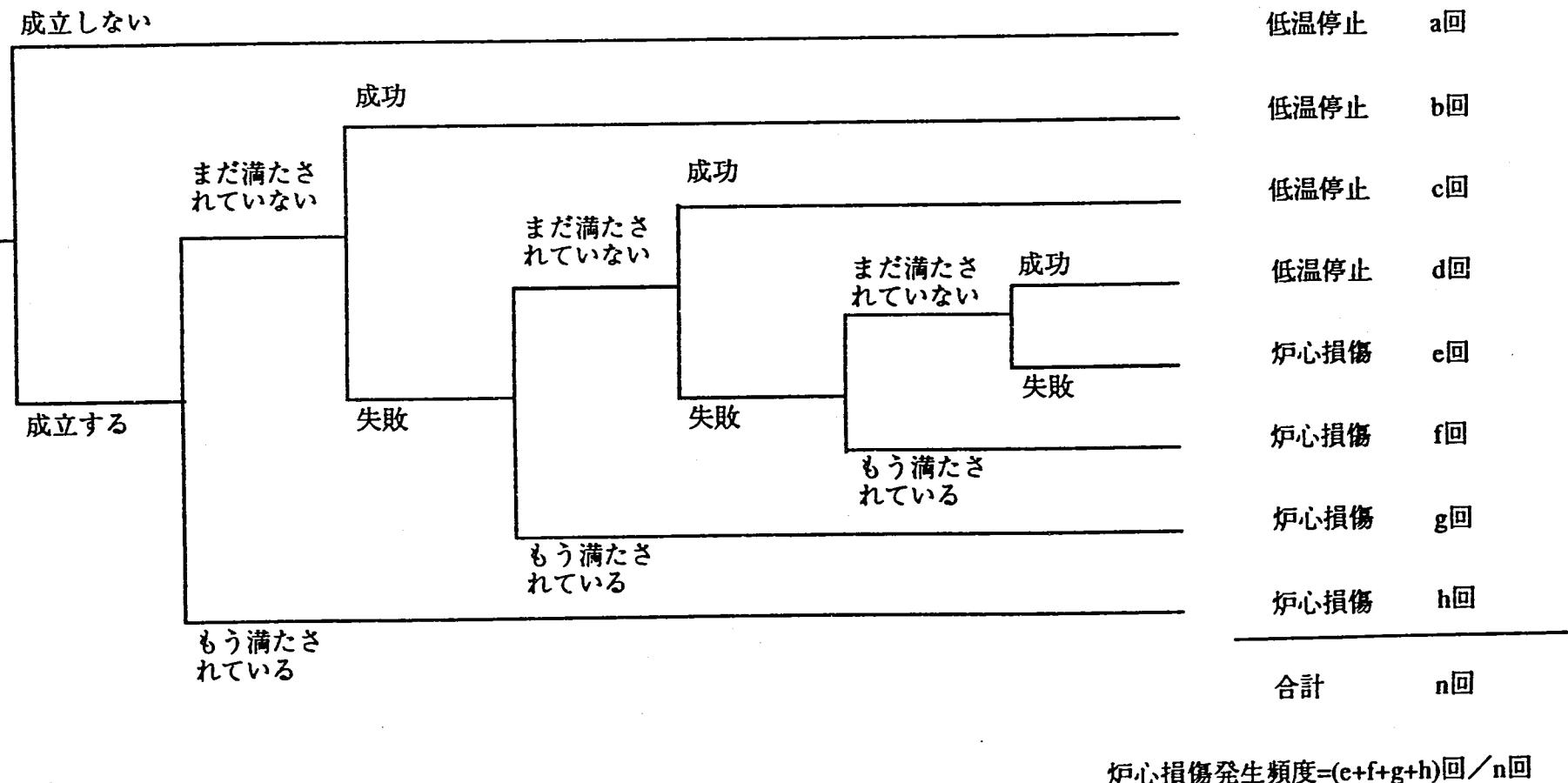


図-11 モンテカルロ法における事象推移図

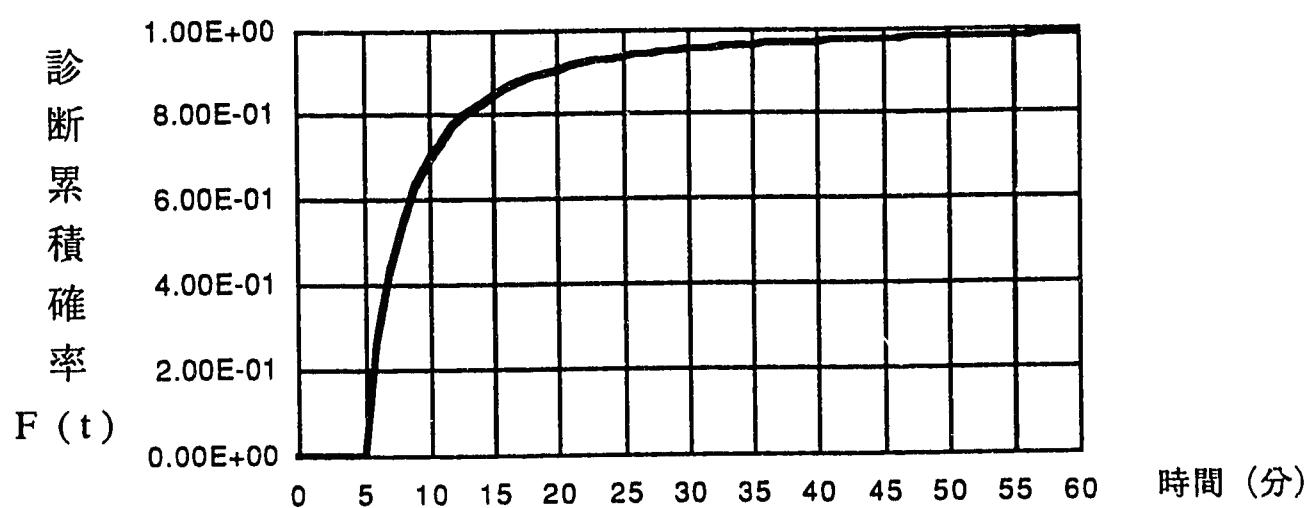


図-12 正しい診断が下される累積確率と時間の関係

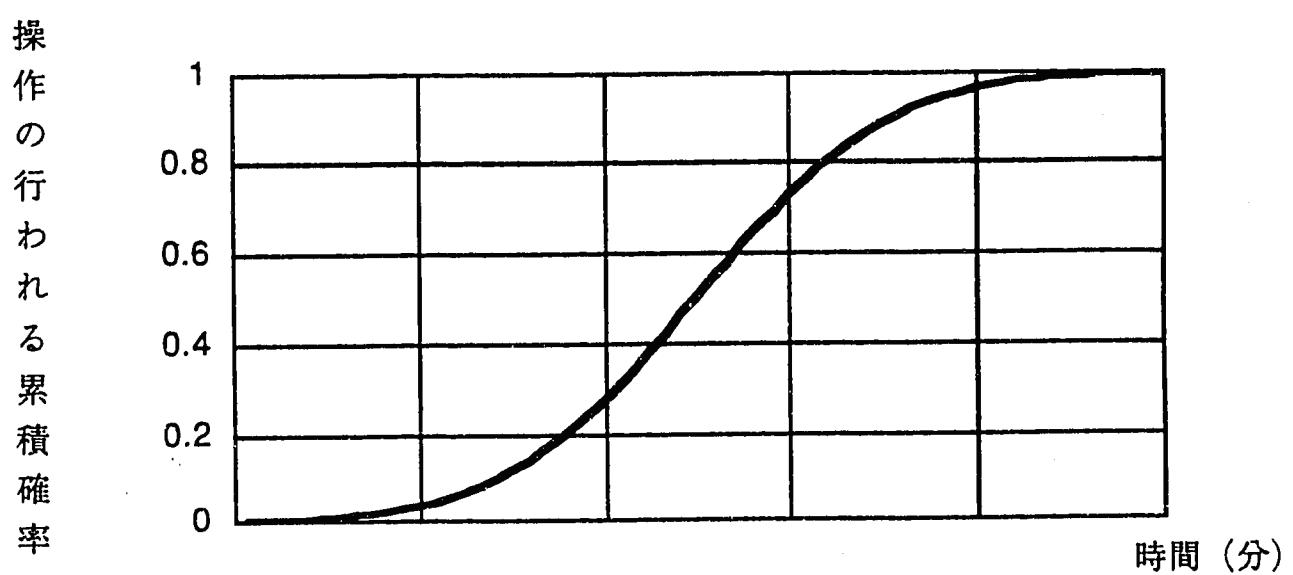


図-13 操作の行われる累積確率と時間の分布

PSF

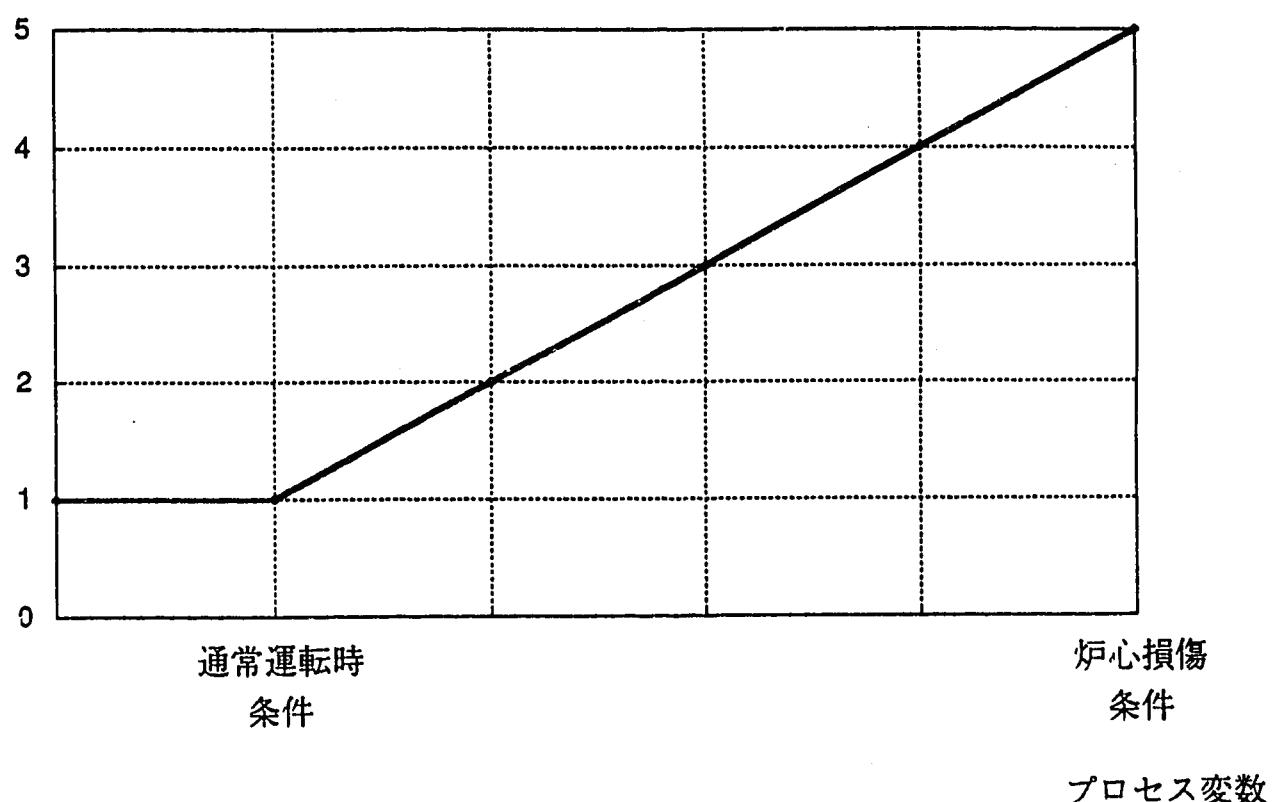


図-14 プロセス変数と PSF の関係

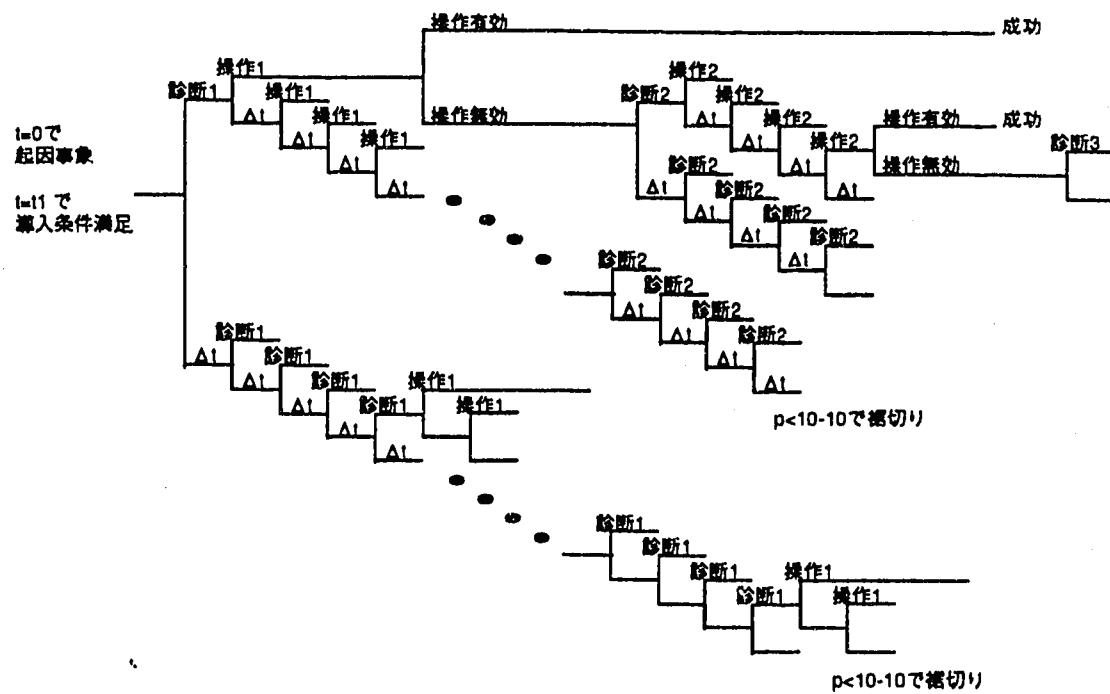


図-15 タイムメッシュ法によるシーケンスの模擬

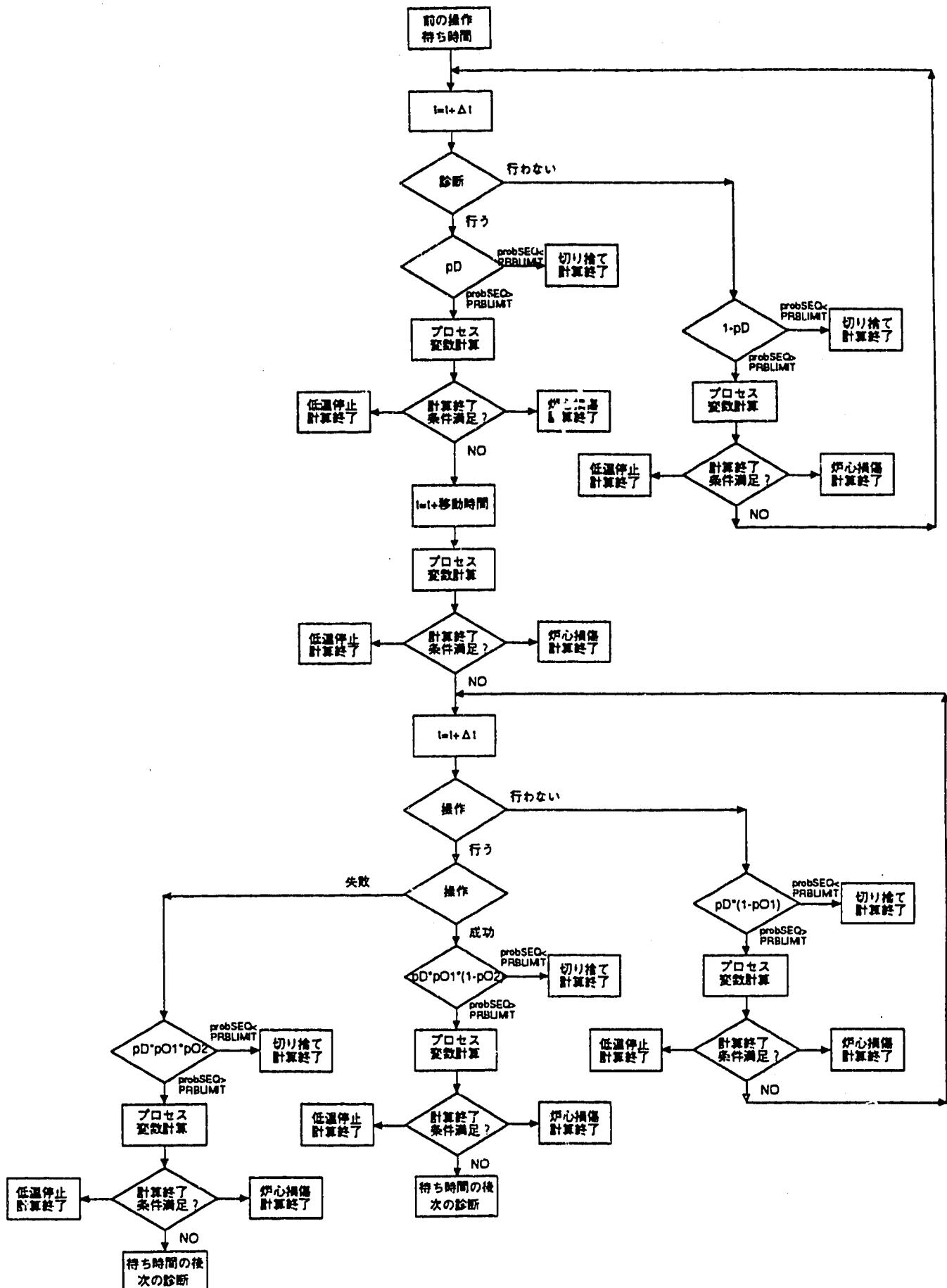


図-16 タイムメッシュ法における計算フロー図  
(診断・操作部分の詳細)

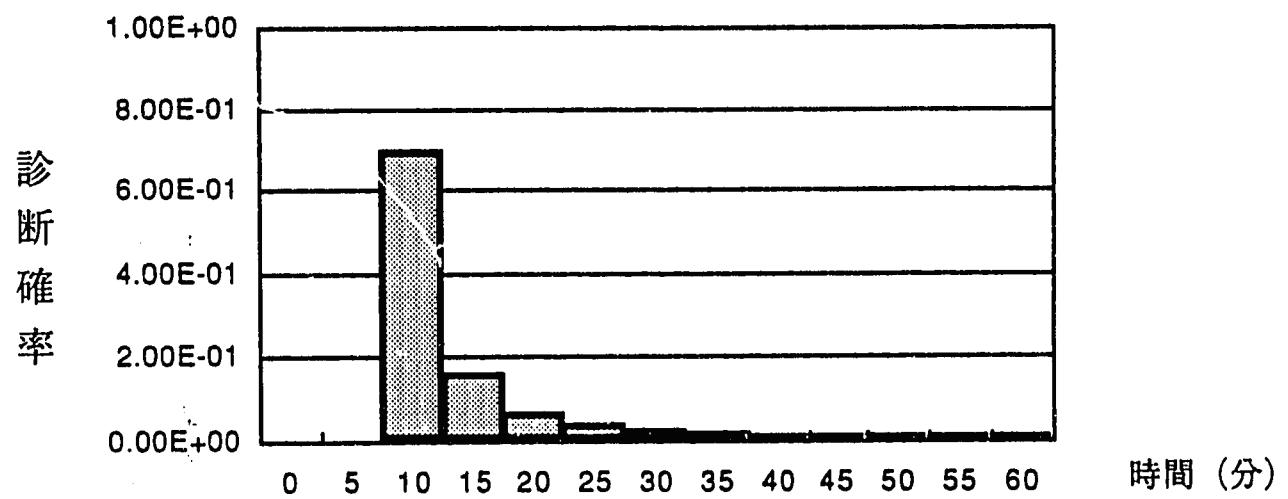


図-17 各タイムメッシュ毎に正しい診断が下される確率

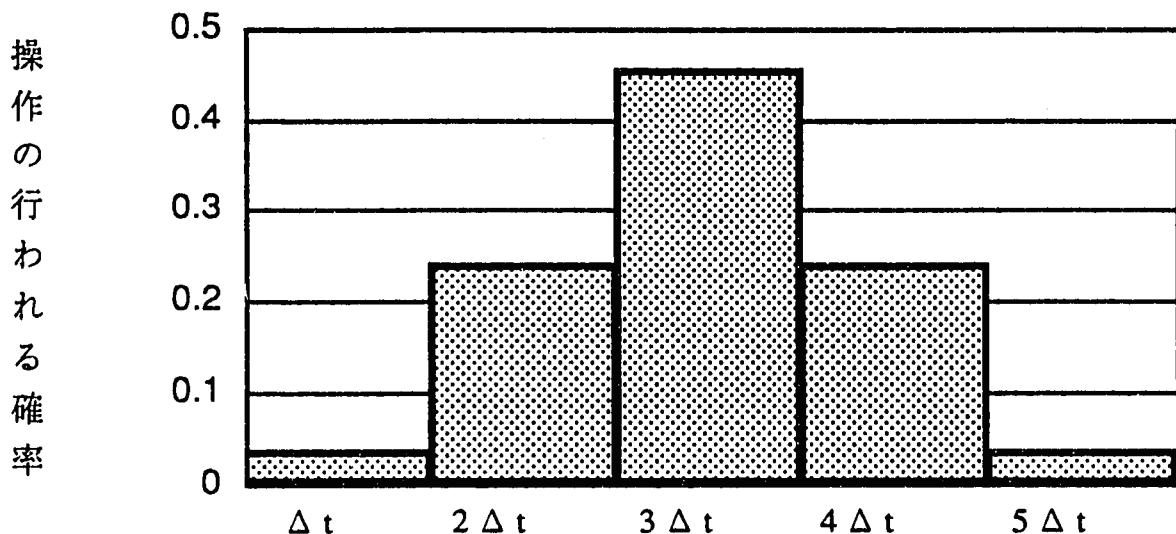


図-18 各タイムメッシュ毎に操作の行われる確率

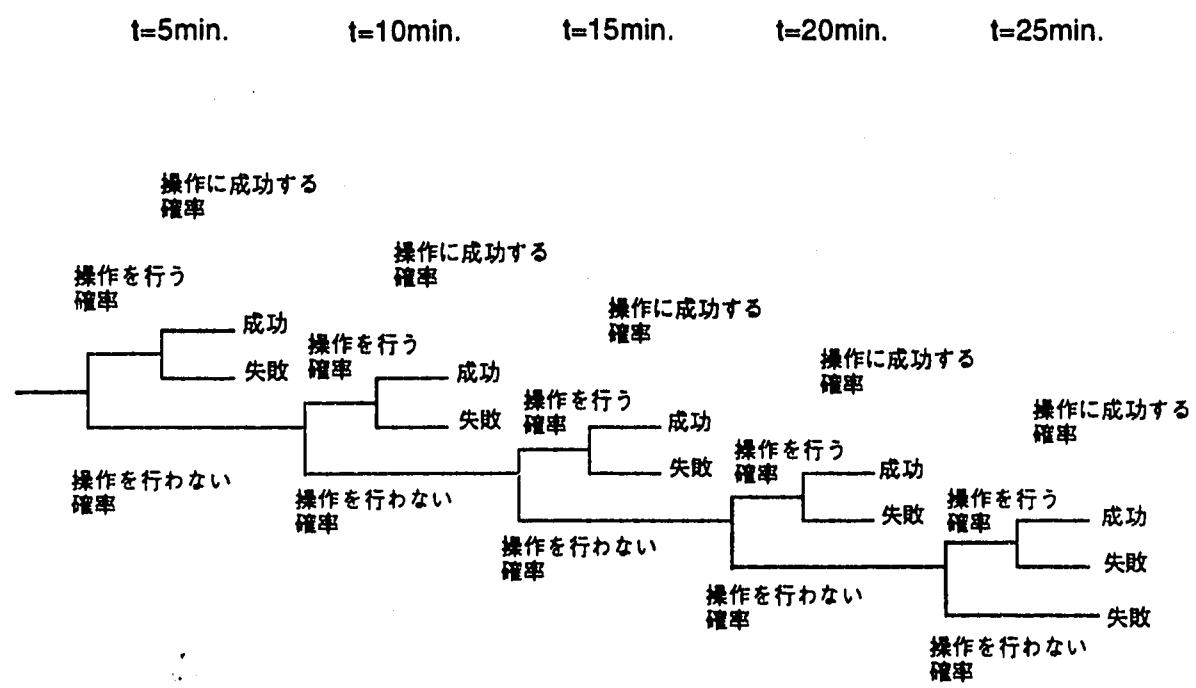


図-19 タイムメッシュ法における操作失敗確率の計算方法

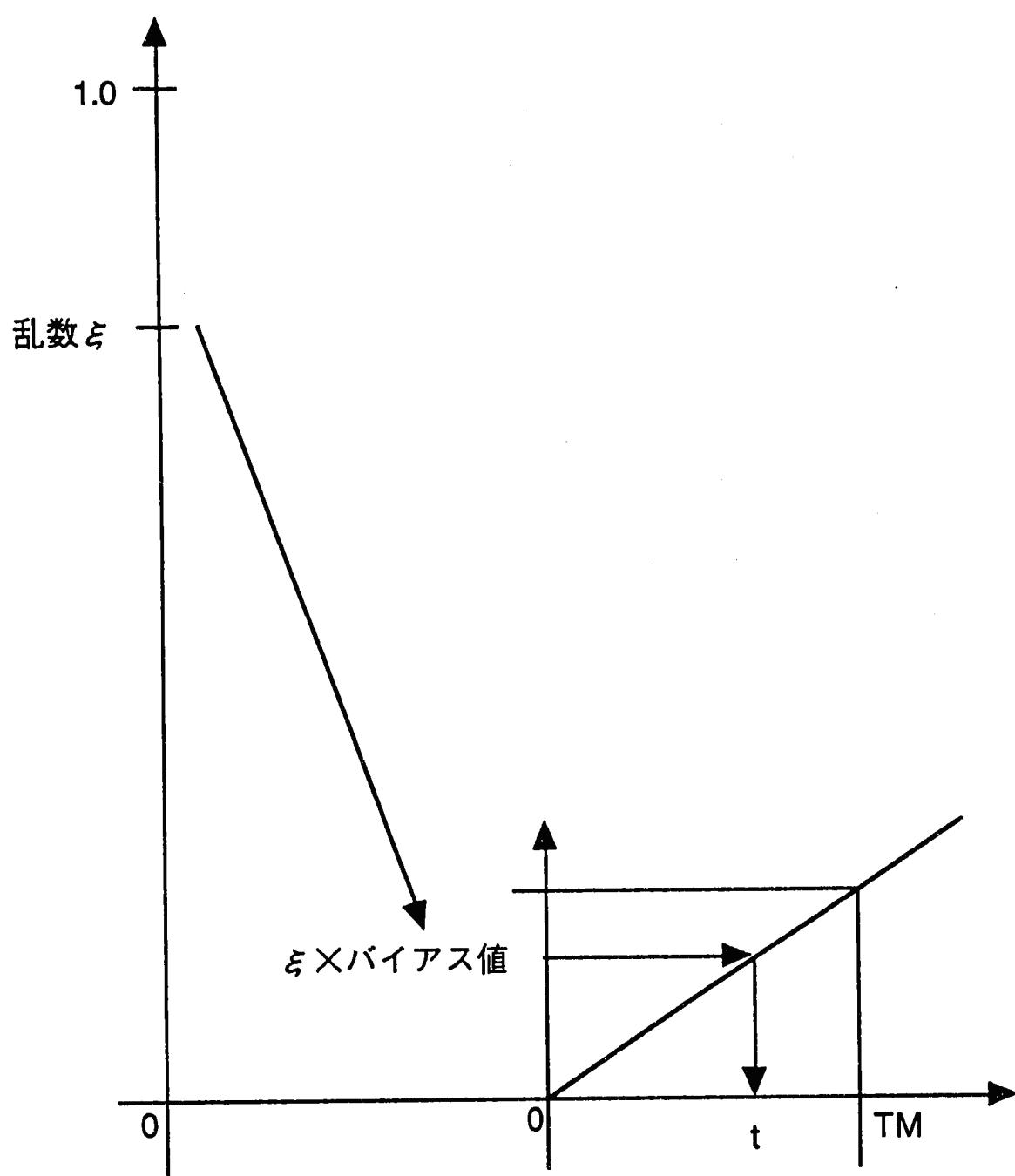


図-20 バイアス法によるURの発生時刻の決定方法

## 開始

計算条件設定データを読み込む。

- ・コメント(タイトル) →COMMENT
- ・起因事象番号 →IENO
- ・起因事象発生頻度(/year) →IEFREQ
- ・定量値データファイル名 →VALFNAM
- ・カットセットデータファイル名 →MCSFNAME
- ・アクションツリーデータファイル名 →ACTFNAME
- ・待ち時間(tW), 移動時間(tM)を含む
- ・打ち切り確率 →PRBLIMIT
- ・上限温度設定値 →TUPLIMIT
- ・下限温度設定値 →TDNLIMIT
- ・試行回数 →NTRY
- ・ $\Delta t$  (操作時刻決定方法が時間メッシュ法の時)
- ・イベントコードカテゴリー別集合データ(カテゴリ-A) →ECCFNA
- ・イベントコードカテゴリー別集合データ(カテゴリ-B) →ECCFNB
- ・イベントコードカテゴリー別集合データ(カテゴリ-C) →ECCFNC

←中制操作有効, 現場操作有効等の識別

VALFNAMで指定されたファイルからイベント定量値データを読む。

使命時間1時間で定量化した値

カットセットを1個づつ読み込みながら、

- 1)Dependent Failure Eventに関するEvent Codeの修正。
- 2)カットセットのイベントをUAとURに分類。
- 3) $p_{UA} = (\prod (UA\text{の値}))$
- 4) $X = p_{UA} \times (\prod (UR\text{の値})) \times IEFREQ$
- 5) $X < PRBLIMIT$ のとき、そのMCSを無視する。

UA:Unavailability

UR:Unreliability

MCSを( $p_{UA} \times \prod (UR\text{の値})$ )の値( $p_U$ とする)で降順に並べ替える

モンテカルロ法

処理 [AM]

カットセットのそれぞれに対し

操作時刻決定方法は

処理 [AT]

時間メッシュ法

結果を集計する。

終了

図 -21 動的解析プログラムの流れ(その1)

## [AM] モンテカルロ法

URの中から入の最大値を探し、その値(入)から(BV=23.0\*入)でバイアス値(BV)を定める。

nUR &gt; 0

各URについて

URの発生時刻を一様乱数からバイアス法により設定する。

発生時刻の最大値は23(hr)で、それ以上の発生時刻となったURがあれば、  
そのMCSは発生(成立)しないものとして扱う。

nCM = 0.0 (炉心損傷発生回数)

以下のCOPDデータを作成する。

- ・原子炉がトリップし、出力は崩壊熱曲線に従うものとする。
- ・IEとUAで除熱が期待できないループのA/C空気流量を自然放熱程度に絞り込む。
- ・IEとUAで除熱が期待できないループのNa流量は高低差、温度差より計算する。
- ・健全ループの主モーターは停止。流量はボニーモーター運転時の流量へ徐々に下げ、最終的に一定値にする。
- ・健全ループのA/Cの空気流量はA/C出口Na温度で調節する。  
(≤13時間→325°C前後, 12~22時間→15°C/hr, >22時間→200°C)
- ・IEが漏洩の場合は、Bループで漏洩発生とし、A,CループはFC成功とする。

注:A/C出口止め弁3個とも開失敗の場合は、本来A/CにNaの流量は無いのだが、  
簡略化のため空気流量を絞り込むことで模擬する。

nMCSoccur回だけ  
MCSが成立するもの  
だけ。

最後のURの発生時刻(ht)に一番近い時間のCOPDリストアファイルを選択してhtまでCOPDを実行する。このとき上記COPDデータは使わず、ループFCの状態でhtまで運転したものとする。この後、上記のCOPDデータで一定時間(30sec)実行する。

リストアファイルは600秒毎に23時間分用意されている。

nUR &gt; 0

上記のデータでCOPDを一定時間(30sec)実行する。

sim\_time=30.0

処理 [BM] を実行

炉心損傷発生頻度 = (nCM\*BV)/NTRY \* p\_U \* IEFREQ

RETURN

図 -21 動的解析プログラムの流れ(その2)

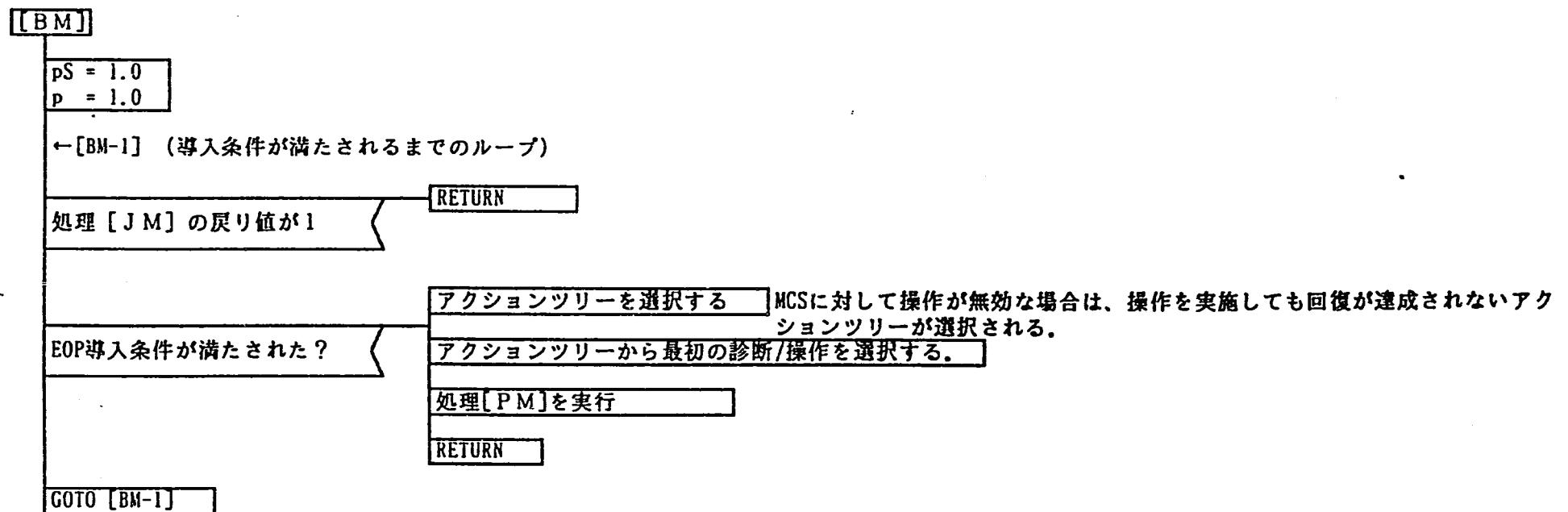
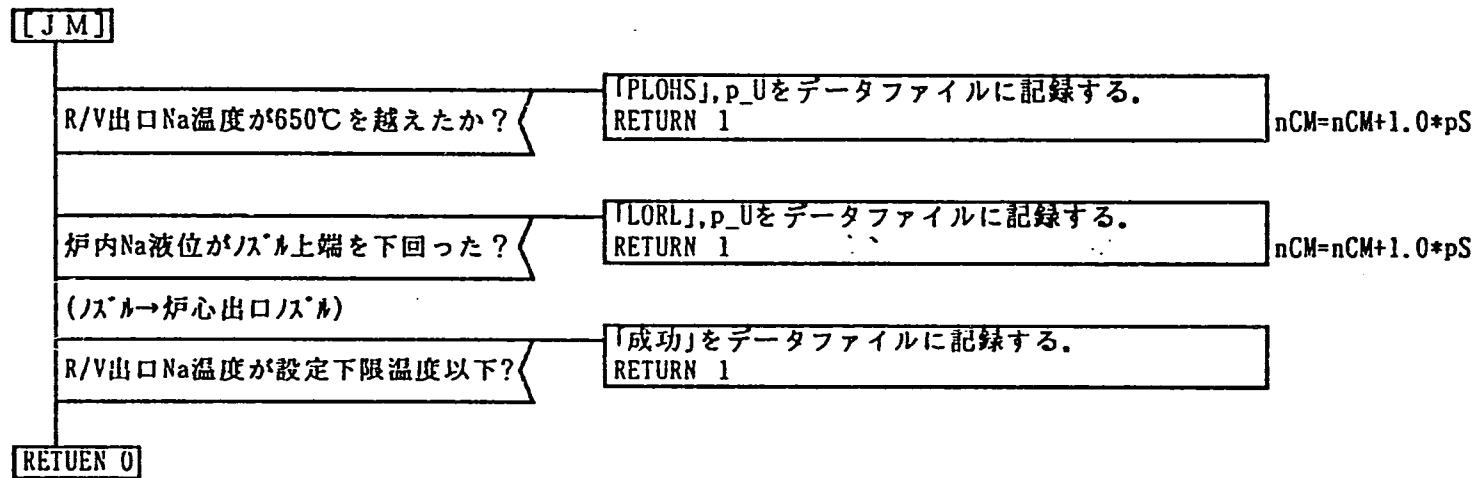


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その3)

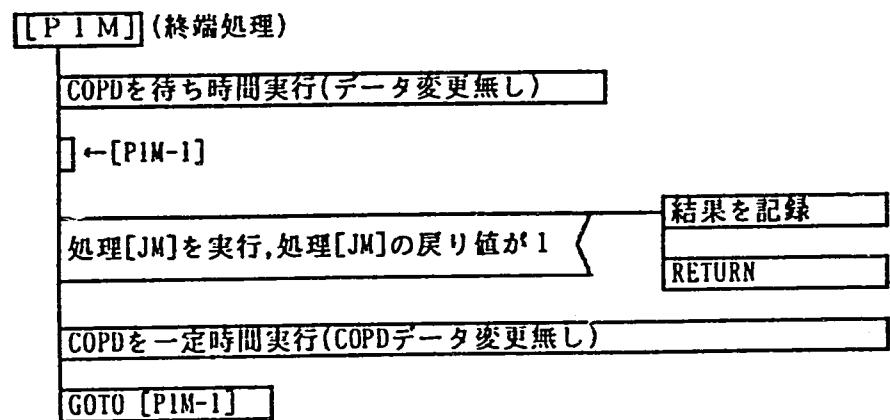
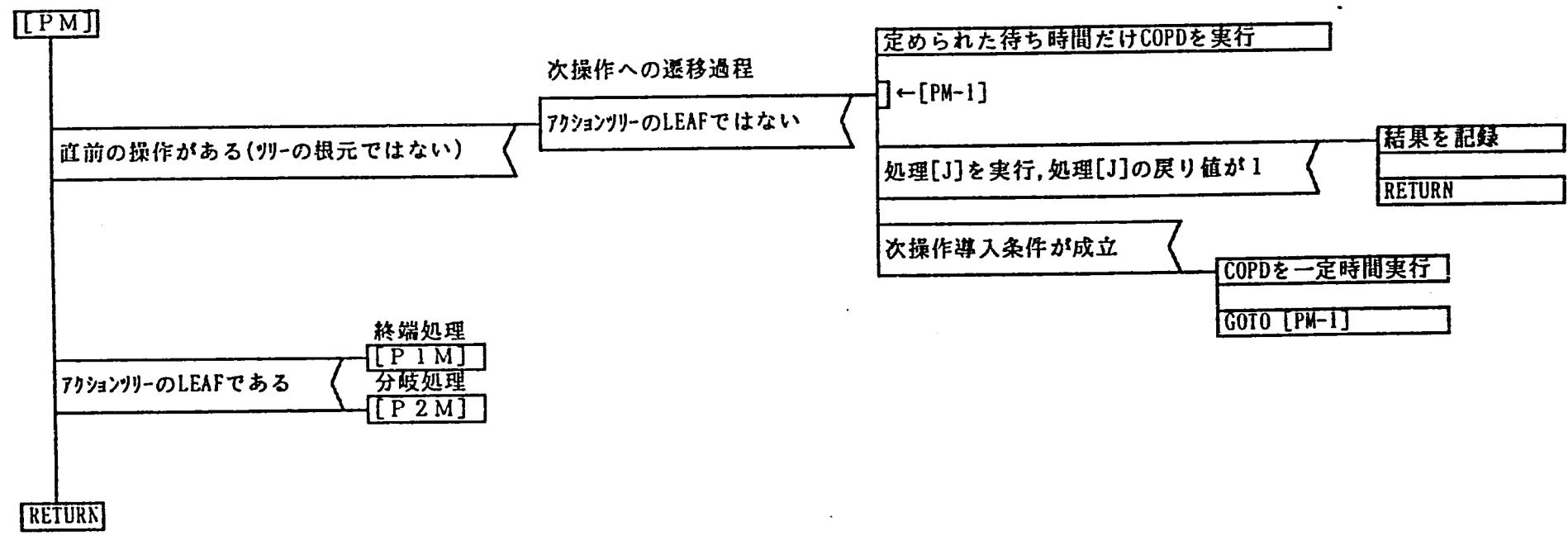


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その4)

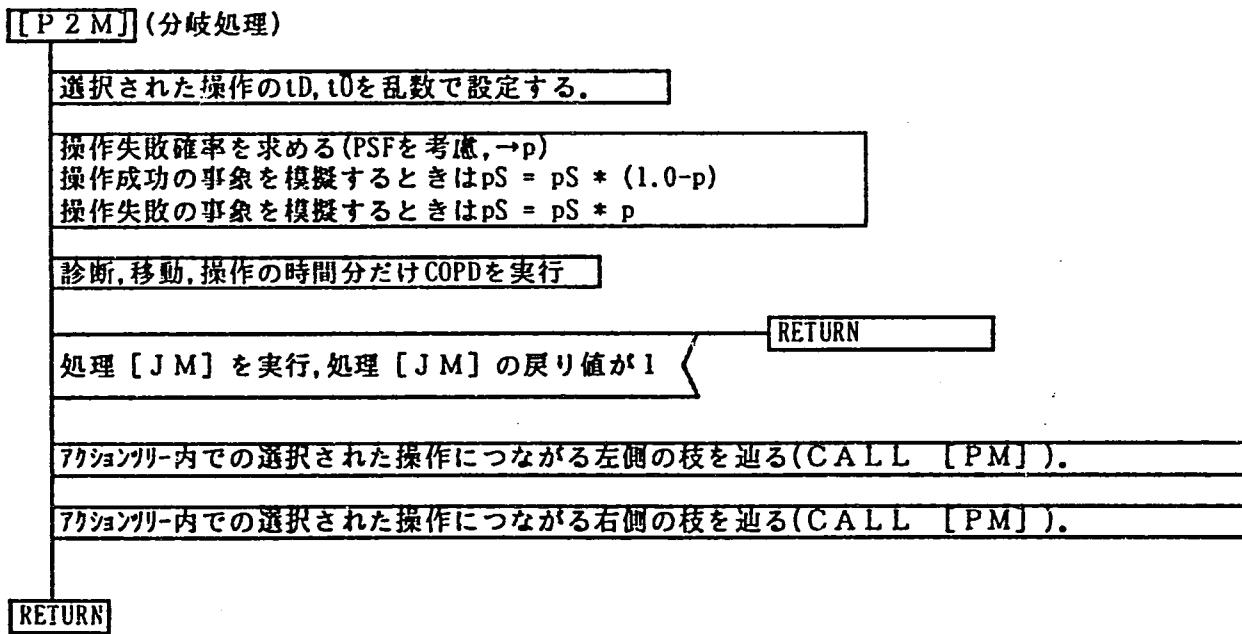


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その5)

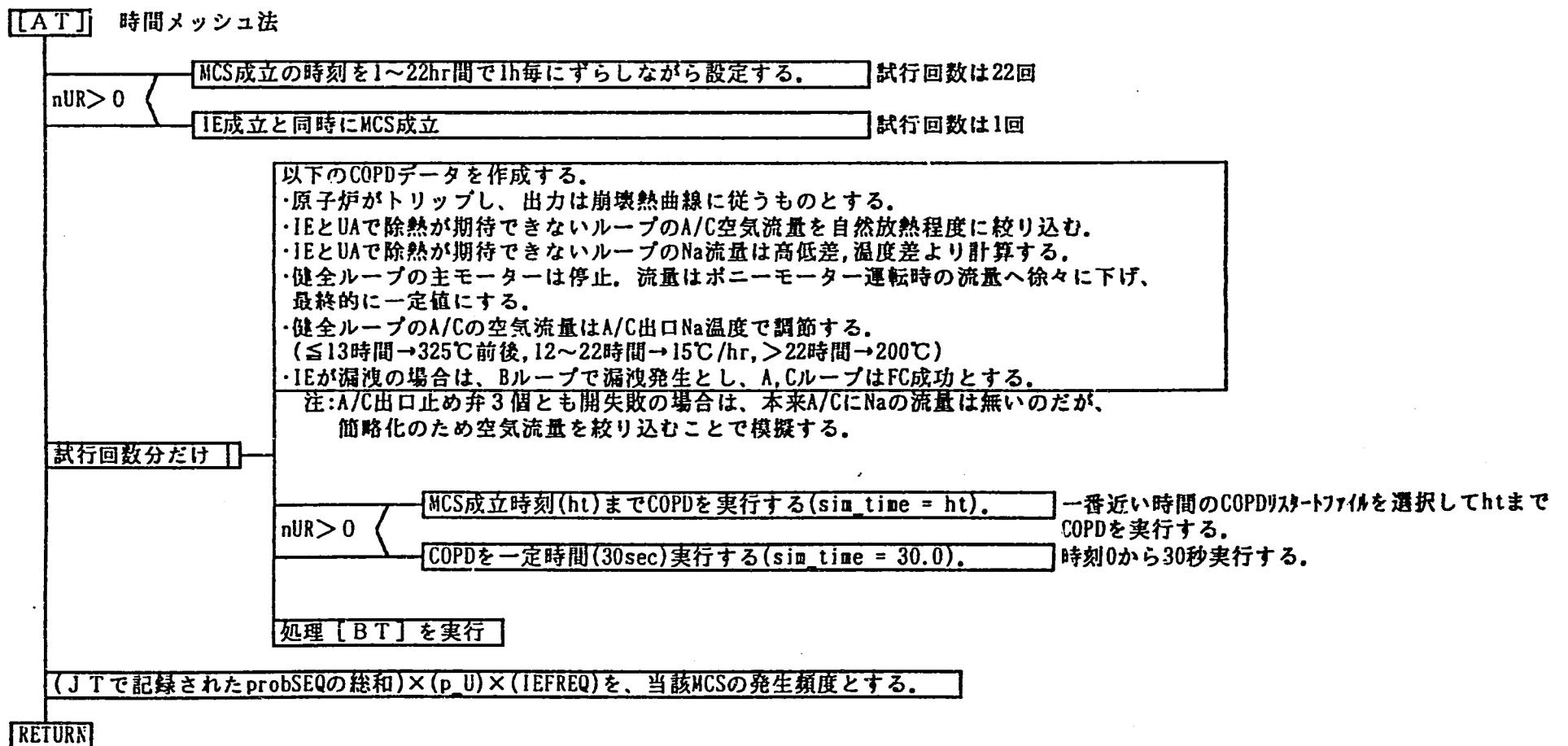


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その6)

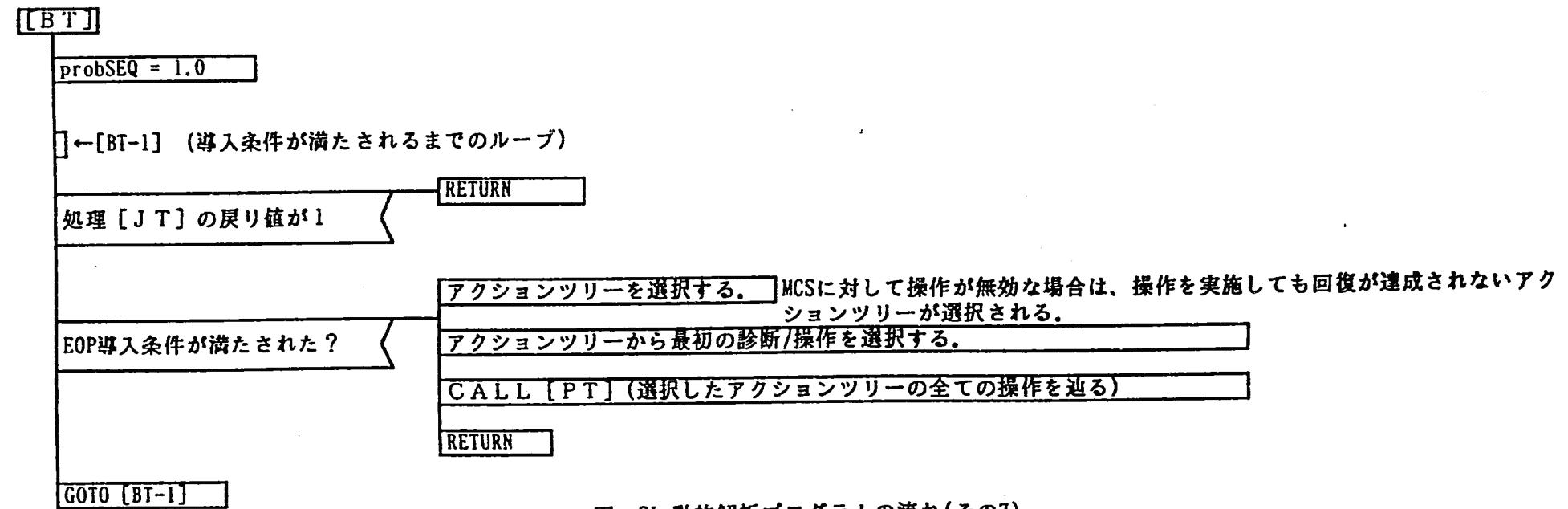
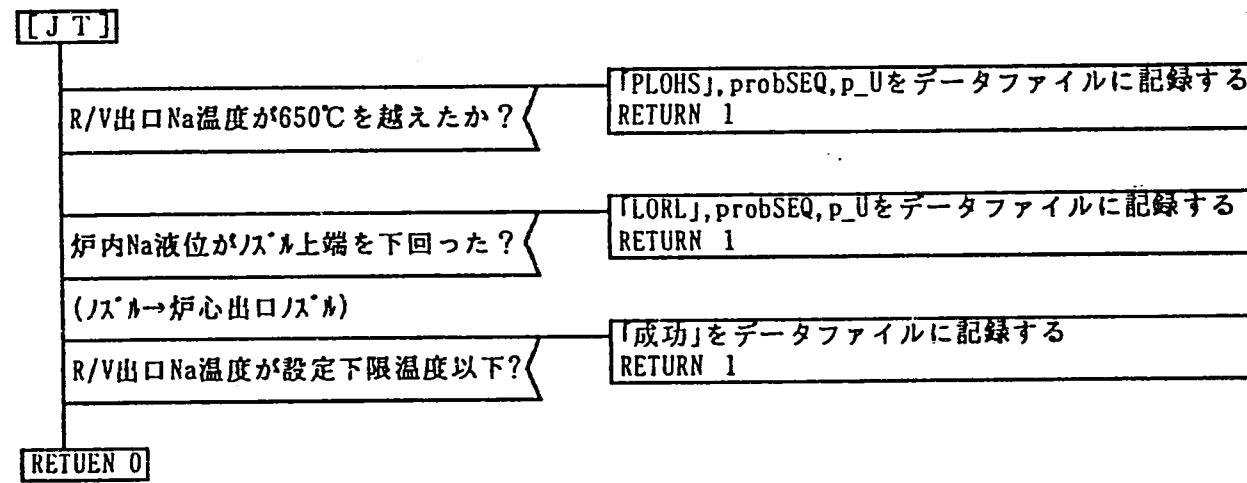


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その7)

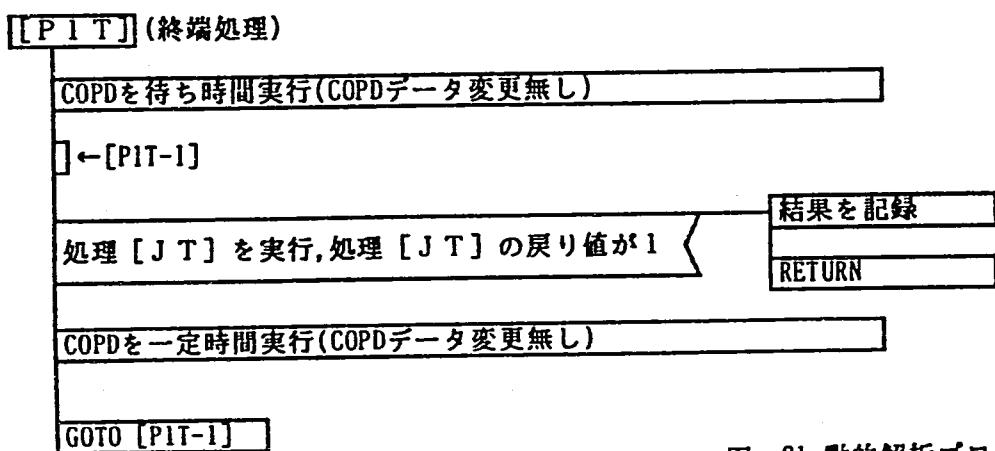
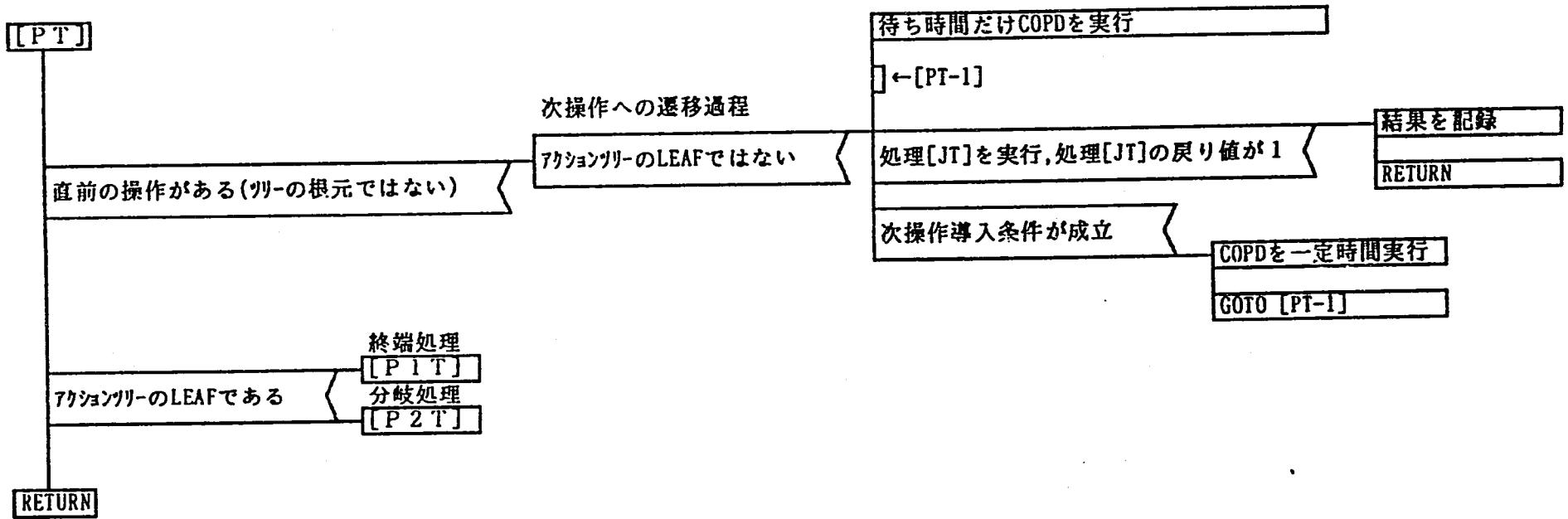


図-21 動的解析プログラムの流れ(その8)

[P2T] (分歧処理)

$tD = \Delta t \text{ to } \infty \text{ step } \Delta t$   
診断( $tD$ )の時刻を  $\Delta t$   
毎に変化させながら

$tU = \Delta t \text{ to } \infty \text{ step } \Delta t$   
操作( $tU$ )の時刻を  $\Delta t$   
毎に変化させながら

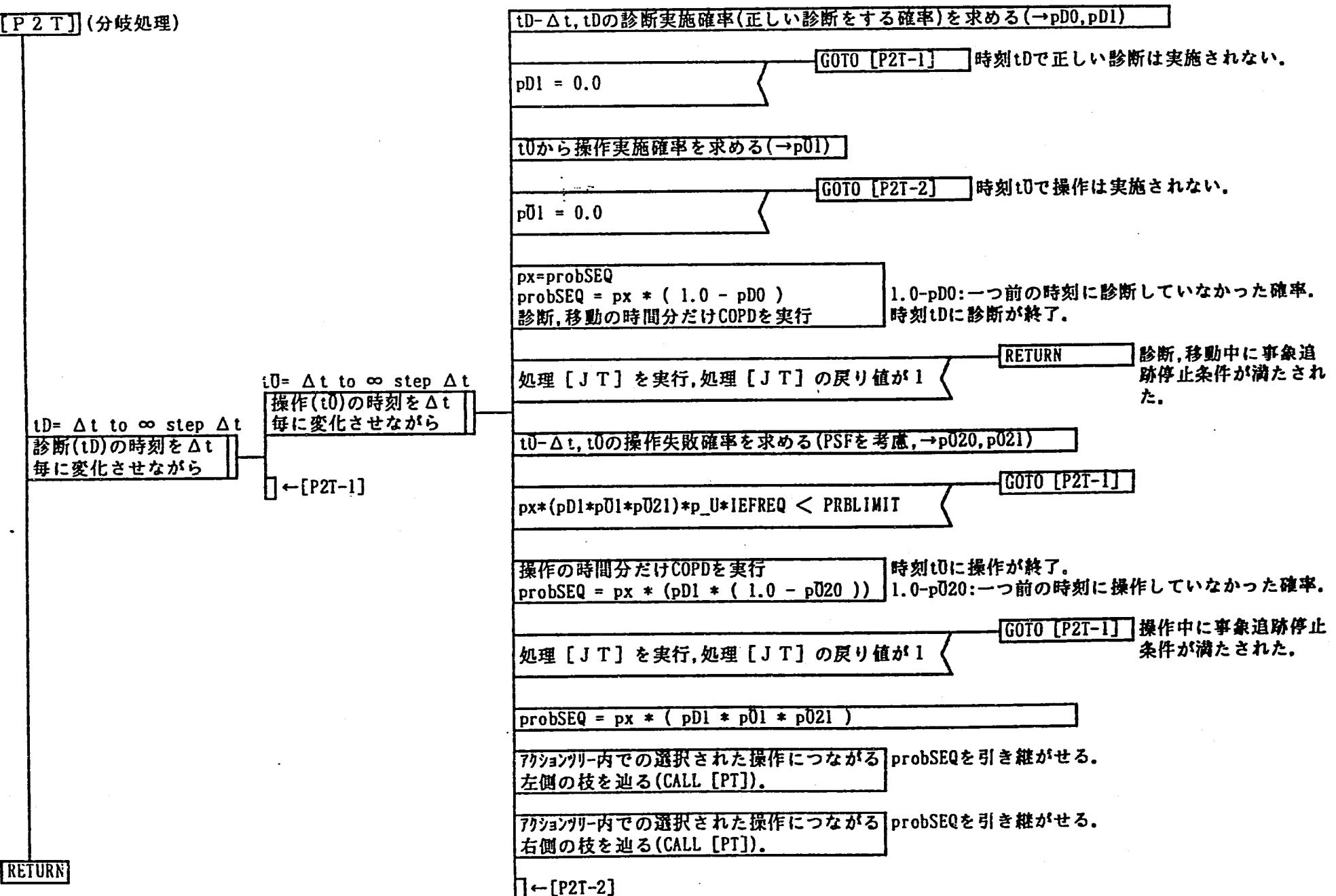


図 -21 動的解析プログラムの流れ(その9)

\*\*\*\*\*

### DYANA : 結果のまとめ

†, †, †, 従来の発生頻度(使命時間23時間), EOPを考慮した発生頻度, NRF  
 AAA01SW01AS33 AC101XT01AP34 9.900e-09 1.369e-11 1.383e-03  
 AA901SL01AF33 AC101XT01RP04 6.210e-12 2.122e-13 3.418e-02  
 CC901CH01AR63 ACH01PM01CR03 CA902PUP1RR03 1.058e-10 2.419e-13 2.287e-03

合計

EOP評価なし = 1.001e-08 EOP評価あり = 1.415e-11 NRF(あり/なし) = 1.413e-03

### EOP考慮なしの従来の発生頻度で並び換えた結果

1 : AAA01SW01AS33 AC101XT01AP34	9.90e-09	1.37e-11	1.38e-03
2 : CC901CH01AR63 ACH01PM01CR03 CA902PUP1RR03	1.06e-10	2.42e-13	2.29e-03
3 : AA901SL01AF33 AC101XT01RP04	6.21e-12	2.12e-13	3.42e-02

### EOPを考慮した発生頻度で並び換えた結果

1 : AAA01SW01AS33 AC101XT01AP34	9.90e-09	1.37e-11	1.38e-03
2 : CC901CH01AR63 ACH01PM01CR03 CA902PUP1RR03	1.06e-10	2.42e-13	2.29e-03
3 : AA901SL01AF33 AC101XT01RP04	6.21e-12	2.12e-13	3.42e-02

\*\*\*\*\*

SunOS cricsn97 5.4 Generic\_101945-10 sun4m sparc

\*\*\*\*\*

1995年 01時39分02秒 JST

図-22 解析結果例