

受動的安全設備を考慮したULOF起因過程初期  
シーケンス発生頻度評価手法の整備

( 研究報告 )

1998年12月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ  
してください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

受動的安全設備を考慮したULOF起因過程初期  
シーケンス発生頻度評価手法の整備  
(研究報告)

三原隆嗣\*、丹羽元\*

要旨

受動的安全機能を考慮した確率論的安全評価手法の確立を目的として、電気出力60万kWe、炉心周辺部に1層分のガス膨張機構（GEM）集合体、後備炉停止系にキュリー一点方式自己作動型炉停止系（SASS）を設置した高速炉プラントに対するULOF事象初期段階のイベントツリーを事象推移の解析結果を基に構築した。GEMのみで事象静定に至らない場合であっても、ポニーモータの起動に成功すれば事象推移は緩慢となり炉心冷却材の沸騰開始までに時間的余裕が生ずることから、原子炉手動トリップ操作による事象静定のパスを考慮してイベントツリーを展開した。

作成したイベントツリー（E/T）と、モデルプラントを参考に作成したフォールトツリー（F/T）モデル（炉停止機能、ポニーモータ）を組み合わせることにより、冷却材沸騰に至る条件付きシーケンス発生確率の予備的な評価までを実施した。これにより、評価は予備的ではあるものの、GEMとSASSの併用により、ULOF発生時であっても冷却材沸騰に至るシーケンスの割合を $10^{-3}$ のオーダーにまで低減できるとの見通しを得た。

本研究により、受動的安全機能を考慮した確率論的安全評価のためのE/T、F/T等のシステム解析モデルの整備を図ることができた。

---

\*システム技術開発部 リスク評価技術開発Gr

## A methodology study on event-tree analysis for ULOF sequences considering passive safety features

Takatsugu Mihara\*, Hajime Niwa\*

### Abstract

In order to establish a method of probabilistic safety analysis for passive safety features, the event-tree (E/T) of ULOF accident sequences in the early stage of accident progression was constructed for an 600 MWe LMFBR model plant equipped with passive safety features such as Self Actuated Shutdown System (SASS) and Gas Expansion Modules (GEM). The development of this E/T was based on the results of some ULOF accident sequence analyses considering the effect of GEM. Even if the negative reactivity introduced by the GEM could not be enough to terminate the accident progression completely, there is some possibility to make the accident progression slower and to terminate the accident by manual reactor scram procedures with successfully starting of the pony motors in primary coolant loops. This accident mitigation pass was introduced into the E/T.

Using this E/T and some fault tree (F/T) models related to the reactor shutdown function and the pony motor, the accident sequences were quantified and the conditional probability of coolant boiling when ULOF accidents occur was evaluated. Though the evaluation was in a preliminary stage, the conditional probability of coolant boiling when ULOF accidents occur was evaluated in the order of  $10^{-3}$  due to the effect of the passive safety features such as GEM and SASS.

Through the preliminary evaluation, system analysis models such as E/T and F/Ts for ULOF sequence with considering the effect of passive safety features were developed.

---

\*Nuclear system safety research group, System Engineering Technology Division

## 目次

1. はじめに	1
1. 1 本研究の背景・目的	1
1. 2 ULOF事象とGEM、SASS	1
2. ULOF起因過程初期のイベントツリー	5
3. 冷却材沸騰シーケンスの発生頻度の予備的評価	8
3. 1 原子炉停止系のシステムモデルと事故シーケンスカットセット	8
3. 1. 1 原子炉停止系の構成	8
3. 1. 2 事故シーケンスカットセットとULOFシーケンス発生頻度の評価	8
3. 2. シーケンス分岐確率の評価	10
3. 2. 1 GEMの反応度の不確かさとシーケンス分岐確率	14
3. 2. 2 ポニーモータ起動	14
3. 2. 3 原子炉手動トリップ操作による炉停止	17
3. 2. 4 SASSによる炉停止	19
3. 3 評価結果	26
4. まとめ	28
5. 参考文献	29

## 表リスト

表3.1	起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ	11
表3.2	起因事象と期待できる原子炉トリップ信号	12
表3.3	制御棒挿入失敗確率	12
表3.4	起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ (全ての事象シーケンスにて手動トリップが考慮できるとした場合)	20
表3.5	起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ (SASSを考慮した場合)	23
表3.6	起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ (全ての事象シーケンスにてSASSと手動トリップが考慮できるとした場合)	24
表 A1	1 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミナルカットセット(手動トリップなし)	30
表 A2	1 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミナルカットセット(手動トリップなし)	31
表 A3	2 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミナルカットセット(手動トリップなし)	32
表 A4	2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB) のミナルカットセット(手動トリップなし) (1/2)	33
表 A4	2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB) のミナルカットセット(手動トリップなし) (2/2)	34
表 A5	局所的燃料破損時主・後備共制御棒保持電源遮断失敗 (SM・SB) のミナルカットセット	35
表 B1	1 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM) のミナルカットセット (手動トリップあり)	36
表 B2	1 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB) のミナルカットセット (手動トリップあり)	37
表 B3	2 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM) のミナルカットセット (手動トリップあり)	38
表 B4	2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB) のミナルカットセット (手動トリップあり) (1/2)	39
表 B4	2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB) のミナルカットセット (手動トリップあり) (2/2)	40
表 B5	局所的燃料破損時主・後備共制御棒保持電源遮断失敗 (SM・SB) のミナルカットセット	41

図リスト

図1.1	GEM (gas expansion module) . . . . .	3
図1.2	キュリー点方式自己作動型炉停止機構 (SASS) . . . . .	4
図2.1	大型炉ULOF事象初期段階のイベントツリー . . . . .	6
図2.2	GEM反応度と冷却材沸騰までの時間余裕 . . . . .	7
図3.1	原子炉停止系に係る系統の構成 . . . . .	9
図3.2	原子炉トリップ遮断器とボニーモータ起動ロジック . . . . .	13
図3.3	ULOF事象事故シーケンス発生頻度の評価 . . . . .	15
図3.4	大型炉ULOF事象初期段階のイベントツリーと分岐確率 . . . . .	27

## 1. はじめに

### 1. 1 本研究の背景・目的

高速炉プラントの重要な安全機能である炉停止機能は、多重性・フェイルセーフ機能を備えた安全保護系と独立2系統からなる原子炉停止系から構成され、加えて定期試験による機能確認によって高い信頼性が確保されている。しかしながら、将来炉としての高速炉プラントの設計例においては、炉心安全性の更なる向上、すなわち炉心損傷事故発生頻度のより一層の低減を図るため、従来の工学的安全設備に基づく炉停止機能に加えて、物理的諸現象に基づく受動的安全設備の導入が指向されつつあり、日本原子力発電による実証炉プラントの設計研究例では、キュリー一点方式の自己作動型炉停止機構（Self Actuated Shutdown System : SASS）やガス膨張機構（Gas Expansion Module : GEM）が設置されている[1]。

受動的安全設備は、基本的に構成機器の動的な動作を必要とはせず、プラント異常時の各種のパラメータ変動を入力とした物理/化学的原理に基づく諸現象を利用して、安全機能の実現を図るものである。受動的安全設備の設計では、このような関連諸現象の評価のための解析モデルを構築する必要がある。しかしながら、解析モデル中には、自然現象のゆらぎ（現象が確率的なものである場合）や製造時の誤差等の本質的に避けられることのできない不確かさ、および設計パラメータや現象のモデル化に関する不確かさ等（知識に関する不確かさ）が含まれることになるので、これらの不確かさに起因して、受動的安全設備が所定の機能を達成できない状態がある確率で存在することになると考えられる。従って、受動的安全設備に対してもその信頼度を評価し、確率論的安全評価（PSA）の適用によりプラント全体のリスクの低減効果を確認していくことが重要となる。

本研究は、受動的安全設備を考慮したPSA評価手法の確立を目的として、受動的安全設備として炉心周辺部に1層分のGEM集合体、後備炉停止系にSASS制御棒集合体を設置した電気出力60万kWeの高速炉プラントを評価対象として、ULOF事象初期段階に対するイベントツリー（E/T）を構築し、冷却材沸騰に至る条件付きシーケンス発生確率の予備的な評価までを実施したものである。

### 1. 2 ULOF事象とGEM、SASS

ULOF事象のULOFは、Unprotected Loss of Flow（炉心流量喪失時スクラム失敗）の略である。出力運転中に1次系流量喪失事象が発生し、安全保護系による原子炉停止に失敗することを想定した事象である。ULOF事象シーケンスの中には、「外部電源喪失」や「1次主冷却系ポンプトリップ」等のように起因事象そのものが流量喪失の原因となっているものと、何らかの起因事象発生時に安全保護系の作動により1次主冷却系主循環ポンプトリップには成功したものの制御棒挿入に失敗して結果的にULOF事象シーケンスとなっているものがある。1次主冷却系の流量喪失により、炉心部で熱出力と冷却能力のアンバランスが発生し、炉心部冷却材・燃料の温度が共に上昇、冷却材の沸騰を経て炉心損傷に至る。

GEMは、上部出口が閉じられたラッパー管内にアルゴンガスが内包されたものであり、炉容器下部ブレンナム部の圧力変化に応じて内部のアルゴンガス体積が変化している。これを炉心周辺部にGEM集合体として適切な本数分設置する。1次主冷却系主循環ポンプがトリップして炉心流量が減少す



ると、下部プレナム部の圧力減少によりアルゴンガス体積が膨張してそれまでナトリウムで満たされていた部分がアルゴンガスに置き変わるために、炉心部分からの中性子漏洩が増加し負の反応度効果をもたらす（図1.1）。GEM集合体を適切に配置することで、ULOF発生時に万が一制御棒挿入に失敗したとしても出力を受動的に静定させることが可能となる。

キュリー一点方式のSASS（キュリー一点方式自己作動型炉停止機構）は、安全保護系の信号により制御棒を切り離す替わりに、キュリー一点電磁石を用いて環境の温度変化による磁力の変化を利用して制御棒の切り離しを行う機構である（図1.2）。ULOF事象発生後、炉心集合体出口冷却材ナトリウム温度が上昇するにつれてSASS温度感知合金周囲のナトリウム温度が上昇していく。同時に温度感知合金の温度が熱伝導により上昇することにより温度感知合金内の磁束密度が変化していく。磁力による制御棒保持力が低下して、制御棒重量（浮力等の影響を込みで）以下となった時点で制御棒が落下する。

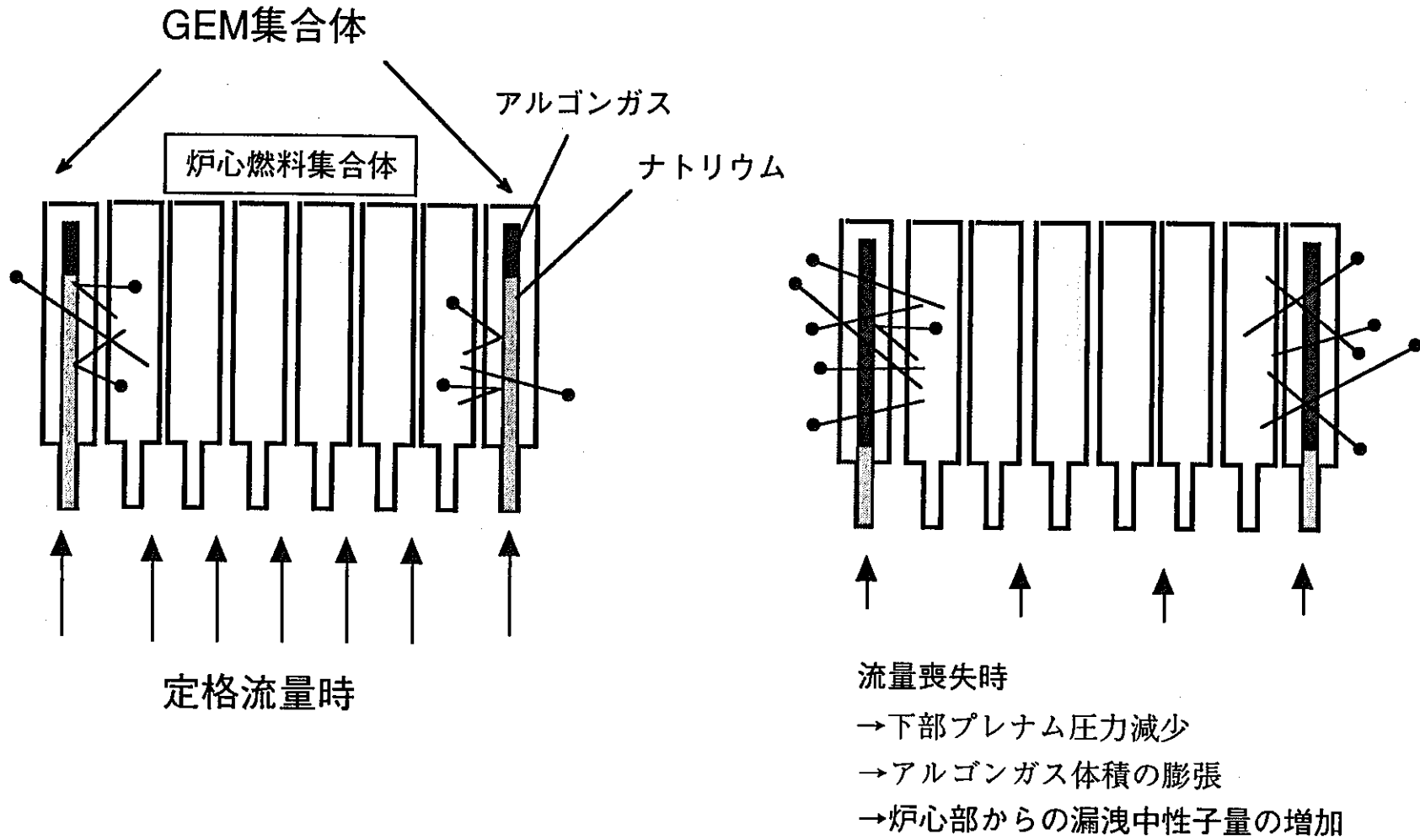
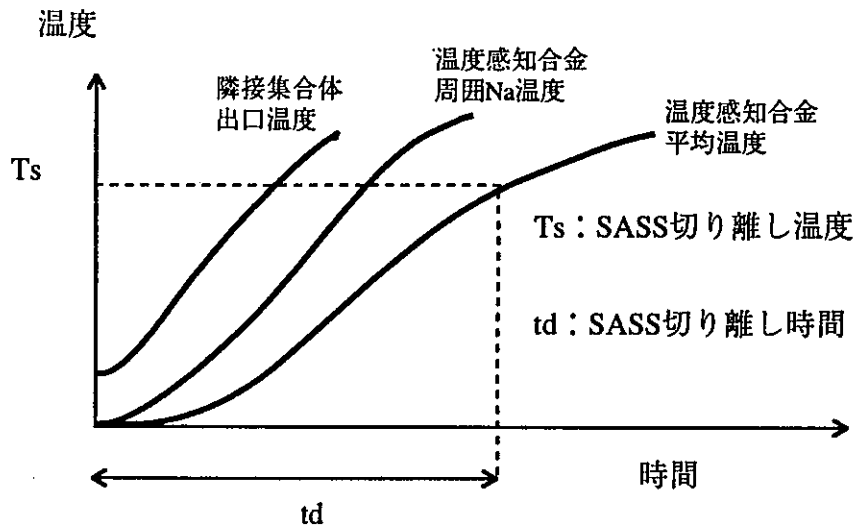


図1.1 GEM (gas expansion module)



起因事象発生後、集合体出口Na温度が上昇し、遅れてSASS温度感知合金周囲のNa温度が上昇していく。同時に温度感知合金の温度が熱伝導により上昇し、併せて合金内の磁束密度が変化していく。磁力による制御棒保持力が低下して、制御棒重量（浮力等の影響を込みで）以下となった時点で制御棒が落下する

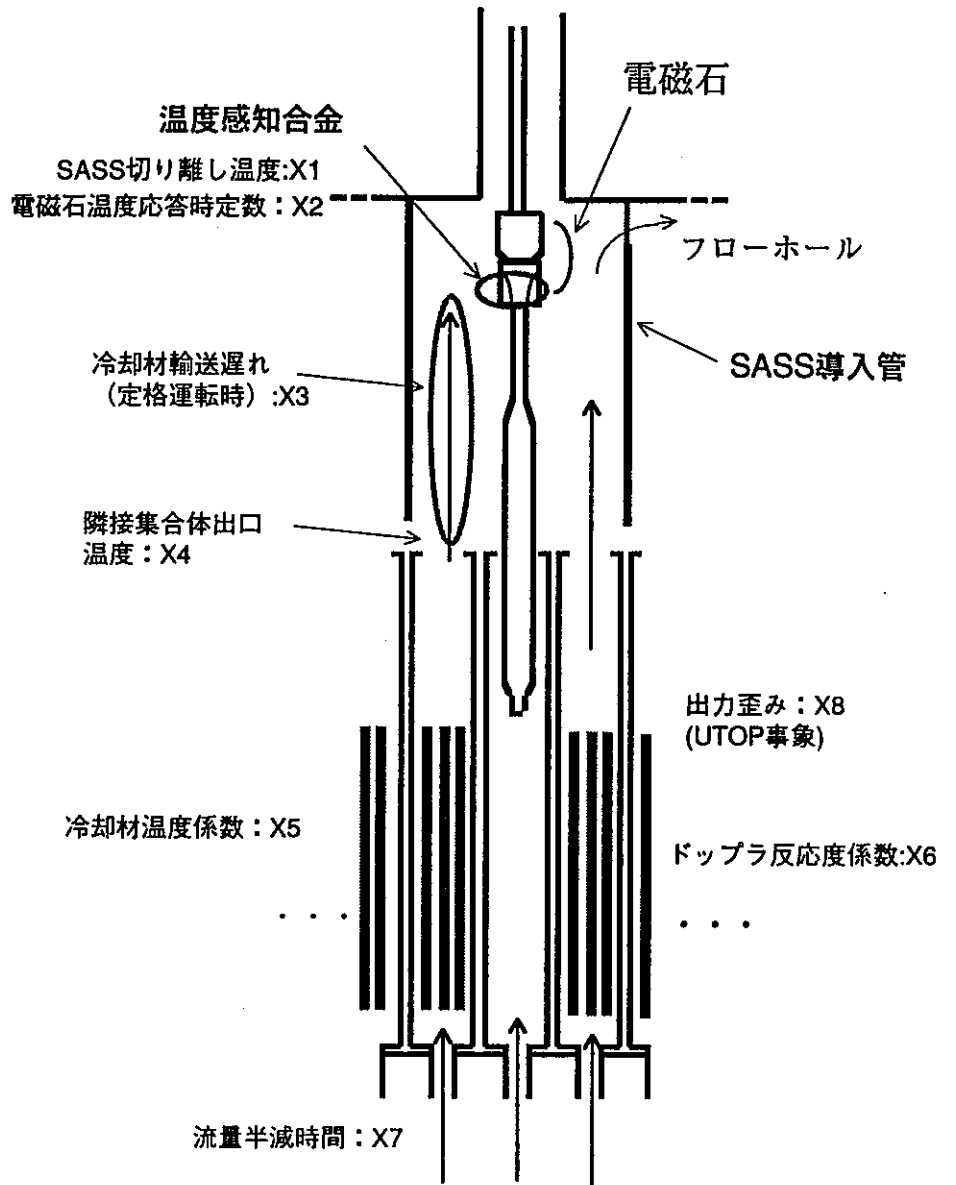


図1.2 キュリー一点方式自己作動型炉停止機構(SASS)

## 2. ULOF起因過程初期のイベントツリー

PSA評価手法の検討を目的として、受動的安全設備の効果を考慮した予備的な評価作業を実施した。本予備的評価で評価モデルとした高速炉プラントは、電気出力60万kWeで主冷却系統は3ループ構成であり、炉心周辺部に1層分のGEM集合体、後備炉停止系にSASS制御棒集合体を設置している。本モデルプラントに対するULOF事象推移の評価結果[2]を基に、図2.1に示すULOF事象初期段階のイベントツリー (E/T) を作成した。

ULOF時のポンプコストダウンによるGEM反応度のノミナル値は-1.5ドル程度と見積もられており、これは出力を静定させ得る負反応度である (シーケンスA)。しかし核計算の不確かさに起因して、 $1\sigma$ 幅で0.5ドル程度の不確かさが存在する。GEM反応度を約-1ドル程度 (ノミナル値+ $1\sigma$ ) とした場合、3ループ全てのポニーモータが起動して15%程度の炉心流量が維持されれば、少なくとも10分程度の間は冷却材の沸騰には至らないことを解析により確認した (図2.2)。この10分間の間に運転員による原子炉手動トリップ操作に成功すれば冷却材の沸騰は回避される (B)。手動スクラム操作に失敗してもSASSがしかるべき時間内に落下すれば冷却材の沸騰は回避される (C)。ポニーモータの起動が無くとも、SASSの作動により冷却材の沸騰は回避される可能性がある (E)。SASSについては全数固着のようなことが無い限り遅延してでも何本かは落下すると考えてよく、その場合には沸騰の拡大によるボイド反応度の挿入とSASSによる負反応度投入との競合過程となるものと考えられる (D、F)。

GEM反応度が小さい場合 (GEMが設置されなかった場合も含む) では、ポニーモータ起動前に冷却材の沸騰の可能性がある。しかしSASSが落下すれば冷却材の沸騰は回避される (G)。SASSの落下による負の反応度投入が十分ではない場合には、事象開始後20秒以前に冷却材の沸騰の可能性があるが、何体かのSASSの落下があれば沸騰開始時刻は遅延し、その後のポニーモータの起動の有無も影響して、沸騰の拡大によるボイド反応度の挿入とSASSによる負反応度投入との競合過程となるものと考えられる (H)。

以上のように、GEMとSASSが設置された炉心では、受動的安全設備の設置されていない従来炉で想定したような単純なULOFの事象推移とはならず、これらによる負の反応度効果と沸騰による正のボイド反応度との競合過程が存在するものと考えられる。言い換えれば、この炉心においては従来型の早いULOF事象推移となる確率は極めて小さいであろうと考えられる。

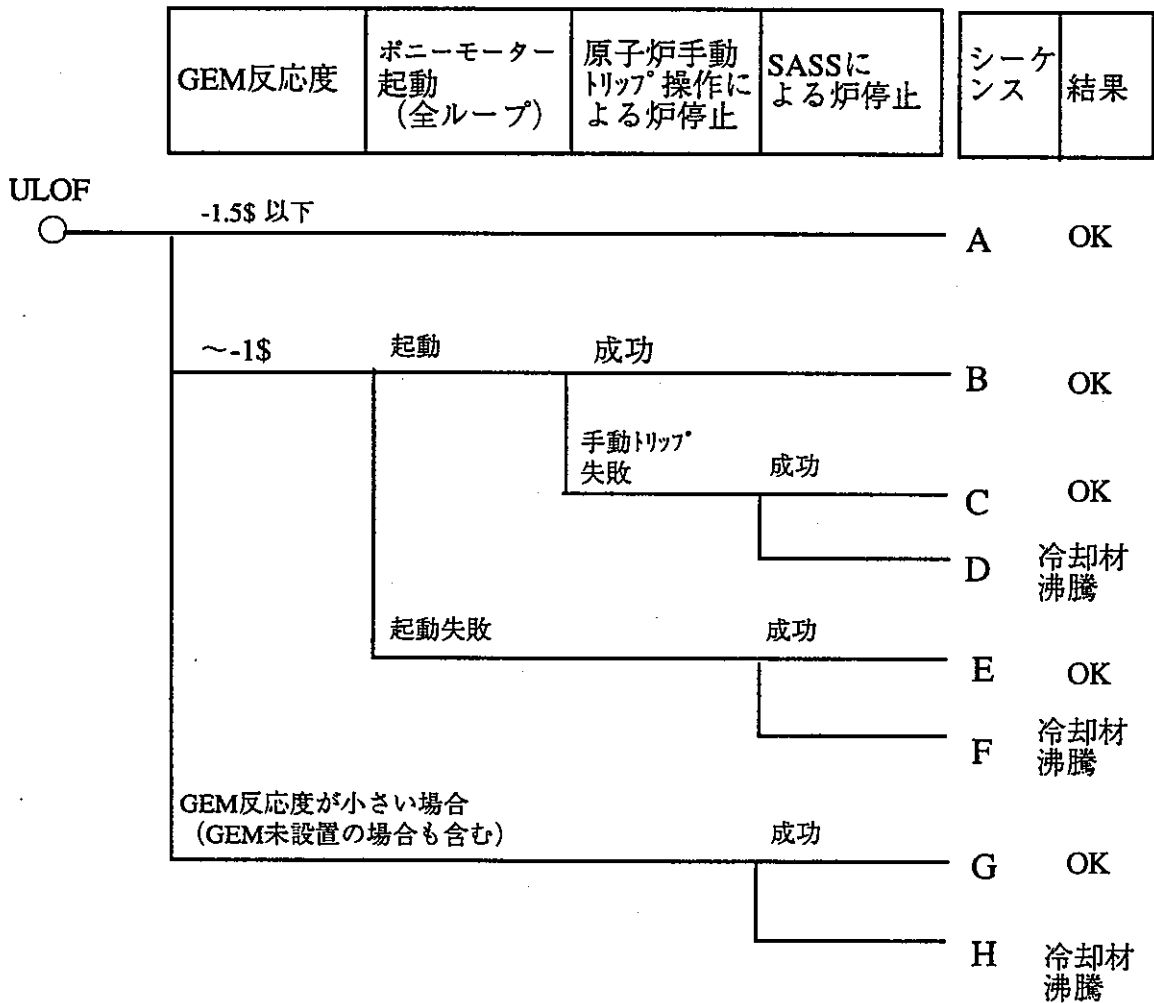


図2.1 大型炉ULOF事象初期段階のイベントツリー

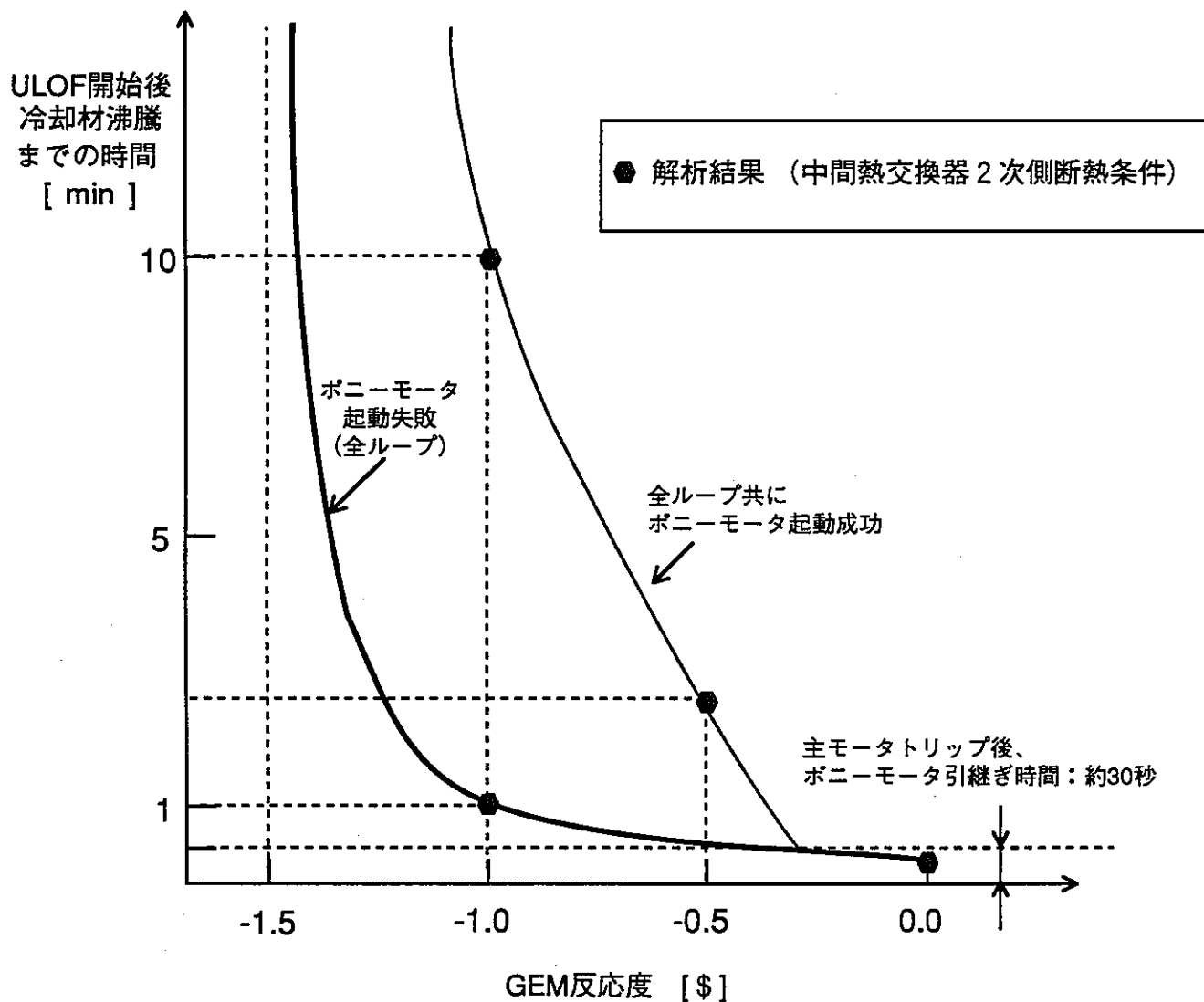


図2.2 GEM反応度と冷却材沸騰までの時間余裕

(上記の図は、GEM反応度が-1.5\$であれば沸騰に至らず静定すること、及び炉心部冷却材沸騰開始時刻に関する解析結果4点を基に曲線を外挿したものであり、曲線はあくまでも定性的なものである)

### 3. 冷却材沸騰シーケンスの発生頻度の予備的評価

2章で作成した図2.1のイベントツリーに対して、シーケンス発生確率の評価手法の整備を目的として、旧動燃設計60万kWe大型高速炉プラントのレベル1 PSA 概括評価[3]等を参考に、関連する系統、設備に対して評価用モデルを想定し、冷却材沸騰シーケンス発生確率の予備的評価を実施した。

#### 3. 1 原子炉停止系のシステムモデルと事故シーケンスカットセット

##### 3. 1. 1 原子炉停止系の構成

原子炉停止系（検出器、論理回路、トリップ遮断器、制御棒等）のシステムモデルや定量化で必要となる信頼性パラメータ、及び共通要因故障の評価方法については、旧動燃設計60万kWe大型高速炉プラントのレベル1 PSA 概括評価[3]で使用されたモデルと定量値データを参考とした。

モデルとした原子炉停止系の構成を図3.1に示す。原子炉停止系は、互いに独立な主炉停止系と後備炉停止系の2系統から構成されている。両系統ともに検出チャンネルは3チャンネル、論理回路は3トレイン構成となっている。遮断回路は、原子炉トリップ遮断器が組み合わされた電気回路であり、論理回路3トレインの内2トレイン以上からの入力信号により制御棒保持電源が遮断される2 out of 3の作動ロジックを有している。遮断回路は、両系統の制御棒1本1本の保持電源を独立に遮断するのではなく、主炉停止系においては13本の制御棒の保持電源を、後備炉停止系においては6本の制御棒の保持電源を一括遮断するように設計されている。後備炉停止系の制御棒切り離し機構には、従来型の機械式ラッチ機構ではなく、キュー一点方式のSASSが設置されている。制御棒の切り離し箇所は、保持電源遮断時、温度上昇によるSASS作動時共に同一箇所である。手動トリップ信号はA、Bの2トレイン構成であり、それぞれのトレインで発生した信号はOR回路を介して主・後備の双方に伝達されるものとした。

主炉停止系と後備炉停止系との間では、共通要因故障を排除するため可能な限り多様化が図られている。検出器については可能であれば作動原理の異なるものを採用し、論理回路の構成ロジックは異なっている。更に遮断回路については、主炉停止系は遮断器により組まれているが、後備炉停止系では継電器が遮断器の役割を担っている。また検出器の誤校正エラーを極力防止する為、校正作業は両系統で別々の作業チームが実施するものと想定した。

##### 3. 1. 2 事故シーケンスカットセットとULOFシーケンス発生頻度の評価

原子炉停止を達成するためには、主炉停止系または後備炉停止系のどちらか一方が機能を果たせばよい。主炉停止系失敗の要因は、トリップ遮断器開（2 out of 3）に失敗して制御棒保持電源遮断に失敗するか、またはトリップ遮断器開に成功したものの（必要最低限の本数の）制御棒挿入に失敗することである。SASSを考慮しない場合では、後備炉停止系も同様である。以下、SASSの機能を考慮しない場合を検討する。炉停止失敗のミニマルカットセットは、SM：主炉停止系トリップ遮断器開（2 out of 3）失敗、SB：後備炉停止系トリップ遮断器開（2 out of 3）失敗、RM：主炉停止系制御棒挿入失敗、RB：後備炉停止系制御棒挿入失敗とすれば、ブール代数表現により以下の様に定式化できる。以下の式中で、例えば/SMはSMの余事象、すなわち主炉停止系トリップ遮断器開（2 out of 3）成功を意味する。

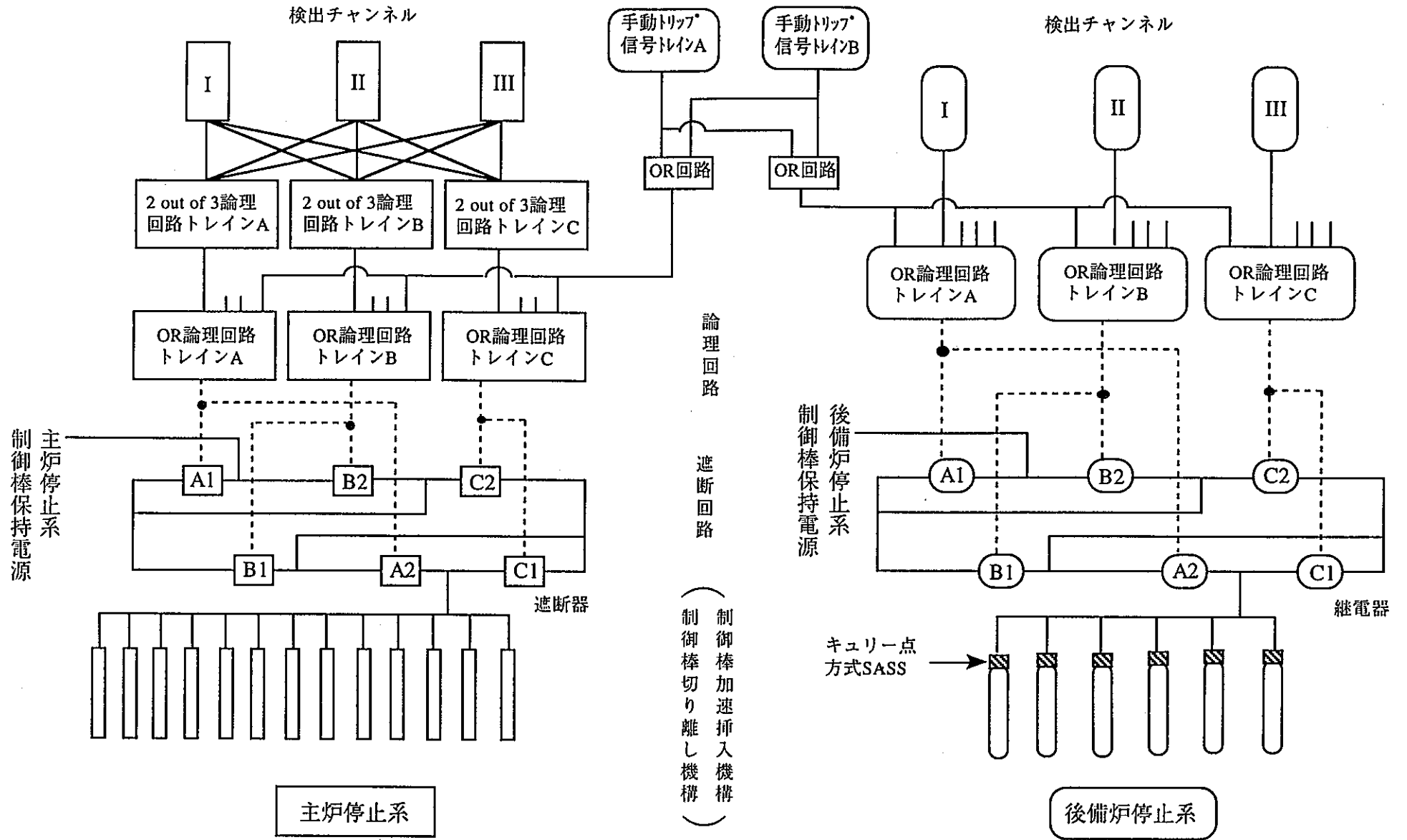


図3.1 原子炉停止に係るシステムの構成



$$\begin{aligned}
 \text{ATWS without SASS} &= (\text{SM} + / \text{SM} * \text{RM}) * (\text{SB} + / \text{SB} * \text{RB}) \\
 &= \text{SM} * \text{SB} \\
 &+ \text{SM} * / \text{SB} * \text{RB} \\
 &+ / \text{SM} * \text{RM} * \text{SB} \\
 &+ / \text{SM} * \text{RM} * / \text{SB} * \text{RB}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

上記の炉停止失敗のカットセットに起因事象を掛け合わせれば、ATWSシーケンスカットセットとなる。表3.1に示すように、起因事象の種類と炉停止失敗のカットセット(3-1式)との組み合わせにより事故カテゴリーの種類が決まる。ATWSシーケンスカットセットの中から、ULOF事象と分類されるものを抽出することにより、ULOF事象のシーケンスカットセットが得られ、信頼性データを基にこれを定量化することによりULOF事象発生頻度を評価することができる。ULOF事象シーケンスの中には、「外部電源喪失」や「1次主冷却系ポンプトリップ」等のように起因事象そのものが流量喪失の原因となっているものと、起因事象発生時に安全保護系の作動により主または後備炉停止系の遮断器開(2 out of 3)となって(/SMまたは/SB)主循環ポンプ主モータトリップ信号が発せられ、主循環ポンプがトリップしたものの制御棒挿入に失敗して結果的にULOF事象シーケンスとなっているものがある。

主・後備炉停止系のトリップ遮断器開(2 out of 3)失敗(SM、SB)のミニマルカットセットは、検出チャンネルや論理回路、遮断器等の故障の組み合わせとして表現される。SM、SBの発生確率は、期待できる原子炉トリップ信号の種類の数に対応して起因事象の種類毎に異なったものとなる。各々の起因事象と期待できる原子炉トリップ信号の種類を表3.2にまとめた。対象とする原子炉トリップ信号の組み合わせ毎に、SM、SBそれぞれのミニマルカットセットとその定量値(発生確率)を、表A1～表A6[3]にまとめた。これらの評価結果を基にして、各々の起因事象毎にSM、SBの定量値が評価される。表3.2中で主炉停止系の「遮断器開(2/3)失敗確率」がSMの定量値であり、後備炉停止系の「遮断器開(2/3)失敗確率」がSBの定量値に相当する。

表3.3には、主・後備炉停止系の制御棒挿入失敗事象(RM、RB)の定量値をまとめた。主炉停止系の制御棒の間には、メカニカルな切り離し機構(ディラッチ機構)に起因して共通要因故障が存在すると想定しているが、SASSが設置されている後備炉停止系の制御棒の間には共通要因故障はないものと想定した。これらの定量値は起因事象の種類によらず一定である。

以上の定量値と(3-1)式を用いて、SASSを考慮しない場合のATWS事故シーケンス発生頻度を導出することができる。結果を表3.1に示した。表3.1では特に、ULOF事象シーケンスの発生頻度をカットセットタイプ毎にまとめている。

### 3.2 シーケンス分岐確率の評価

図2.1のイベントツリーのヘディングには、「ボニーモータ起動」、「原子炉手動トリップ操作による炉停止」、「SASSによる炉停止」の3つのフロントラインシステムが現れているが、これらの成功・失

表3.1 起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ

起因事象分類と起因事象発生頻度 (- /ry)			ATWS事故シーケンスと発生頻度* (- /ry) 及び事故カテゴリ							
			/SM * RM * /SB * RB		/SM * RM * SB		SM * /SB * RB		SM * SB	
I01	正の反応度挿入	2.8E-02	4.0E-14	UTOP-LOF	1.3E-10	UTOP-LOF	1.4E-13	UTOP-LOF	4.4E-10	UTOP
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-03	2.3E-15	ULOPI	7.9E-12	ULOPI	9.7E-15	ULOPI	3.4E-11	ULOPI
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-04	1.0E-15	ULOF	3.3E-12	ULOF	4.4E-15	ULOF	1.4E-11	ULOPI
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	4.6E-10	ULOF	5.9E-14	ULOF	2.6E-10	ULOF
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	4.6E-10	ULOF	5.9E-14	ULOF	2.6E-10	ULOF
I08	1次主冷却系逆止弁閉(1ループ)	3.2E-03	4.6E-15	ULOF	2.0E-11	ULOF	2.6E-15	ULOF	1.2E-11	ULOF
I09	2次主冷却系流量減少	4.9E-01	7.1E-13	ULOF	1.1E-10	ULOF	4.0E-13	ULOF	6.1E-11	ULOHS
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	5.1E-02	7.3E-14	ULOF	1.1E-11	ULOF	4.2E-14	ULOF	6.3E-12	ULOHS
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-03	7.6E-15	ULOF	1.2E-12	ULOF	4.3E-15	ULOF	6.6E-13	ULOHS
I12	外部電源喪失	5.2E-02	7.5E-14	ULOF	1.1E-11	ULOF	4.3E-14	ULOF	6.4E-12	ULOF
I13	給水流量喪失	3.1E-01	4.5E-13	ULOF	1.4E-09	ULOF	1.7E-12	ULOF	5.5E-09	ULOHS
I14	タービントリップ	1.9E-01	2.7E-13	ULOF	4.1E-11	ULOF	1.6E-13	ULOF	2.4E-11	ULOHS
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03	9.8E-15	ULOF	3.1E-11	ULOF	3.8E-14	ULOF	1.2E-10	ULOHS
I16	局所的燃料破損	3.0E-04	4.3E-16	ULOF	2.0E-14	ULOF	2.0E-16	ULOF	8.4E-12	Local Fault
I18	原子炉トリップ	5.7E-01	8.2E-13	ULOF	-	-	-	-	-	-

ULOFシーケンス カットセット別発生頻度 (- /ry)	/SM * RM * /SB * RB	/SM * RM * SB	SM * /SB * RB	SM * SB	合計
		2.6E-12	2.5E-09	2.5E-12	5.4E-10

SM：主炉停止系トリップ遮断器開失敗、SB：後備炉停止系トリップ遮断器開失敗、RS：主炉停止系制御棒挿失敗、RB：後備炉停止系制御棒挿失敗

\*局所的燃料破損 以外の起因事象では手動トリップに期待していない。

表3.2 起回事象と期待できる原子炉トリップ信号

起回事象分類		発生頻度[ry]	期待できる原子炉トリップ信号	系統	遮断器開(2/3) 失敗確率 [-]	遮断器(2/3) 失敗確率 [-] 全ての起回事象で 手動スクラムを期待
I01	正の反応度挿入	2.8E-02	出力領域中性子束高	主	1.2E-04	1.5E-05
			広域中性子束高	後備	1.3E-04	2.0E-06
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-03	原子炉容器ナトリウム液位低	主	1.5E-04	1.6E-05
			ガードベッセル内漏洩ナトリウム液位高	後備	1.4E-04	2.1E-06
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-04	原子炉容器ナトリウム液位低	主	1.5E-04	1.6E-05
			原子炉格納容器床下雰囲気温度高	後備	1.3E-04	2.0E-06
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-02	1次主冷却系循環ポンプ回転数低	主		
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	7.2E-02	原子炉容器出口ナトリウム温度高	主	2.1E-05	1.5E-05
I08	1次主冷却系逆止弁閉(1ループ)	3.2E-03	1次主冷却系流量低	後備	1.8E-04	2.3E-06
I09	2次主冷却系流量減少	4.9E-01	2次主冷却系循環ポンプ回転数低	主		
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	5.1E-02	原子炉容器出口ナトリウム温度高	主	2.1E-05	1.5E-05
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-03	2次主冷却系流量低	後備		
			IHX1次側出口ナトリウム温度高	後備	6.1E-06	1.4E-06
I12	外部電源喪失	5.2E-02	常用母線電圧低 (注炉停止系へのトリップ信号としては期待しない)	主		
			1次主冷却系循環ポンプ回転数低	主		
			原子炉容器出口ナトリウム温度高	主	2.1E-05	1.5E-05
			1次主冷却系流量低	後備		
			常用母線電圧低	後備	6.1E-06	1.4E-06
I13	給水流量喪失	3.1E-01	蒸気発生器出口ナトリウム温度高	主	1.4E-04	1.6E-05
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03	IHX1次側出口ナトリウム温度高	後備	1.3E-04	2.0E-06
I14	タービントリップ	1.9E-01	タービントリップ	主		
			蒸気発生器出口ナトリウム温度高	主	2.1E-05	1.5E-05
			タービン第1段圧力低	後備		
			IHX1次側出口ナトリウム温度高	後備	6.1E-06	1.4E-06
I16	局所的燃料破損	3.0E-04	燃料破損検出#	主		
			手動トリップ#	主	1.6E-05	1.6E-05
			燃料破損検出#	後備		
			手動トリップ#	後備	1.9E-06	1.9E-06
I18	原子炉トリップ	5.7E-01	-	-	-	-

# I16では主・後備炉停止系間の従属性(検出器校正エラー、手動トリップ操作)を考慮してシーケンス発生頻度を評価する。

表3.3 制御棒挿入失敗確率

系統	失敗確率	成功基準	備考
主炉停止系制御棒	3.6E-05	13本中12本以上の挿入に成功すること	制御棒間の共通要因故障を考慮
後備炉停止系制御棒	4.0E-08	6本中5本以上の挿入に成功すること	SASSの設置によりメカニカルな制御棒ディラッチ機構はなく、共通要因故障は考慮する必要がないと仮定

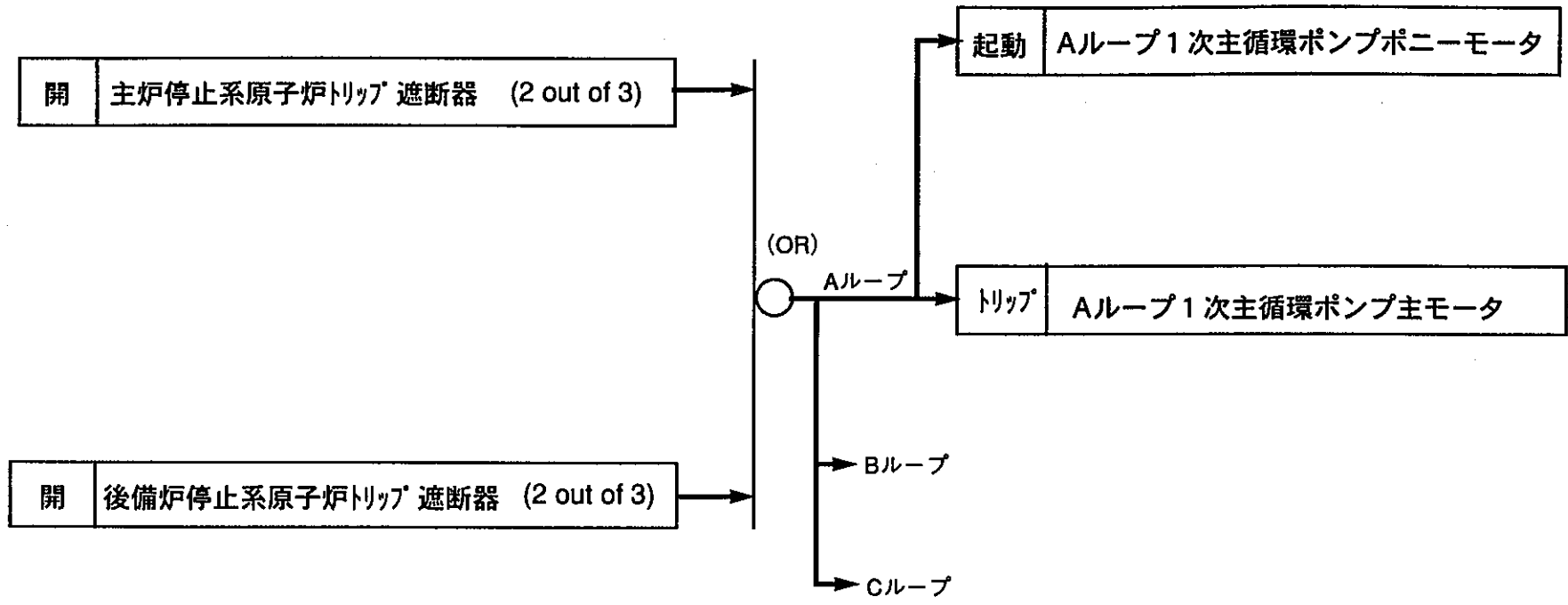


図3.2 原子炉トリップ遮断器とポニーモータ起動ロジック

敗は、炉停止失敗に至った機器故障の組み合わせ（ミニマルカットセット）の内容と従属性がある。図3.2は、本評価で想定したポニーモータの起動ロジックである。主・後備どちらかの炉停止系のトリップ遮断器開（2 out of 3）成功に続いて発せられる信号によりポニーモータが起動する。主炉停止系、後備炉停止系の双方のトリップ遮断器が同時に開失敗となって炉停止失敗となった場合には、ポニーモータ起動信号は発せられないのでポニーモータの自動起動は失敗となる。また、図3.1によれば、原子炉手動トリップ操作は、安全保護系の検出チャンネルの故障をバックアップすることは可能であるが、例えば主・後備の両系統の論理回路の同時故障に起因する炉停止失敗には無効であることがわかる。SASSは、後備炉停止系のトリップ遮断器による制御棒切り離し機能のバックアップであり、例えば主炉停止系のトリップ遮断器開（2 out of 3）失敗と後備炉停止系の制御棒挿入失敗の組み合わせによる炉停止失敗には無効である。従って、図2.1のイベントツリーの分岐確率の評価では、炉停止失敗の原因となったシーケンスカットセットとフロントラインシステムとの間の従属性を適切に考慮する必要がある。

「GEM反応度」の分岐確率については、起因事象やミニマルカットセットの内容とは独立であると仮定し、その分岐確率は全てのULOF事象シーケンスに対して一様に適用できるものとした。「ポニーモータ起動」の成功・失敗確率は、事故シーケンスの種類との依存性とポニーモータ起動に関わる系統の故障確率とを組み合わせで評価した。「原子炉手動トリップ操作による炉停止」と「SASSによる炉停止」の失敗側への分岐確率は、分岐点までと分岐後のシーケンスの発生頻度を「ポニーモータ起動」ロジックの評価と併せて評価し、それらの比から導出した。これらのシーケンス発生頻度の導出手順の概要を図3.3に示す。得られた分岐確率を用いて、冷却材沸騰に至るシーケンスの条件付き発生確率を評価した。

### 3. 2. 1 GEMの反応度の不確かさとシーケンス分岐確率

GEM反応度の不確かさに対しては、設計例を参考に平均値 = -1.5ドル、 $1\sigma = 0.5$ ドルの正規分布を仮定し、GEM反応度が出力静定に十分な反応度を得ることが可能な範囲は -1.5ドル以下と想定した（分岐確率 0.5）。GEM反応度が、-1.5～-1ドルまでの範囲（平均値～平均値+ $1\sigma$ ：分岐確率 約0.34）であれば、約-1ドル程度とした場合の解析結果から、ポニーモータ起動に成功すればULOF事象発生から冷却材沸騰開始までに10分以上の余裕があることになり（図2.2）、図2.1のイベントツリー上で手動原子炉トリップ操作に期待できるシーケンスに相当するものとした。GEM反応度が-1ドル以上の範囲（平均値+ $1\sigma$ 以上：分岐確率 約0.16）では、ポニーモータ起動に成功したとしても沸騰開始までの余裕が十分ではなく手動トリップ操作には期待しないとの保守的な想定を採用することとし、GEM反応度の値に依存して事象進展の緩慢の差異があるものの全てを1つの分岐にまとめて取り扱うこととした。

### 3. 2. 2 ポニーモータ起動

成功基準は、3ループのポニーモータ全てが起動に成功することである。主炉停止系または後備炉停止系のトリップ遮断器開（2 out of 3）に続いて発信されるポニーモータ起動信号による自動起動モードのみを考慮し、手動起動操作については期待しないものとした。これは、ポニーモータ起動を考慮するシーケンスではGEM反応度の不確かさが -1.5\$～-1\$の範囲にある場合であり、冷却材沸騰開始前までの余裕は数

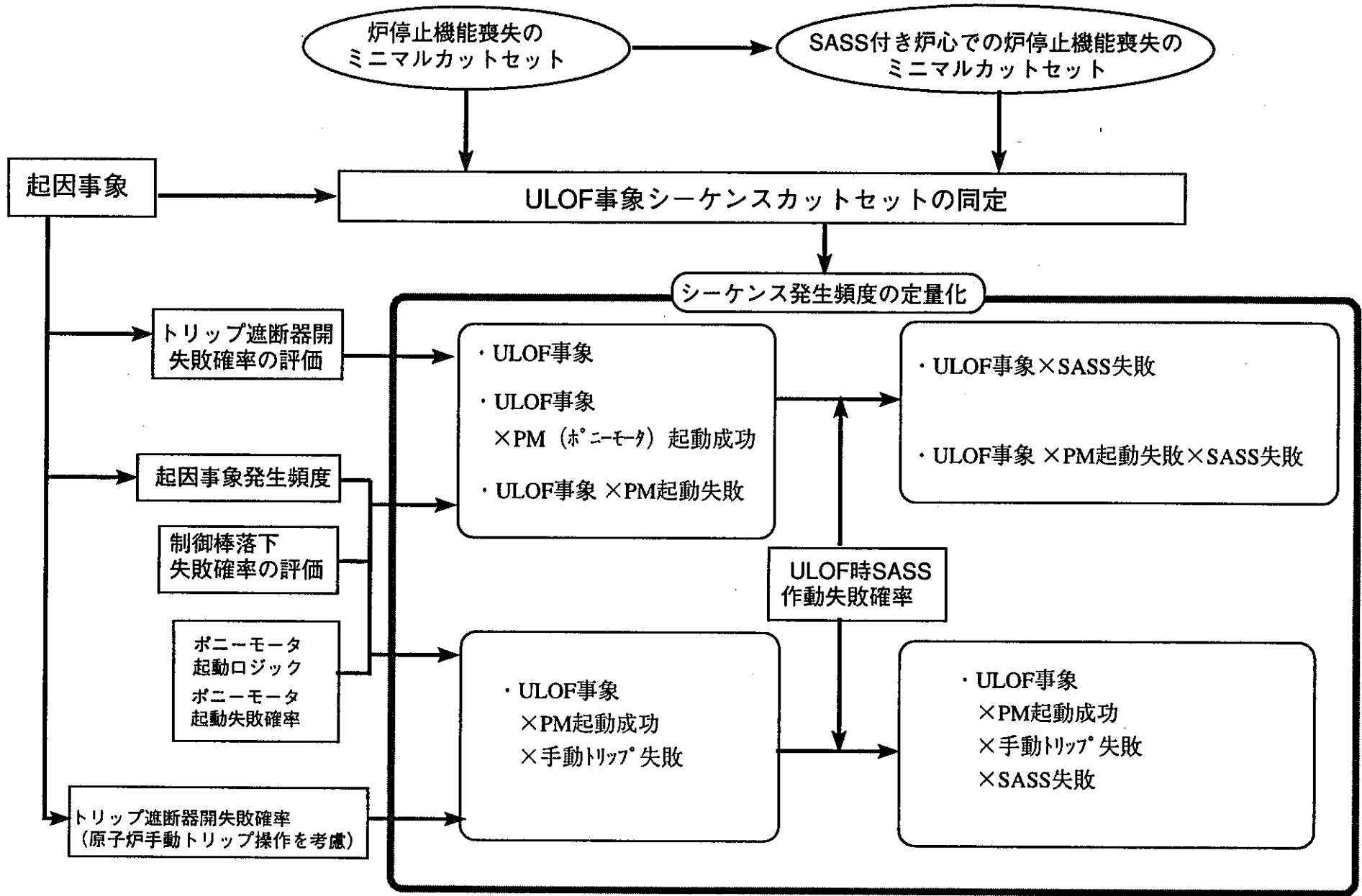


図3.3 ULOF事象事故シーケンス発生頻度の評価

分から10分程度はがあると推定できるが、手動起動を行うまでの一連の認知、判断、操作には十分な時間が得られないものと保守的な想定を行ったためである。

起回事象が、「1次系強制循環能力喪失」（ポンプ軸固着等）、「1次系内逆止弁閉」の場合には、起回事象の発生したループではポニーモータによる運転は不可となるため、3ループポニーモータ運転を確立することができない。ULOF事象シーケンスに対してこのようなシーケンスの占める割合を  $R_{ie}$  とする。上記2種類以外の起回事象から発生したULOFシーケンスであっても、原子炉停止失敗の原因が主炉停止系と後備炉停止系の双方のトリップ遮断器開失敗の重ね合わせであれば、同時にポニーモータ起動信号発信失敗となってポニーモータ起動失敗に至る。上記2種類以外の起回事象から発生したULOFシーケンスの中で、主炉停止系と後備炉停止系の双方で遮断器開（2 out of 3）失敗となっているシーケンス（SM \* SB）の発生割合を  $R_s$  とする。さらに、主・後備炉停止系のいずれかのトリップ遮断器開（2 out of 3）に成功しても、ポニーモータ制御系故障またはポニーモータ起動失敗等の機器故障に起因して起動失敗となる可能性がある。このような機器故障確率を  $P_p$  とする。関連機器の継続運転失敗確率については、ポニーモータ運転継続の使命時間が数十分程度であり起動失敗確率に対して無視できるものとした。

以上のことから、図2.1のイベントツリーの中の「ポニーモータ起動」の失敗側分岐確率は、3ループポニーモータ運転確立失敗となるULOFシーケンスの発生頻度割合として以下の式により評価できる。

$$\text{ポニーモータ起動失敗確率} = R_{ie} + (1 - R_{ie}) \times R_s + \{ 1 - (R_{ie} + (1 - R_{ie}) \times R_s) \} \times P_p$$

表3.1から、 $R_{ie}$ と $R_s$ とを評価すると以下ようになる。

$$R_{ie} = 7.5E-10 / 3.1E-9 = 0.24$$

$$R_s = 2.7E-10 / (3.1E-9 \times (1 - R_{ie})) = 0.11$$

3台のポニーモータ起動に関わる機器故障確率  $P_p$  については、以下のような概略的な評価を行った。

図3.2の起動ロジックに関連する機器とその故障率[3]を以下のように想定した。

—ケーブル（100m）断線：1.2E-7 /hr、短絡：2.0E-6 /hr

—固体素子論理回路（10個を想定）故障：2.5E-7 /hr

機器故障率の合計は、2.4E-6 /hrであり、1ヶ月（720hr）に1回の機能試験で動作の確認が実施されるとすれば、3台全てのポニーモータ起動信号発生に失敗する確率は、

$$1/2 \times 2.4E-6 /hr \times 720hr \times 3 = 2.6E-3$$

ポニーモータ自身の起動失敗の故障率は4.0E-6 /hrであり、1ヶ月に1回の機能試験で動作の確認が実施されるとすれば、3台全てのポニーモータ起動に失敗する確率は、

$$1/2 \times 4.0E-6 /hr \times 720hr \times 3 = 4.3E-3$$

ポニーモータの駆動電源喪失確率については、起回事象が「外部電源喪失」以外であれば、

外部電源喪失以外を起因事象とするULOFシーケンス発生頻度割合×外部電源喪失発生確率  
×「3ループ全ての非常用ディーゼル発電機電源確立」失敗

で評価できるが、本評価で考慮しているボニーモータの使命時間は数十分程度であり、その間の外部電源喪失発生確率は十分小さく無視できる程度である。起因事象が「外部電源喪失」である場合のボニーモータの駆動電源喪失確率は、

外部電源喪失を起因事象とするULOFシーケンス発生頻度割合  
×「3ループ全ての非常用ディーゼル発電機電源確立」失敗

となる。非常用ディーゼル発電機は、3台のボニーモータに対応してそれぞれ独立な3系統構成であるとし、起動失敗確率を $1.2E-3 / \text{demand [3]}$ とすれば、起因事象が「外部電源喪失」である場合の駆動電源喪失確率は、

$$(1.8E-11 / 3.9E-9) \times (1.2E-3 / \text{demand} \times 3) = 1.7E-5$$

以上の検討により、ボニーモータ3台全てのボニーモータ起動に失敗する確率 $P_p$ は、

$$P_p = 2.6E-3 + 4.3E-3 + 1.7E-5 = 6.9E-3$$

よって、ボニーモータ起動のヘディングにおける失敗側の分岐確率は

$$\begin{aligned} \text{ボニーモータ起動失敗確率} &= 0.24 + (1 - 0.24) \times 0.11 + \{1 - (0.24 + (1 - 0.24) \times 0.11)\} \times 6.9E-3 \\ &= 0.33 \end{aligned}$$

本予備的評価では、起因事象に依存して3ループのボニーモータ起動に失敗する確率やULOF発生時に原子炉トリップ遮断器開信号発生に失敗する確率の方が、ボニーモータ自身またはその制御系の機器故障の確率よりも大きく支配的となった。また、成功側の分岐確率は、 $1 - 0.33 = 0.67$ となる。

### 3. 2. 3 原子炉手動トリップ操作による炉停止

図2.1のイベントツリー上のシーケンスC、Dに現れる「原子手動トリップ操作による炉停止」の失敗側への分岐確率は、以下の2つのシーケンスの発生頻度の比として評価できる。

- (a) ULOF事象 \* PM (ボニーモータ) 起動成功
- (b) ULOF事象 \* PM起動成功 \* 手動トリップ (による炉停止) 失敗

(a) ULOF事象のシーケンス発生頻度は、3. 1. 2で述べた手順で導出されており、結果は表3.1にまとめられている。ボニーモータ起動成功確率は、3. 2. 2で評価されている。(a)のシーケンスの発生



頻度は以下のように評価できる。

$$\begin{aligned} \text{(a) ULOF事象 * PM起動成功 の発生頻度} \\ &= 3.1\text{E-}9 \times 0.67 \\ &= 2.1\text{E-}9 \end{aligned}$$

一方、(b)シーケンスは、以下のように考えることができる。

$$\begin{aligned} \text{(b) ULOF事象 * PM起動成功 * 手動トリップ失敗} \\ &= \text{手動トリップ操作を考慮したULOF事象 * PM起動成功} \end{aligned}$$

手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度を導出するため、各々の起因事象に対応する主炉停止系トリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗 (SM)、後備炉停止系トリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗 (SB) のミニマルカットセット (表A1～表A6 [3]) を手動トリップ操作を考慮した形に変更した。結果を表B1～表B5に示す。運転員による手動トリップ操作失敗確率 (ヒューマンエラー) は、猶予時間が10分程度ではあるものの、事故管理方策の1つとしてATWS事象発生に対応した異常時手順書が整備されなおかつ十分な訓練が行われるものとの想定に基づき、スキルベールの操作であるとし、HCRモデルを参考にして5E-3の値を設定した。

主炉停止系トリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗×後備炉停止系トリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗 (SA×SB) の定量化では、主・後備炉停止系間での手動トリップ操作の従属性を考慮して評価した。すなわち、主・後備の2つの系統間で共通の操作であるとした。全ての事象シーケンスについて手動トリップ操作を考慮できるとした場合の、ATWS事故シーケンスの発生頻度を表3.4にまとめた。この中からULOFに該当するシーケンス発生頻度を合計したものが、「手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度」である。

PM起動成功確率を評価する場合には、3.2.2で検討したように、ULOF事象シーケンスとの従属性を考慮する必要がある。3.2.2での検討結果によれば、あるシーケンスに対してPM起動失敗となる場合のシーケンス割合は一般的に以下のように表現できる。

$$\text{ボニーモータ起動失敗確率} = \text{Rie} + (1 - \text{Rie}) \times \text{Rs} + \{ 1 - (\text{Rie} + (1 - \text{Rie}) \times \text{Rs}) \} \times \text{Pp}$$

ただし、

Rie：起因事象との従属性により3ループボニーモータ運転を確立することができないULOF事象シーケンスの発生割合

Rs：3ループボニーモータ運転確立に対して起因事象との従属性がないULOFシーケンスの中で、主炉停止系と後備炉停止系の双方で遮断器開 (2 out of 3) 失敗となっているシーケンス (SM \* SB) の発生割合

Pp：ボニーモータ制御系故障またはボニーモータ起動失敗等の機器故障に起因して起動失敗となる確率

機器故障確率  $P_p$  は、シーケンスの種類に依存しないが、 $R_{ie}$ 、 $R_s$  はシーケンスの種類に依存して変化する。3. 2. 2で求めた  $R_{ie}$ 、 $R_s$  の値は、手動トリップ操作に期待しないとした場合（ただし起因事象：局所的燃料破損を除く）のULOFシーケンスに対する割合であった。「手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度」に対しても、表3.4を基に  $R_{ie}$ 、 $R_s$  の値を評価すればよい。よって(b)の発生頻度は、

手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度

$$\times [ 1 - [ R_{ie} + (1 - R_{ie}) \times R_s + \{ 1 - (R_{ie} + (1 - R_{ie}) \times R_s) \} \times P_p ] ] \\ = 7.0E-11$$

よって、原子炉手動トリップ操作の失敗側の分岐確率は、(b)/(a) = 0.034 となる。

### 3. 2. 4 SASSによる炉停止

SASSによる炉停止失敗の分岐確率は、原子炉手動トリップ操作の場合と同様に、以下に示すようにイベントツリー上でSASS分岐点までのシーケンス発生頻度とSASS失敗側分岐後のシーケンス発生頻度の比から求められる。

シーケンスHのSASS失敗

$$\frac{(\text{ULOF事象} * \text{SASS失敗})}{\text{ULOF発生頻度}} \\ = \frac{\text{SASSを考慮したULOF発生頻度}}{\text{ULOF発生頻度}}$$

シーケンスFのSASS失敗確率

$$\frac{(\text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗} * \text{SASS失敗})}{(\text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗})} \\ = \frac{\text{SASSを考慮したULOF発生頻度} * \text{PM起動失敗}}{(\text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗})}$$

シーケンスDのSASS失敗確率

$$\frac{\{ \text{ULOF事象} * \text{PM起動成功} * \text{手動トリップ失敗} * \text{SASS失敗} \text{ 発生頻度} \}}{\{ \text{ULO事象} * \text{PM起動成功} * \text{手動トリップ失敗} \text{ 発生頻度} \}} \\ = \frac{\{ \text{手動トリップ操作、SASSを考慮したULOF発生頻度} \times \text{PM起動成功} \}}{\{ \text{手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度} \times \text{PM起動成功} \}}$$

上記の式を計算するためには、「SASSを考慮したULOF発生頻度」、「手動トリップ操作、SASSを考慮したULOF発生頻度」を新たに評価する必要がある。以下、これらの評価方法について述べる。

SASSは後備炉停止系トリップ遮断器開失敗のバックアップであり、SASSを考慮した場合炉停止失敗のミニマルカットセットは以下ようになる。SM：主炉停止系トリップ遮断器開（2 out of 3）失敗、SB：

表3.4 起因事象とATWS事故シーケンスカテゴリ(全ての事象シーケンスにて手動トリップが考慮できるとした場合)

起因事象分類と起因事象発生頻度 (- /ry)			ATWS事故シーケンスと発生頻度 (- /ry) 及び事故カテゴリ							
			/SM * RM * /SB * RB		/SM * RM * SB		SM * /SB * RB		SM * SB	
I01	正の反応度挿入	2.8E-02	4.0E-14	UTOP-LOF	2.0E-12	UTOP-LOF	1.7E-14	UTOP-LOF	2.8E-12	UTOP
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-03	2.3E-15	ULOPI	1.2E-13	ULOPI	1.0E-15	ULOPI	1.6E-13	ULOPI
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-04	1.0E-15	ULOF	5.2E-14	ULOF	4.5E-16	ULOF	7.1E-14	ULOPI
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	5.8E-12	ULOF	4.3E-14	ULOF	7.4E-12	ULOF
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	5.8E-12	ULOF	4.3E-14	ULOF	7.4E-12	ULOF
I08	1次主冷却系逆止弁閉(1ループ)	3.2E-03	4.6E-15	ULOF	2.6E-13	ULOF	1.9E-15	ULOF	3.3E-13	ULOF
I09	2次主冷却系流量減少	4.9E-01	7.1E-13	ULOF	2.4E-11	ULOF	2.9E-13	ULOF	4.4E-11	ULOHS
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	5.1E-02	7.3E-14	ULOF	2.5E-12	ULOF	3.0E-14	ULOF	4.6E-12	ULOHS
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-03	7.6E-15	ULOF	2.6E-13	ULOF	3.2E-15	ULOF	4.7E-13	ULOHS
I12	外部電源喪失	5.2E-02	7.5E-14	ULOF	2.6E-12	ULOF	3.1E-14	ULOF	4.7E-12	ULOF
I13	給水流量喪失	3.1E-01	4.5E-13	ULOF	2.2E-11	ULOF	1.9E-13	ULOF	3.1E-11	ULOHS
I14	タービントリップ	1.9E-01	2.7E-13	ULOF	9.4E-12	ULOF	1.1E-13	ULOF	1.7E-11	ULOHS
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03	9.8E-15	ULOF	4.9E-13	ULOF	4.2E-15	ULOF	6.7E-13	ULOHS
I16	局部的燃料破損	3.0E-04	4.3E-16	ULOF	2.0E-14	ULOF	2.0E-16	ULOF	8.4E-12	Local Fault
I18	原子炉トリップ	5.7E-01	8.2E-13	ULOF	-	-	-	-	-	-

ULOFシーケンス カットセット別発生頻度 (- /ry)	/SM * RM * /SB * RB	/SM * RM * SB	SM * /SB * RB	SM * SB	合計
		2.6E-12	7.4E-11	7.6E-13	2.0E-11

SM：主炉停止系トリップ遮断器開失敗、SB：後備炉停止系トリップ遮断器開失敗、RS：主炉停止系制御棒挿失敗、RB：後備炉停止系制御棒挿失敗

後備炉停止系トリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗、RM：主炉停止系制御棒挿失敗、RB：後備炉停止系制御棒挿失敗、SS：SASSによる炉停止失敗（現象の不確かさのみの起因する確率）とすれば、

$$\begin{aligned}
 \text{ATWS with SASS} &= (SM + /SM * RM) * (SB * SS + /SB * RB) \\
 &= SM * SB * SS \\
 &+ SM * /SB * RB \\
 &+ /SM * RM * SB * SS \\
 &+ /SM * RM * /SB * RB \qquad (3-2)
 \end{aligned}$$

SASSは、主炉停止系のトリップ遮断器開 (2 out of 3) 失敗と後備炉停止系の制御棒落下失敗の組み合わせ (SM \* /SB \* RB) と主炉停止系と後備炉停止系の双方の制御棒落下失敗の組み合わせ (/SM \* RM \* /SB \* RB) に起因するATWSシーケンスには無効である。したがって、ULOFシーケンスに対してSASSが無効である場合がある確率で存在する。

たとえSASSが有効であったとしても現象の不確かさを考慮すればある確率で失敗（ここでは冷却材沸騰）に至ることになる。基本的にSASSのような受動的な安全機能は、機器の動的な動作を必要とはせず、プラント異常時の各種パラメータの変動を入力とし物理的原理等に基づく諸現象を利用して、安全機能の実現を図るものである。このような現象のモデル化に関連するパラメータ（要因変数）には、以下のような不確定性を伴う。

- ・自然現象のゆらぎや製造時の誤差等の本質的に避けられることのできないゆらぎ
- ・関連パラメータや設計モデル（解析モデル）等に関する不確かさ（知識に関する不確かさ）

例えば、ULOF時のSASSに対する要因変数としては、図1.2に示すように以下のようなパラメータを考慮する必要がある。

- ・SASS切り離し温度
- ・電磁石温度応答時定数
- ・冷却材輸送遅れ時間
- ・SASS隣接集合体出口温度
- ・冷却材反応度温度係数
- ・ドブブラ反応度係数
- ・炉心流量半減時間

これらのパラメータには不確かさが存在することから、要因変数が取りえる値の組み合わせによっては受動的な安全機能の効果が適切に発揮されない場合がある確率で存在する。この確率をSASSの失敗確率とする（(3-2) 式中のSSの定量値）。このような現象論的不確かさに係わる機能の信頼度評価を以下の手順により評価する。

- (1) プラント過渡応答解析結果等から、要因変数と基準変数との関係を表わす多変数関数式  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  を最小2乗法を用いて導出。
- (2) 要因変数の確率分布（分布型、平均値や標準偏差等の確率分布パラメータ）を設定する。
- (3) モンテカルロ法により  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の不確かさに対する  $y$  の不確かさ解析を行って  $y$  がある領域 ( $a < y$ ) に存在する確率を導出し、失敗確率とする。

現象の不確かさに基づくSASSの作動失敗確率は、GEM反応度の大きさ、ポンプモーター運転の有無の条件に応じてプラント過渡応答挙動に緩急の差異が生ずることにより、その確率値も変動する可能性があるが、本評価ではULOF型の事象に対する失敗確率として予備的な評価結果の値（GEMなし炉心での予備的な動特性解析データを基にして、上述の手法によりSASSの作動失敗確率を導出したもの）を参考に0.015を一律に適用した。

SASSを考慮しない場合のULOF事象シーケンスのカットセットに対してSASSが有効となるシーケンスを選び出してSASSによるバックアップ効果を考慮し、炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を再評価した。表3.5は表3.1の結果に対してSASSの効果を考慮して再計算した結果である。表3.6は、全ての事故シーケンスにおいて原子炉手動トリップ操作が可能であるとした場合にSASSの効果を組み合わせて評価したものである。

以上の検討を基に、イベントツリー上でのSASSの分岐確率は、以下のように計算される。ポンプモーター起動成功、失敗確率は、3. 2. 2で述べたようにシーケンスの種類（通常のシーケンス、SASSを考慮した場合、SASSと手動トリップ操作を考慮した場合）に応じて、発生割合を求めて評価した。

シーケンスHのSASS失敗確率

$$\begin{aligned} & \{ \text{ULOF事象} * \text{SASS失敗} \text{ 発生頻度} \} / \{ \text{ULOF事象発生頻度} \} \\ & = \text{SASSを考慮したULOF発生頻度} / \text{ULOF発生頻度} \\ & = 5.1\text{E-}11 / 3.1\text{E-}9 \\ & = 0.017 \end{aligned}$$

シーケンスFのSASS失敗確率

$$\begin{aligned} & ( \text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗} * \text{SASS失敗} ) / ( \text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗} ) \\ & = \text{SASSを考慮したULOF発生頻度} * \text{PM起動失敗} / ( \text{ULOF事象} * \text{PM起動失敗} ) \\ & = 1.6\text{E-}11 / 1.0\text{E-}9 \\ & = 0.015 \end{aligned}$$

シーケンスDのSASS失敗確率

表3.5 起回事象とATWS事故シーケンスカテゴリ (SASSを考慮した場合)

起回事象分類と起回事象発生頻度 (- /ry)			ATWS事故シーケンスと発生頻度* (- /ry) 及び事故カテゴリ							
			/SM * RM * /SB * RB		/SM * RM * SB		SM * /SB * RB		SM * SB	
I01	正の反応度挿入	2.8E-02	4.0E-14	UTOP-LOF	1.9E-12	UTOP-LOF	1.4E-13	UTOP-LOF	1.1E-10	UTOP
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-03	2.3E-15	ULOPI	1.2E-13	ULOPI	9.7E-15	ULOPI	5.0E-13	ULOPI
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-04	1.0E-15	ULOF	4.9E-14	ULOF	4.4E-15	ULOF	2.1E-13	ULOPI
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	6.8E-12	ULOF	5.9E-14	ULOF	3.9E-12	ULOF
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ)	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	6.8E-12	ULOF	5.9E-14	ULOF	3.9E-12	ULOF
I08	1次主冷却系逆止弁閉 (1ループ)	3.2E-03	4.6E-15	ULOF	3.0E-13	ULOF	2.6E-15	ULOF	1.7E-13	ULOF
I09	2次主冷却系流量減少	4.9E-01	7.1E-13	ULOF	1.6E-12	ULOF	4.0E-13	ULOF	9.1E-13	ULOHS
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ)	5.1E-02	7.3E-14	ULOF	1.7E-13	ULOF	4.2E-14	ULOF	9.5E-14	ULOHS
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-03	7.6E-15	ULOF	1.7E-14	ULOF	4.3E-15	ULOF	9.9E-15	ULOHS
I12	外部電源喪失	5.2E-02	7.5E-14	ULOF	1.7E-13	ULOF	4.3E-14	ULOF	9.7E-14	ULOF
I13	給水流量喪失	3.1E-01	4.5E-13	ULOF	2.1E-11	ULOF	1.7E-12	ULOF	8.2E-11	ULOHS
I14	タービントリップ	1.9E-01	2.7E-13	ULOF	6.2E-13	ULOF	1.6E-13	ULOF	3.5E-13	ULOHS
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03	9.8E-15	ULOF	4.6E-13	ULOF	3.8E-14	ULOF	1.8E-12	ULOHS
I16	局所的燃料破損	3.0E-04	4.3E-16	ULOF	3.1E-16	ULOF	2.0E-16	ULOF	8.4E-12	Local Fault
I18	原子炉トリップ	5.7E-01	8.2E-13	ULOF	-	-	-	-	-	-

ULOFシーケンス カットセット別発生頻度 (- /ry)	/SM * RM * /SB * RB	/SM * RM * SB	SM * /SB * RB	SM * SB	合計
		2.6E-12	3.8E-11	2.5E-12	8.1E-12

SM: 主炉停止系トリップ遮断器開失敗、SB: 後備炉停止系トリップ遮断器開失敗、RS: 主炉停止系制御棒挿失敗、RB: 後備炉停止系制御棒挿失敗

\* 局所的燃料破損 以外の起回事象では手動トリップに期待していない。

表3.6 起回事象とATWS事故シーケンスカテゴリ(全ての事象シーケンスにてSASSと手動トリップが考慮できるとした場合)

起回事象分類と起回事象発生頻度 (- /ry)			ATWS事故シーケンスと発生頻度 (- /ry) 及び事故カテゴリ							
			/SM * RM * /SB * RB		/SM * RM * SB		SM * /SB * RB		SM * SB	
I01	正の反応度挿入	2.8E-02	4.0E-14	UTOP-LOF	3.0E-14	UTOP-LOF	1.7E-14	UTOP-LOF	7.2E-13	UTOP
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-03	2.3E-15	ULOPI	1.8E-15	ULOPI	1.0E-15	ULOPI	2.4E-15	ULOPI
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-04	1.0E-15	ULOF	7.7E-16	ULOF	4.5E-16	ULOF	1.1E-15	ULOPI
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	8.8E-14	ULOF	4.3E-14	ULOF	1.1E-13	ULOF
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	7.2E-02	1.0E-13	ULOF	8.8E-14	ULOF	4.3E-14	ULOF	1.1E-13	ULOF
I08	1次主冷却系逆止弁閉(1ループ)	3.2E-03	4.6E-15	ULOF	3.9E-15	ULOF	1.9E-15	ULOF	4.9E-15	ULOF
I09	2次主冷却系流量減少	4.9E-01	7.1E-13	ULOF	3.6E-13	ULOF	2.9E-13	ULOF	6.6E-13	ULOHS
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	5.1E-02	7.3E-14	ULOF	3.8E-14	ULOF	3.0E-14	ULOF	6.8E-14	ULOHS
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-03	7.6E-15	ULOF	3.9E-15	ULOF	3.2E-15	ULOF	7.1E-15	ULOHS
I12	外部電源喪失	5.2E-02	7.5E-14	ULOF	3.9E-14	ULOF	3.1E-14	ULOF	7.0E-14	ULOF
I13	給水流量喪失	3.1E-01	4.5E-13	ULOF	3.3E-13	ULOF	1.9E-13	ULOF	4.6E-13	ULOHS
I14	タービントリップ	1.9E-01	2.7E-13	ULOF	1.4E-13	ULOF	1.1E-13	ULOF	2.5E-13	ULOHS
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03	9.8E-15	ULOF	7.3E-15	ULOF	4.2E-15	ULOF	1.0E-14	ULOHS
I16	局所的燃料破損	3.0E-04	4.3E-16	ULOF	3.1E-16	ULOF	2.0E-16	ULOF	8.4E-12	Local Fault
I18	原子炉トリップ	5.7E-01	8.2E-13	ULOF	-	-	-	-	-	-

ULOFシーケンス カットセット別発生頻度 (- /ry)	/SM * RM * /SB * RB	/SM * RM * SB	SM * /SB * RB	SM * SB	合計
		2.6E-12	1.1E-12	7.6E-13	3.0E-13

SM: 主炉停止系トリップ遮断器開失敗、SB: 後備炉停止系トリップ遮断器開失敗、RS: 主炉停止系制御棒挿失敗、RB: 後備炉停止系制御棒挿失敗

{ ULOF事象\*PM起動成功 \* 手動トリップ\*失敗 \* SASS失敗 発生頻度 }

／ { ULOF事象 \* PM起動成功 \* 手動トリップ\*失敗 発生頻度 }

= { 手動トリップ操作、SASSを考慮したULOF発生頻度×PM起動成功 }

／ { 手動トリップ操作を考慮したULOF発生頻度×PM起動成功 }

=4.2E-12 / 7.0E-11

= 0.060

SASSは「後備炉停止系のトリップ遮断器開失敗」のバックアップであり、シーケンス発生頻度に対する「後備炉停止系のトリップ遮断器開失敗」のFussell-Vesely重要度は、ポニーモータ起動や原子炉手動トリップ操作の成功・失敗に依存して変化する。従って、E/T上先行する「ポニーモータ起動」及び「原子炉手動トリップ操作」の成功・失敗に関連してSASSの炉停止に対する有効性が異なることになり、SASSによる炉停止失敗の分岐確率は、事故シーケンスに応じて異なった値となっている。



### 3. 3 評価結果

以上の仮定、想定条件の基に導出された分岐確率、および冷却材沸騰に至るシーケンスの条件付き確率（ULOF発生時）を図3.4のイベントツリー中に記載した。予備的な評価ではあるが、GEMとSASSを併用した本炉心では、ULOF発生時であっても冷却材沸騰に至るシーケンスの割合を $10^{-3}$ のオーダーにまで低減できるとの見通しが得られた。

本研究は、評価の目的で述べているように、受動的安全設備を考慮したULOF初期段階のシーケンス発生頻度の定量化手法の整備を目的として実施したものであり、評価はあくまでも予備的なものである。今後、より詳細かつ定量的な評価を実施していくにあたっては、本評価で整備されたシステム解析モデルに加えて、以下の各項目についてより詳細な検討を進めていく必要がある。

#### ○受動的安全設備の信頼度

ULOF事象発生時のGEMによる負の反応度投入量とその不確かさ幅については、炉心核計算の評価精度向上、臨界集合体による実験結果、さらには炉心装荷時の反応度測定試験の効果等を考慮して設定していく必要がある。ULOF事象発生時のSASS自身の失敗確率（現象論的不確かさに起因する失敗確率）に対しては評価結果の信頼性をより高めていく必要がある。また、本評価で想定した集合体外のSASS以外にも集合体内SASS等のような設計の異なる種々の自己作動型炉停止機構の概念が提案されており、今後の設計動向に対応して評価を進めていくことが重要である。

#### ○GEMによる沸騰開始時刻遅延効果と原子炉手動トリップ操作

GEMの設置によって炉心冷却材の沸騰開始時刻が遅延する場合の運転員による原子炉手動トリップ操作の効果をより現実的に評価していく必要があると考えられる。本評価では、炉心冷却材の沸騰開始時刻については、中間熱交換器の2次系側を保守的に断熱条件と想定したプラント過渡応答評価結果を基にしている。起因事象の種類によっては、中間熱交換器から2次主冷却系、蒸気発生器、そして水・蒸気系への熱輸送パス、もしくはこれらの系統の熱容量を考慮することが可能である。そうであれば炉心部での冷却材沸騰開始時刻が更に遅くなることとなり、原子炉手動トリップ操作に関連するヒューマンエラー確率がより低下する可能性がある。また、原子炉トリップ手動トリップ操作が可能となるためには3ループ全てのボニーモータ起動に成功していなければならないと想定し、主冷却系ループからの漏洩等の起因事象に対しては原子炉トリップ手動トリップ操作は期待できないとしたが、より現実的なプラント過渡応答解析を行えば、2ループボニーモータ運転でも原子炉トリップ手動トリップ操作に必要な時間を得ることができるということになるかもしれない。さらに、原子炉手動トリップ操作のヒューマンエラーの評価に際しては、運転員がどのプラントパラメータにより状況を判断して手動トリップ操作を実施することになるのか等のシナリオの内容をより具体的に検討していく必要がある。

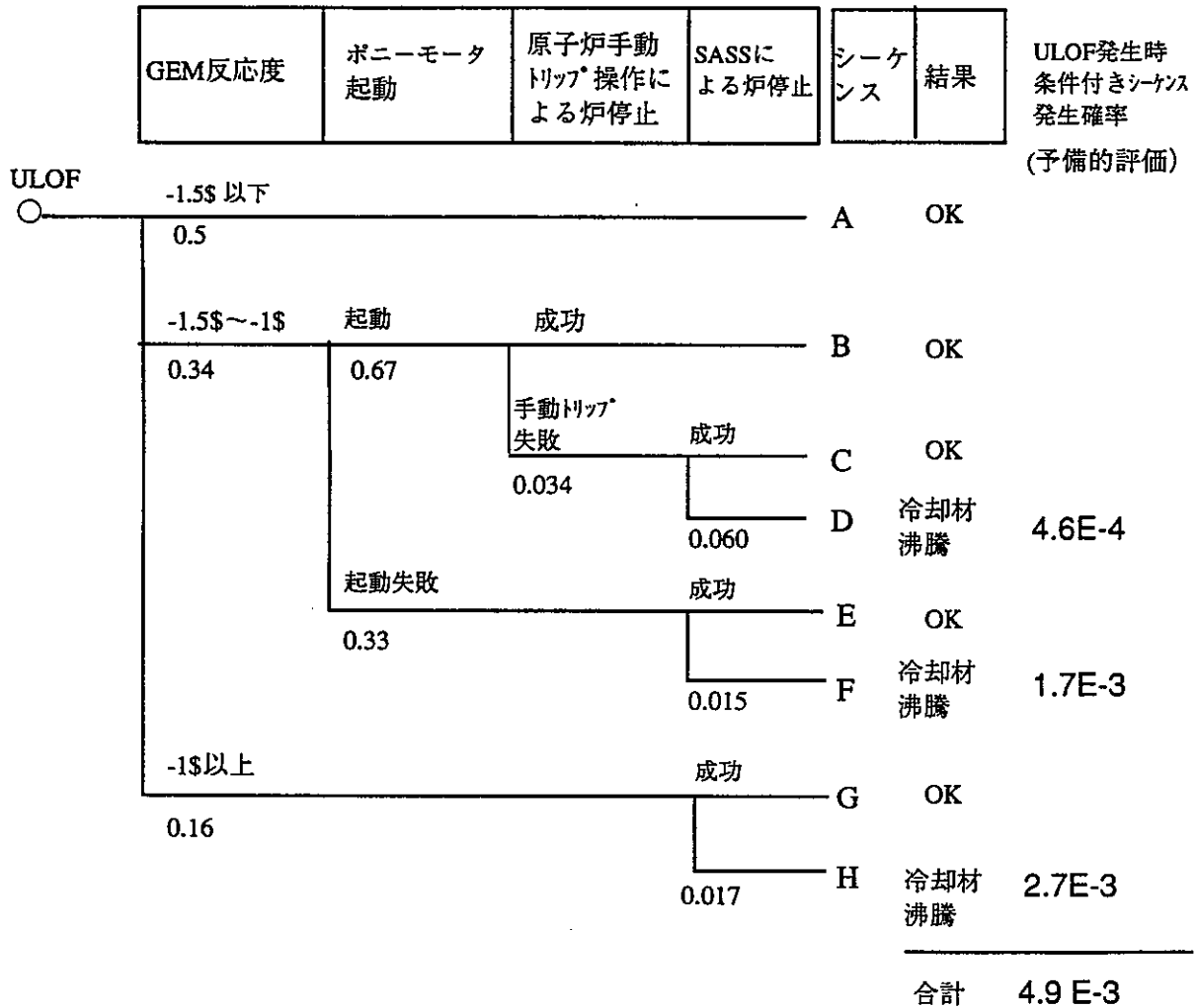


図3.4 大型炉ULOF事象初期段階のイベントツリーと分岐確率

## 4. まとめ

受動的安全機能を考慮したPSA評価手法の確立を目的として、電気出力60万kWe、炉心周辺部に1層分のガス膨張機構（GEM）集合体、後備炉停止系にキュリー点方式自己作動型炉停止系（SASS）を設置した高速炉プラントに対するULOF事象初期段階のイベントツリー（E/T）を事象推移の解析結果を基に構築し、モデルプラントを参考に作成した安全保護系や制御棒等から構成される原子炉停止系やボニーモータ起動に関連するフォールトツリーと合わせることで、冷却材沸騰に至る条件付きシーケンス発生確率の予備的な評価までを実施した。

GEMによる負の反応度効果とボニーモータ流量との組み合わせにより、沸騰開始までの事象推移が緩慢となって手動原子炉トリップ操作に期待できるパスが発生する。このような事故シーケンスの成功・失敗確率を評価するためには、起因事象、またはULOF事故シーケンスカットセットと「ボニーモータ起動」、「原子炉手動トリップ操作による炉停止」のようなフロントラインシステムとの従属性を適切に評価していくことが重要である。「SASSによる炉停止」の成功・失敗確率についてもULOF事故シーケンスカットセットとの従属性を考慮する必要がある。

予備的な評価ではあるものの、GEMとSASSの併用により、ULOF発生時であっても冷却材沸騰に至るシーケンスの割合を10<sup>-3</sup>のオーダーにまで低減できるとの見通しを得た。また本作業を通じて受動的安全機能を考慮したPSA評価手法のためのシステム解析モデルの整備を図ることができた。

参考文献

- [1] K. Okada, K.Tarutani, K. Shibata, M. Ueta, T. Inagaki, "The Design of a backup reactor shutdown system of DFBR", IAEA-TECDOC-884, 1996.
- [2] 藤田朋子、私信、1998.6
- [3] 日置一雅、栗坂健一、三原隆嗣、「大型高速炉のレベル—1PSA概括評価」、PNC TN9410 93-134、1993.5

表 A1 1 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミニマルカットセット(手動トリップなし)  
 [文献3]

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップなし)
出力領域 中性子束高	検出チャンネル間共通原因校正エラー	9.3E-05
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り	1.6E-05
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
	遮断器1台の故障×論理回路1トレインの故障×6通り	1.6E-08
	論理回路2トレインの独立故障×3通り	9.7E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.2E-04
ナトリウム 蒸気発生器出口 温度高	検出チャンネル間共通原因校正エラー	9.3E-05
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り	3.1E-05
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
	遮断器1台の故障×論理回路1トレインの故障×6通り	1.6E-08
	論理回路2トレインの独立故障×3通り	9.7E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.4E-04
原子炉容器 ナトリウム 液位低	検出チャンネル間共通原因校正エラー	9.3E-05
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り	4.3E-05
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
	遮断器1台の故障×論理回路1トレインの故障×6通り	1.6E-08
	論理回路2トレインの独立故障×3通り	9.7E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.5E-04

表 A2 1 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット(手動トリップなし)  
[文献3]

対象信号		カットセット	発生確率 (手動トリップなし)	
原子炉格納容器床下雰囲気温度高	IHX1次側出口ナトリウム温度高	広域中性子束高	検出チャンネル間共通原因校正エラー	9.3E-05
			(検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × 3通り	3.1E-05
			論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
			継電器の共通原因故障	4.5E-07
			継電器1台の故障×論理回路1トレイン又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×6通り	1.8E-07
			継電器3台の独立故障×8通り	1.0E-15
			合計	1.3E-04
			ナトリウム液位高	ガイドベッセル内漏洩
(検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × 3通り	4.3E-05			
論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07			
継電器の共通原因故障	4.5E-07			
継電器1台の故障×論理回路1トレイン又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×6通り	1.8E-07			
継電器3台の独立故障×8通り	1.0E-15			
合計	1.4E-04			
1次主冷却系流量低				
			(検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル又は論理回路1トレインの故障) × 3通り	8.1E-05
			論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
			継電器の共通原因故障	4.5E-07
			継電器1台の故障×論理回路1トレイン又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×6通り	1.8E-07
			継電器3台の独立故障×8通り	1.0E-15
			合計	1.8E-04

表 A3 2 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミニマルカットセット(手動トリップなし)  
[文献3]

対象信号		カットセット	発生確率 (手動トリップなし)
原子炉容器出口ナトリウム温度高	1次主冷却系循環ポンプ回転数低	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		チャンネル間及び信号間共通原因校正エラー	4.7E-06
		論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
		遮断器1台の故障×論理回路1トレインの故障×6通り	1.6E-08
		第1信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 第2信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 9通り	1.3E-09
		論理回路2トレインの独立故障×3通り	9.7E-10
		遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
		合計	2.1E-05
蒸気発生器出口ナトリウム温度高	タービントリップ	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		チャンネル間及び信号間共通原因校正エラー	4.7E-06
		論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
		遮断器1台の故障×論理回路1トレインの故障×6通り	1.6E-08
		第1信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 第2信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 9通り	1.4E-09
		論理回路2トレインの独立故障×3通り	9.7E-10
		遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
		合計	2.1E-05
手動トリップ	燃料破損検出	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		論理回路2トレインの共通原因故障	1.8E-06
		主炉停止系燃料破損検出チャンネル間共通原因校正エラー ×手動トリップ信号発生失敗	4.7E-07
		合計	# 1.6E-05

# 原子炉手動トリップ操作を考慮している

表 A4 2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット(手動トリップなし) (1/2)

[文献3]

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップなし)
1 次主冷却系流量低 常用母線電圧低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー	4.7E-06
	論理回路 2 トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器 1 台故障×論理回路 1 トレインの故障× 6 通り	2.7E-10
	論理回路 2 トレインの故障× 3 通り	2.4E-10
	論理回路 1 トレインの故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障× 6 通り	2.4E-10
	継電器 1 台の故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障× 6 通り	1.3E-10
	第 1 信号 2 チャンネル故障×第 2 信号 2 チャンネル故障× 3 通り	5.9E-11
	継電器 3 台の独立故障× 8 通り	1.0E-15
	合計	6.1E-06
I H X 1 次側出口ナトリウム温度高 2 次主冷却系流量低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー	4.7E-06
	論理回路 2 トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器 1 台故障×論理回路 1 トレインの故障× 6 通り	9.0E-10
	論理回路 2 トレインの故障× 3 通り	8.3E-10
	論理回路 1 トレインの故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障× 6 通り	5.0E-10
	継電器 1 台の故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障× 6 通り	2.7E-10
	第 1 信号 2 チャンネル故障×第 2 信号 2 チャンネル故障× 3 通り	2.4E-10
	継電器 3 台の独立故障× 8 通り	1.0E-15
	合計	6.1E-06



表 A4 2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット(手動トリップなし) (2/2)

[文献3]

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップなし)
IHX1次側出口ナトリウム温度高 タービン第1段圧力低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー	4.7E-06
	論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器1台故障×論理回路1トレインの故障×6通り	5.7E-10
	論理回路2トレインの故障×3通り	3.3E-10
	論理回路1トレインの故障×第1信号1チャンネル故障× 第2信号1チャンネル故障×6通り	3.2E-10
	継電器1台の故障×第1信号1チャンネル故障× 第2信号1チャンネル故障×6通り	2.7E-10
	第1信号2チャンネル故障×第2信号2チャンネル故障×3通り	2.4E-10
	継電器3台の独立故障×8通り	1.0E-15
	合計	6.1E-06
手動トリップ 燃料破損検出	論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
	後備炉停止系燃料破損検出チャンネル間共通原因校正エラー× 手動トリップ信号発信失敗	4.7E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	後備炉停止系燃料破損検出チャンネル2チャンネルの故障× 手動トリップ信号発生失敗×3通り	7.3E-08
	合計	1.9E-06

表 A5 局所的燃料破損時主・後備共制御棒保持電源遮断失敗 (SM・SB) のミニマルカットセット [文献3]

カットセット	発生確率 (手動トリップなし)
主炉停止系燃料破損検出チャンネル及び後備炉停止系燃料破損 検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ信号発生失敗	2.8E-08
合計	2.8E-08

表 B1 1 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミニマルカットセット (手動トリップあり)  
 (文献[3]の結果を基に、手動トリップを考慮した形に変更)

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
出力領域 中性子東高	検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	4.8E-07
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り×手動トリップ信号失敗	8.3E-08
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	OR論理回路2トレインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トレインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
	遮断器1台の故障 ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗)×6通り	8.6E-09
	(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×3通り*	2.5E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.5E-05
ナトリウム 蒸気発生器出口 温度高	検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	4.8E-07
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り×手動トリップ信号失敗	1.6E-07
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	OR論理回路2トレインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トレインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
	遮断器1台の故障 ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗)×6通り	8.6E-09
	(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×3通り*	2.5E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.6E-05
原子炉容器 ナトリウム 液位低	検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	4.8E-07
	検出チャンネル2チャンネルの独立故障×3通り×手動トリップ信号失敗	2.2E-07
	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
	OR論理回路2トレインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トレインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
	遮断器1台の故障 ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗)×6通り	8.6E-09
	(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×(OR論理回路1トレインの故障+ 2/3論理回路1トレインの故障×手動トリップ信号失敗) ×3通り*	2.5E-10
	遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
	合計	1.6E-05

\*手動トリップ信号はトレイン間で同一

表 B2 1 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット (手動トリップあり)

(文献[3]の結果を基に、手動トリップを考慮した形に変更)

対象信号			カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
原子炉格納容器床下雰囲気温度高	IHX1次側出口ナトリウム温度高	広域中性子束高	検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ*信号失敗	4.8E-07
			(検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × 3通り*	1.6E-07
			論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
			継電器の共通原因故障	4.5E-07
			継電器1台の故障× (論理回路1トレインの故障 又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×手動トリップ*信号失敗) × 6通り	7.7E-10
			継電器3台の独立故障× 8通り	1.0E-15
			合計	2.0E-06
			ナトリウム液位高	ガードベッセル内漏洩
(検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × 3通り*	2.2E-07			
論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07			
継電器の共通原因故障	4.5E-07			
継電器1台の故障× (論理回路1トレインの故障 又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×手動トリップ*信号失敗) × 6通り	8.6E-10			
継電器3台の独立故障× 8通り	1.0E-15			
合計	2.1E-06			
1次主冷却系流量低				
			(検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × (検出チャンネル1チャンネル×手動トリップ*信号失敗 又は論理回路1トレインの故障) × 3通り*	4.2E-07
			論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
			継電器の共通原因故障	4.5E-07
			継電器1台の故障× (論理回路1トレインの故障 又は 検出チャンネル1チャンネルの故障×手動トリップ*信号失敗) × 6通り	1.1E-09
			継電器3台の独立故障× 8通り	1.0E-15
			合計	2.3E-06

\* 手動トリップ信号はトレイン間で同一

表 B3 2 信号期待時主炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SM)のミニマルカットセット (手動トリップあり)

(文献[3]の結果を基に、手動トリップを考慮した形に変更)

対象信号		カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
原子炉容器出口ナトリウム温度高	1次主冷却系循環ポンプ回転数低	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		チャンネル間及び信号間共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	2.4E-08
		OR論理回路2トインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
		遮断器1台の故障 ×(OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)×6通り	8.6E-09
		第1信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 第2信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 手動トリップ信号失敗 ×9通り	6.8E-12
		(OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)× (OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)× 3通り*	2.5E-10
		遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
		合計	1.5E-05
蒸気発生器出口ナトリウム温度高	タービントリップ	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		チャンネル間及び信号間共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	2.4E-08
		OR論理回路2トインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
		遮断器1台の故障 ×(OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)×6通り	8.6E-09
		第1信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 第2信号検出チャンネル2チャンネルの独立故障× 手動トリップ信号失敗 ×9通り	7.3E-12
		(OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)× (OR論理回路1トインの故障+ 2/3論理回路1トインの故障×手動トリップ信号失敗)× 3通り*	2.5E-10
		遮断器3台の独立故障×8通り	3.2E-11
		合計	1.5E-05
手動トリップ	燃料破損検出	遮断器の共通原因故障	1.4E-05
		OR論理回路2トインの共通原因故障 + 2/3論理回路2トインの共通原因故障×手動トリップ信号失敗	9.0E-07
		主炉停止系燃料破損検出チャンネル間共通原因校正エラー ×手動トリップ信号発生失敗	4.7E-07
		合計	1.5E-05

\*手動トリップ信号はトイン間で同一

表 B4 2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット (手動トリップあり) (1/2)

(文献[3]の結果を基に、手動トリップを考慮した形に変更)

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
1 次主冷却系流量低 常用母線電圧低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	2.4E-08
	論理回路 2 トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器 1 台故障×論理回路 1 トレインの故障×6 通り	2.7E-10
	論理回路 2 トレインの故障×3 通り	2.4E-10
	論理回路 1 トレインの故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× ×手動トリップ信号失敗×第 2 信号 1 チャンネル故障×6 通り	1.2E-12
	継電器 1 台の故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×6 通り	6.8E-13
	第 1 信号 2 チャンネル故障×第 2 信号 2 チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×3 通り	3.1E-13
	継電器 3 台の独立故障×8 通り	1.0E-15
	合計	1.4E-06
I H X 1 次側出口ナトリウム温度高 2 次主冷却系流量低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	2.4E-08
	論理回路 2 トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器 1 台故障×論理回路 1 トレインの故障×6 通り	9.0E-10
	論理回路 2 トレインの故障×3 通り	8.3E-10
	論理回路 1 トレインの故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× ×手動トリップ信号失敗×第 2 信号 1 チャンネル故障×6 通り	2.6E-12
	継電器 1 台の故障×第 1 信号 1 チャンネル故障× 第 2 信号 1 チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×6 通り	1.4E-12
	第 1 信号 2 チャンネル故障×第 2 信号 2 チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×3 通り	1.2E-12
	継電器 3 台の独立故障×8 通り	1.0E-15
	合計	1.4E-06

表 B4 2 信号期待時後備炉停止系制御棒保持電源遮断失敗(SB)のミニマルカットセット (手動トリップあり) (2/2)

(文献[3]の結果を基に、手動トリップを考慮した形に変更)

対象信号	カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
IHX1次側出口ナトリウム温度高 タービン第1段圧力低	検出チャンネル及び信号間の共通原因校正エラー×手動トリップ信号失敗	2.4E-08
	論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	継電器1台故障×論理回路1トレインの故障×6通り	5.7E-10
	論理回路2トレインの故障×3通り	3.3E-10
	論理回路1トレインの故障×第1信号1チャンネル故障× 第2信号1チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×6通り	3.2E-10
	継電器1台の故障×第1信号1チャンネル故障× 第2信号1チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×6通り	1.4E-12
	第1信号2チャンネル故障×第2信号2チャンネル故障×手動トリップ信号失敗×3通り	1.2E-12
	継電器3台の独立故障×8通り	1.0E-15
	合計	1.4E-06
手動トリップ 燃料破損検出	論理回路2トレインの共通原因故障	9.0E-07
	後備炉停止系燃料破損検出チャンネル間共通原因校正エラー× 手動トリップ信号発信失敗	4.7E-07
	継電器の共通原因故障	4.5E-07
	後備炉停止系燃料破損検出チャンネル2チャンネルの故障× 手動トリップ信号発生失敗×3通り	7.3E-08
	合計	1.9E-06

表 B5 局所的燃料破損時主・後備共制御棒保持電源遮断失敗 (SM・SB) のミニマルカットセット

(文献[3])

カットセット	発生確率 (手動トリップあり)
主炉停止系燃料破損検出チャンネル及び後備炉停止系燃料破損 検出チャンネル間共通原因校正エラー×手動トリップ信号発生失敗	2.8E-08
合計	2.8E-08