

# 「もんじゅ」の原子炉停止系の設計評価

## Design Evaluation of MONJU Reactor Shutdown Systems

高速増殖炉開発本部  
建設計画部

### 1. まえがき

原子炉停止系は、緊急時に異常を検知し制御棒を切り離すことにより、炉心の核分裂反応を停止し、臨界未満に維持する役割を果たすものである。そのため、これ迄実施してきたもんじゅの設計や、制御棒駆動機構等の試作、性能試験を通じ、その性能の向上を計りつつ、十分注意深く、かつ余裕ある設計をしてきた。

ここでは、原子炉停止系の設計を確認するため、いろいろな角度から系全体について設計評価を行った。その結果について述べたものである。

### 2. 原子炉停止系の概要

#### 2-1 反応度制御能力

原子炉の反応度制御は19本の制御棒によって行う。この制御棒は3本の微調整棒と10本の粗調整棒からなる主炉停止系と、6本の後備炉停止棒で構成する後備炉停止系の2系統に分類される。

2系統とも独立に原子炉を停止でき、かつ、主炉停止系はワンロードスタックを仮定しても、低温状態で臨界未満を維持できる能力を有している。

図1に制御棒の構成と炉心内配置を示す。

表1に制御棒価値と反応度バランスを示す。

#### 2-2 制御棒駆動装置

制御棒駆動装置は炉心上部機構上面に据付けられ、制御棒ラッチ機構が炉心にある制御棒のつかみ離しを行う。

制御棒駆動装置は大きく分けて次の3つの機構により構成されている。

- (1) 駆動部 ケーシング、駆動モータ、減速機、ボールスクリュ、位置検出器及び電磁石等の部分
- (2) 動作部 制御棒をつかんだり、切離したりする制御棒ラッチ機構
- (3) 加速機構 ガス圧、スプリング力により、制御棒を加速そう入させる部分

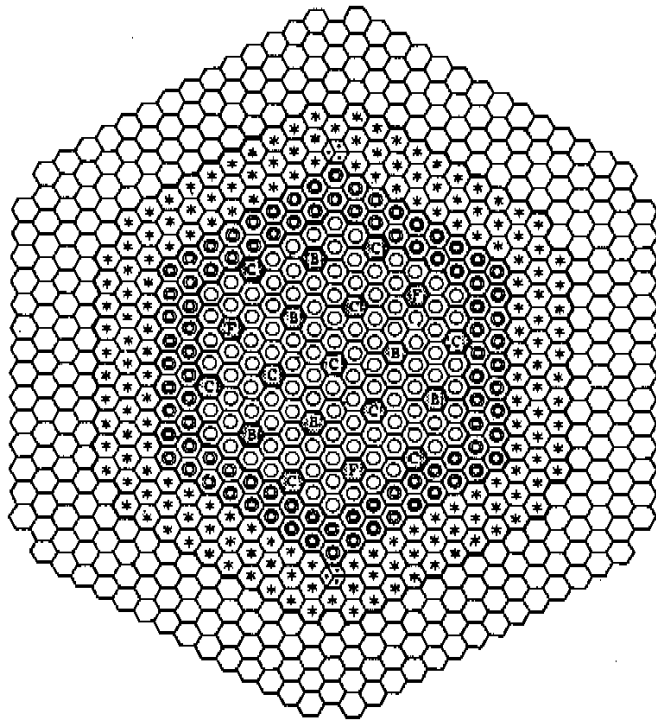
#### 2-3 安全保護系

図2に原子炉保護設備の概略構成を示す。

計測チャンネルは1つの検出変量毎に基本的に3チャンネル設ける。それぞれの計測チャンネルは検出端、信号変換器、演算器、及安定器等で構成する。

原子炉トリップしゃ断器には、試験に備えてバイパスしゃ断器を並列に設置する。

1つの検出変量に対する3つの計測チャンネルの出力はA及びB 2系統の2 Out of 3 ロジックへ分岐する。2 Out of 3 ロジックの出力はA及びBトレイン共に2回路で構成し、それぞれ



炉心構成要素		記号	数量
炉心燃料集合体	内側炉心	⊙	108
	外側炉心	⊗	90
ブランケット燃料集合体		⊛	172
主炉停止系	微調整棒	⊕	3
	粗調整棒	⊖	10
後備炉停止系	後備炉停止棒	⊗	6
中性子源		⊙	2
中性子しゃへい体		⊖	316
サーベイランス集合体		⊖	8

図1 炉心配置説明図

表1 反応度バランス

$\times 10^{-3} \Delta k/k$

炉心		初装荷炉心		平衡炉心	
		主炉停止系	後備炉停止系	主炉停止系	後備炉停止系
反応度バランス	原子炉停止系				
	制御棒	調整棒	後備炉停止棒	調整棒	後備炉停止棒
所要反応度	出力補償	1.9	1.9	1.7	1.7
	燃焼補償	2.5	—	2.6	—
	運転余裕	0.3	—	0.3	—
	炉の反応度の誤差吸収	1.0	—	1.0	—
	所要反応度の合計	5.7	1.9	5.6	1.7
制御棒価値		7.1*	5.9	7.0*	5.8
余裕反応度		1.4	4.0	1.4	4.1

\* 最大反応度価値を持つ制御棒1本が、全引抜位置のままそう入できないとした場合。

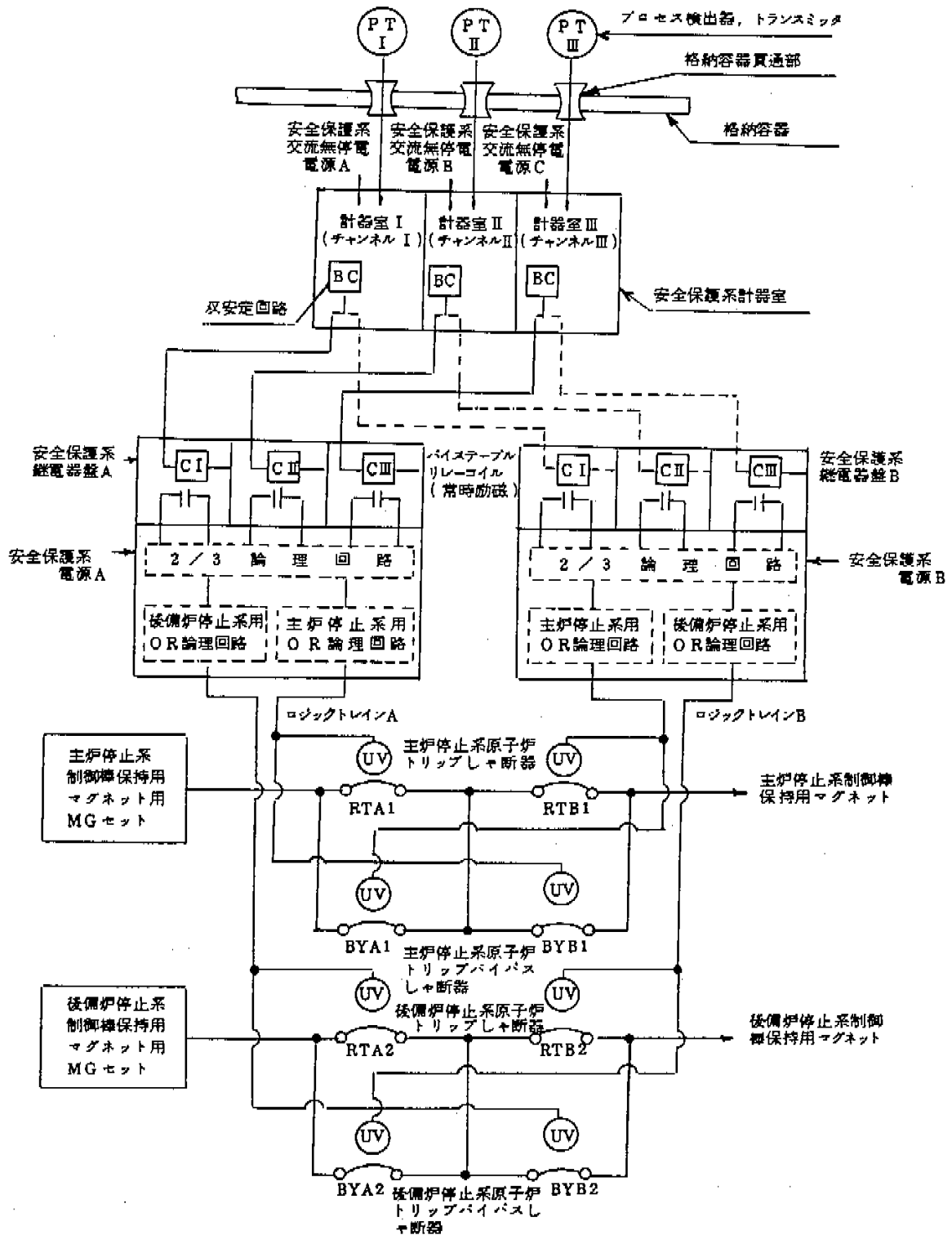


図2 原子炉保護設備説明図 (2 out of 3 の場合)

OR回路を経由して原子炉トリップしゃ断器を開く。その結果制御棒保持マグネットへの給電がしゃ断され制御棒が落下する。

### 3. 多様性、多重性、フェールセーフ、共通原因故障対策

#### 3-1 制御棒及び制御棒駆動機構の多様性

もんじゅには主炉停止系と後備炉停止系の2種類がある。主炉停止系はその機能として反応度制御機能と緊急炉停止機能とを持つが、後備炉停止系は緊急炉停止機能のみである。もんじゅでは主炉停止系と後備炉停止系との機能が異なることを考慮して構造的にも多様性を持たせるように設計されている。その主なものを次に示す。

##### (1) スクラム方式

主炉停止系はスクラム信号により、電磁石が消磁されると駆動軸が落下する。この時駆動軸は制御棒を切離さない構造となっているので制御棒と駆動軸が一体で落下する。

一方後備炉停止系は、電磁石が消磁されると駆動軸と制御棒の連結が解かれ制御棒のみが炉心にそう入される。主炉停止系は落下体重量が大きく、しゅう動抵抗に強いことが、

後備炉停止系は、落下体の長さが短かく変位に強いことが、特徴である。

##### (2) スクラム加速方式

主炉停止系は炉心上部機構上面に設置された駆動機構部にあるアルゴンガス圧によりスクラム時に駆動軸を加速することができる構造となっている。

後備炉停止系は上部案内管内のスプリングにより加速する構造となっている。

##### (3) スクラム前の位置

主炉停止系は、スクラム時のストロークが短かく、直ちに負の反応度効果があらわれる。後備炉停止系は通常時炉心の上部で待機しており、 $B^{10}$ 濃縮度が高いため、十分な反応度値を有している。そのためスクラム時には大きな反応度がそう入される。

##### (4) 制御棒の構造

主炉停止系は駆動軸と制御棒が一体で落下するので、制御棒の上部にある延長軸は駆動軸と共に容易に撓めるように柔軟な構造となっている。

後備炉停止系は制御棒の延長軸と、吸収体の間にジョイントを設けて、地震時等の変位を吸収する構造となっている。

表2 各国の炉停止系比較

項	目	もんじゅ	CRBR	SNR300	S. Phenix
1 構成本数	主炉停止系	微粗 3 10	9	9	SCP1 11 SCP2 10
	後備炉停止系	6	6	3	3
2 スクラム方式	主炉停止系	制御棒・駆動軸 一体落下	同 左	同 左	同 左
	後備炉停止系	制御棒のみ落下	同 左	制御棒・駆動軸 一体引上げ	制御棒のみ落下
3 加速方式	主炉停止系	ガス圧	スプリング	重 力	重 力
	後備炉停止系	スプリング	冷却材圧力	スプリング	重 力
4 スクラム前の位置	主炉停止系	部分的に炉心に 挿入	同 左	同 左	同 左
	後備炉停止系	全 引 抜	同 左	同 左	同 左
5 制御棒の構造	主炉停止系	一 体 構 造	同 左	同 左	同 左
	後備炉停止系	フレキシブル	一 体 構 造	フレキシブル	フレキシブル
6 設計・製作メーカ		主・後で異なる	同 左	同 左	同 左

注) PFR, Phenixは独立2系統の考え方が必ずしも明確でないため省略した。

(5) 設計製作メーカー

微調整棒駆動機構、粗調整棒駆動機構及び後備炉停止棒駆動機構はそれぞれ設計、製作メーカーが異なる。そのためメカニズムの設計自体が各社独自の工夫をこらしたものであり、使用部品や部品の取付け方法も異なる。従って両方の停止系に共通の破損が生じたり、メンテナンス時に共通のミスを犯すことがない。

以上述べたように、主炉停止系と後備炉停止系の構造を変えることにより多様性を持たせている。

海外においても高速炉の場合、2系統の制御棒によって原子炉停止系を構成しており、各国とも原子炉構造等との関連を配慮しつつ、それぞれ多様性を持たせるように工夫している。その工夫の主なもの次のように整理できる。

- (1) 制御棒と制御棒駆動軸とが一体落下か制御棒のみ落下かというスクラム方式の違い。
- (2) スクラム加速方式として自重落下か、スプリング加速か、ガス加速か、流体加速かという違い。
- (3) スクラム時に下方落下か上方引上げかという違い。
- (4) 制御棒の構造が一体構造か分割構造かという違い。

表2に「もんじゅ」と外国炉の炉停止系の比較を示す。

表からわかるように、「もんじゅ」の炉停止系の構成は諸外国のFBRと比べて遜色のない多様性を有している。

3-2 多重性

もんじゅでは原子炉停止系の信頼性を向上させるため次のような多重性をもたせている。

(1) 回路の多重性

検出部は基本的に3チャンネルで構成する。各チャンネルの信号はA、Bの2トレインに送られるが、各トレインは論理回路出力以後で更にそれぞれ2回路に分割される。チャンネル相互間、トレイン相互間は電気的、物理的に分離をはかって独立性を維持している。

(2) トリップしゃ断器

主炉停止系、後備炉停止系各々にA、Bトレインに対応して2つの原子炉トリップしゃ断器を直列に設けており、いずれか一方のしゃ断器の開で制御棒が炉心にそう入される。

(3) 炉停止系

主炉停止系若しくは後備炉停止系のいずれか一方が作動することにより原子炉を停止できる。

3-3 フェイルセーフ

電源喪失に対して系が安全側に動作するような次のような設計としている。

- (1) 論理回路はバイステープルリレーコイル電源OFFで安全保護動作を開始する。従ってバイステープルリレーコイルの電源が喪失した時は、保護動作信号を発する。
- (2) 原子炉トリップしゃ断器は不足電圧コイル電源OFFで開となる。従って不足電圧コイルの電源が喪失した時は、トリップしゃ断器が開となる。
- (3) 制御棒は、原子炉トリップしゃ断器開により、制御棒保持マグネットへの電流がしゃ断され炉心にそう入される。従って制御棒マグネット電源が喪失した時は制御棒は落下する。

3-4 共通原因故障に対する対策

共通原因故障の要因は文献等により種々指摘されている。これらの要因を分類整理し、この分類に基づいて原子炉停止系の設備について実施されている対策をチェックした。

表3に共通原因故障と防止対策を示す。

4. 原子炉停止系の故障評価

安全性の確保には、まず起因となる異常そのものの発生の防止、そして異常の拡大を抑制する機器系統の故障を防止することが最も重要である。このためには、工学的な洞察に基づき関連する機器系統の故障原因をできる限り具体的に抽出し、故障の影響を分析した上でその故障の防止対策が設計、製造、据付、試験、運転を通じて十分であるか否かをチェックする事が一つの有力な手段である。

かかる観点から、原子炉停止系について故障評価を行った結果以下のような防止対策が有効

に働いていることがわかる。

#### 4-1 制御棒及び制御棒駆動機構

- (1) 変形、異物、固着等の異常による制御棒  
そう入性への悪影響に対しては、設計上、  
材料選択上、製作上の配慮によって対策が  
とられている。
- (2) 設計製作におけるQAに特に注意を払  
う。
- (3) 制御棒の試作試験を既に実施しており、  
試験結果を十分反映して実機の設計が行わ  
れている。
- (4) 実機製作時には、作動部単体の動作試験  
据付調整試験を行うことにより、初期故障  
は排除される。
- (5) 主炉停止棒駆動機構と後備炉停止棒駆動  
機構は、可能な限り作動原理を別にして、  
共通原因故障の排除に努めている。(落下

方式、スクラム加速方式等)

#### 4-2 安全保護系

- (1) 各検出変量ごとにチャンネルは2~3チ  
ャンネルの多重性を有しており、信頼性を  
高めている。
- (2) 保護を要する異常な過度事象ごとに検出  
変量若しくは、検出方式を変えて、多様性  
を具備させ、かつ各事象ごとに少なくとも  
2つ以上の検出変量若しくは、検出方式に  
よってスクラムが可能のようにしている。
- (3) 計器の動作状態は、必要に応じ中央制御  
室に表示すると共に、異常が生じれば、警  
報を発するようにしている。
- (4) 検出端を除き、最終アクチュエータ(ス  
クラムしゃ断器)まで炉運転中に試験が可  
能なように設計している。
- (5) 双安定器の入力は計算機によって比較し、

表3 共通原因故障と防止対策

分 類	要 因 (具体例)	防 止 対 策 例
環境あるいは環境の 変化を原因とするもの	自然現象(地震) (落雷) 機械的要因(ミサイル、爆発、落 下物) 熱的要因(火災) その他(放射線、振動、温度)	耐震設計 避雷設備。接地設備。電源の多様性 発生の可能性のある区画に設置しない。系統の物理的分離 発火源のある区画に設置しない。系統分離・ケーブル選定・ 配線を適切に行う。 これらに耐える設計とする。適切な防護手段を講じる。
共通のエネルギー源 あるいは信号源を原 因とするもの	共通電源(電源喪失) 共通信号源(共通の励磁源 共通の計装タップ)	フェールセーフな設計。電気的、物理的に独立性を有する 設計。過電圧、不足電圧、周波数変動等に耐える設計。 共用しない。(記録計等に信号を分岐する場合は絶縁増幅 器により隔離する。)
設 計 ミ ス	共通の検出変量、共通の検出原理 共通の信号処理、共通の作動原理	検出変量の多様性、実績のあるものの使用、確性試験、エ ージング等により極力設計ミスを排除する。
製 造、工 事 ミ ス	製 造 ミ ス 工 事 ミ ス	実績のある計器、技術の使用。製造工程の管理。確性試験。 エージング、作業管理(識別マーク等)。工事の管理(基準、 法律との適合性等)
運 転、試 験、保 守、 補 修 ミ ス	運 転 ミ ス 試 験 ミ ス 保 守、補 修 ミ ス	自動化。誤操作防止対策(インタロック、警報、表示) 2チャンネル同時、2トレイン同時にテストできない設計。 誤操作防止対策。試験要領を定め管理する(複数の要員で クロスチェックを行う等) 保修要領を定め管理する。多様性のある設計とする。

偏差大で警報が出るようにし、検出端の故障の発見に努めている。

(6) 各検出端及び各トレンに使用するケーブルは、難燃性ケーブルを使用すると共に、

十分な分離距離をとるなどして物理的な独立性を確保している。保護系の盤も各トレンごとに分離独立させている。

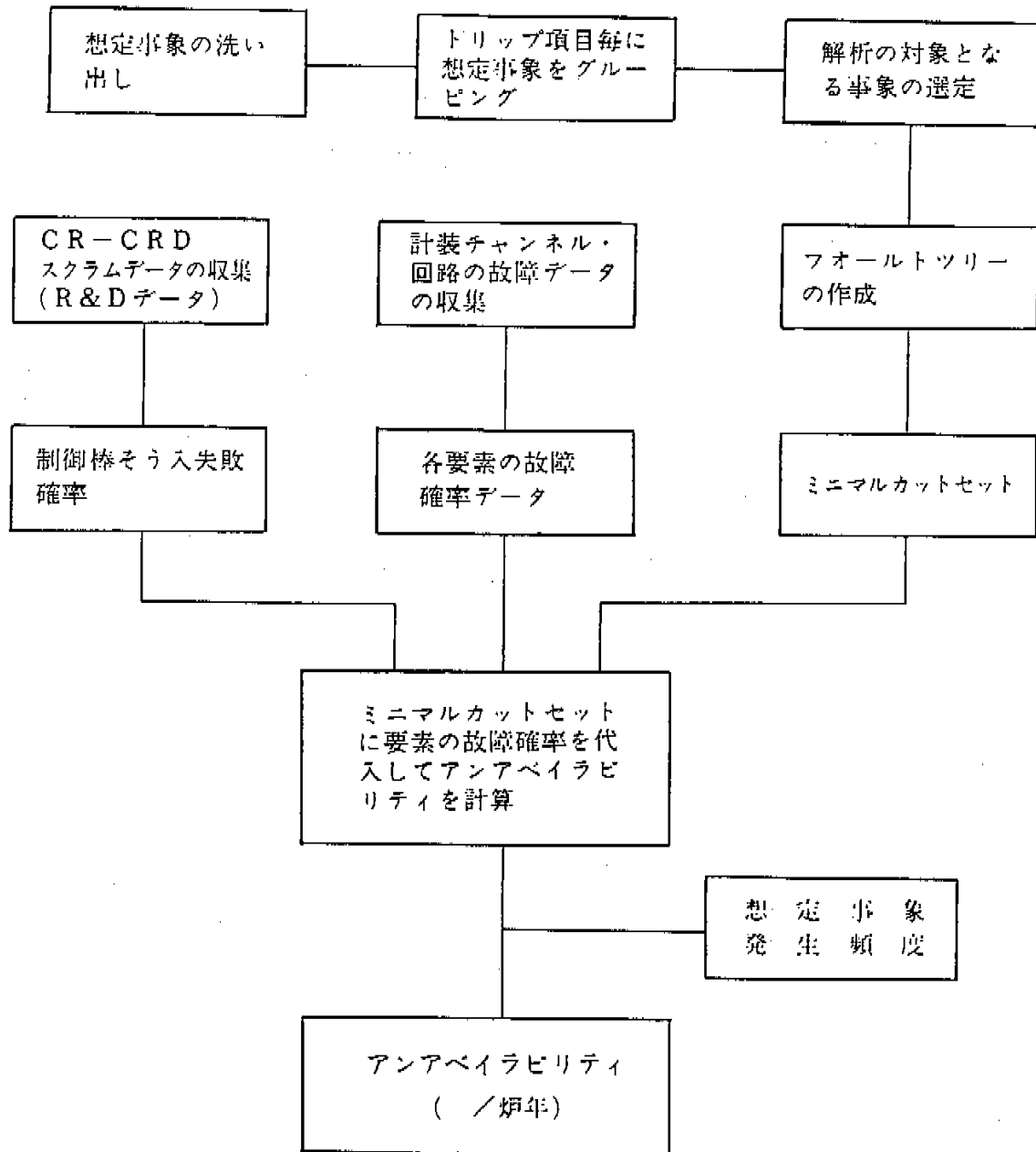


図3 信頼性解析の手順

## 5. 原子炉停止系の信頼性解析

これまで、もんじゅの原子炉停止系は多様性、多重性、独立性を備えた信頼度の高いシステムであることを定性的に示したが、ここでは原子炉停止系を構成する個々の機器に対する故障データをもとに確率的評価手法を用いて、信頼性解析を行い、もんじゅの原子炉停止系の信頼性が高いことを示す。

信頼性解析の手順を図3に示す。

## 5-1 信頼性解析の条件

- (1) 原子炉保護設備の構成を図2に示す。
- (2) 対象事象と原子炉トリップ信号を表4に示す。
- (3) 機械的故障による制御棒のそう入失敗確率はR&Dの結果を用いて算出する。これまでR&Dにおいて制御棒がそう入に失敗した例はない。
- (4) 原子炉停止系構成要素の故障データは極力保守的なものを用いる。
- (5) 主炉停止系、後備炉停止系共に1本がそう入に失敗しても原子炉を停止できる応度価値を有する。

## (6) 試験時の取扱い

- i) 計測チャンネル部の試験は1チャンネルずつ行う。試験中のチャンネルの出力を下トリップ側にしておき、ロジックとしては2 out of 3 から 1 out of 2 にする。これにより通常運転時より安全側の構成となるが、解析上はこの効果を無視する。
  - ii) ロジック部（原子炉トリップしゃだん器を含む。）の試験は片トレんずつ行う。Aトレイン試験時にはAトレインバイパスしゃ断器（BYA1、BYA2）を閉しておきPTA1、PTA2は開としておく。ただし、Bトレインからスクラム信号が発生すれば、バイパスしゃ断器は開となり原子炉はスクラムする。
  - iii) 試験は1ヶ月ごとに行うものとし、平均アンアベラビリティを算出する。
- (7) 故障率の確率分布は、誤差係数3の対数正規分布とする。

## 5-2 解析方法

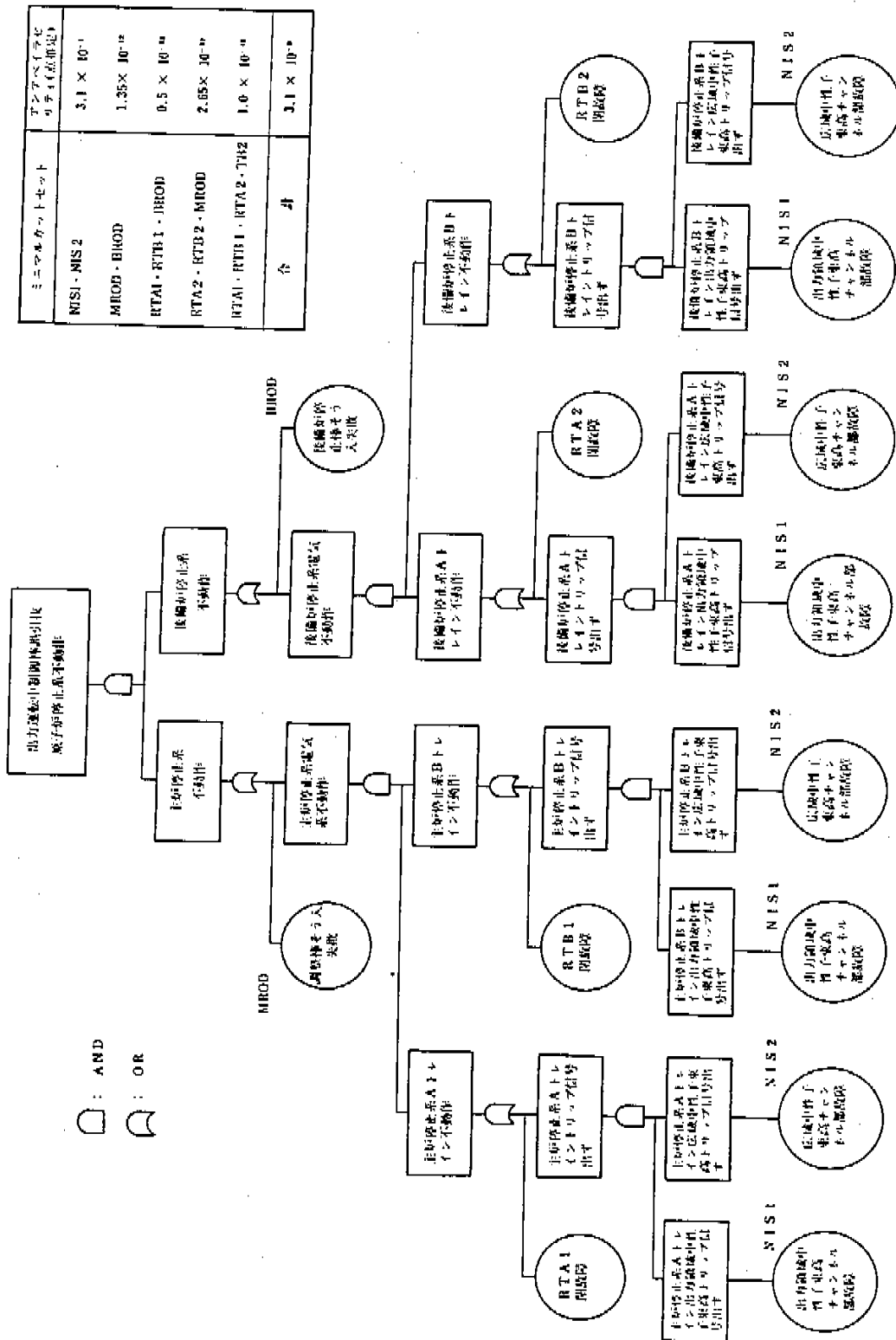
- (1) 各事象ごとに原子炉トリップ失敗にいたるフォールトツリーを作成し、それからミ

表4 事象と原子炉トリップ信号

番号	想定事象のグループ	解析対象事象	原 子 炉 ト リ ッ プ 信 号		
			第1作動信号	第2作動信号	第3作動信号
1	原子炉出力上昇事象	出力運転中制御棒誤引抜	出力領域中性子束高	広域中性子束高	
2	1次冷却材流量減少事象	1次主冷却系循環ポンプ1台トリップ	故障ループの1次主冷却系流量低*1)	全ループの原子炉容器出口ナトリウム温度高	
3	2次冷却材流量減少事象	2次主冷却系循環ポンプ1台トリップ	故障ループの2次主冷却系流量低*2)	故障ループの中間熱交換器1次側出口ナトリウム温度高	全ループの原子炉容器出口ナトリウム温度高
4	水・蒸気系冷却能力喪失事象	蒸発器入口ドレン弁誤開	故障ループの蒸発器出口ナトリウム温度高	故障ループの中間熱交換器1次側出口ナトリウム温度高	全ループの原子炉容器出口ナトリウム温度高
5	常用電源喪失事象	電源喪失	全母線の常用母線電圧低	全ループ1次主冷却系流量低	全ループの2次主冷却系流量低
6	そ の 他	手動原子炉トリップ等			

\*1) 実際には「1次主冷却系循環ポンプ回転数低」が第1作動信号となるが、この解析では保守的に無視した。

\*2) 実際には「2次主冷却系循環ポンプ回転数低」が第1作動信号となるが、この解析では保守的に無視した。



ミニマルカットセット	ランダム化 可事(点検記)
NISI - NIS2	$3.1 \times 10^{-1}$
MROD - BIROD	$1.35 \times 10^{-12}$
RTA1 - RTB1 - BIROD	$0.5 \times 10^{-14}$
RTA2 - RTB2 - MROD	$2.65 \times 10^{-14}$
RTA1 - RTB1 - RTA2 - TB2	$1.0 \times 10^{-14}$
合 計	$3.1 \times 10^{-1}$

図4 原子炉停止系不動作フオートツリー

ニマルカットセットを拾い出し故障率データを用いて確率分布の計算を行う。計算はモンテカルロ法により確率分布を計算する“SAMPLE”で行う。“SAMPLE”はWASH-1400で用いられているコードである。代表的なフォールトツリーの例を図4に示す。(ただし解析では、より詳細なフォールトツリーに基づいてミニマルカットセットを求めている。)

- (2) モンテカルロ計算の試行回数は2000回(WASH-1400では1200回)とし、確率の小さい方から数えて1000番目、1900番目の値を、各々50%信頼度、95%信頼度とする。

5-3 信頼性解析の結果

解析の結果を表5に示す。一般に事故の発生頻度については $10^{-7}$ /炉年程度になると無視しうる程度に小さいとみなせるが、この表に示される通り、保守的に評価してもアンアベイラビリティは $6.8 \times 10^{-8}$ /炉年であり、「もんじゅ」の原子炉停止系は高い信頼性を有していることがわかる。各過渡事象ごとにみると、出力運転中

制御棒誤引抜時の確率が支配的であることがわかる。

出力運転中制御棒誤引抜事象に対する点推定のミニマルカットセットを図4にフォールトツリーと共に示してあるが、トップイベントを支配する故障は、出力領域中性子束高と広域中性子束高の計測チャンネル部の故障であり、他の故障は無視できることがわかる。

出力運転中制御棒誤引抜以外の事象では、いずれの場合もトリップ信号が3種類以上あり、計測チャンネルの故障によるトップイベントは3次以上のミニマルカットとなる。そのため計測チャンネルの故障は支配的ではない。これらの場合、しゃ断器と制御棒の故障が支配的になるが、アンアベイラビリティは非常に小さい。

また今回の解析では「1次主冷却系循環ポンプ回転数低」及び「2次主冷却系循環ポンプ回転数低」による原子炉トリップ信号を考慮していないが、この信号を考慮すれば1次冷却系及び2次主冷却系のポンプトリップ事象においてはアンアベイラビリティは更に小さくなる。

表5 解析結果

事象	事象発生頻度 (回/炉年)	アンアベイラビリティ ( /demand)		アンアベイラビリティ ( /炉年)	
		信頼水準		信頼水準	
		50%	95%	50%	95%
出力運転中制御棒誤引抜	0.4	$3.1 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-8}$
1次主冷却系循環ポンプトリップ	0.8	$1.4 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-11}$
2次主冷却系循環ポンプトリップ	4.4	$1.4 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$6.2 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-10}$
蒸発器入口ドレン弁誤開	0.3	$1.4 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$4.2 \times 10^{-13}$	$7.2 \times 10^{-12}$
電源喪失	0.2	$1.4 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$2.8 \times 10^{-13}$	$4.8 \times 10^{-12}$
その他	3.9	$1.4 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-11}$	$5.5 \times 10^{-12}$	$9.4 \times 10^{-11}$
合計	(10)			$1.2 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-8}$

## 6. まとめ

原子炉停止系は、その故障の防止対策が設計、製作、据付、試験、運転を通じて十分ほどこされるので、高い信頼性を有すると考えられる。

制御棒及び制御棒駆動機構については、長い間実規模の試作体を用いた各種実験を積み重ねてきており、これまでスクラム失敗にいたった例が皆無である事実からも高い信頼性を有していることがわかる。

また安全保護系はLWRの経験をベースに構成したものであり、信頼性は高い。保守的な故障率データを用いて原子炉停止系の信頼性を定量的に評価した結果、アンアベイラビリティは $6.8 \times 10^{-8}$ /炉年と推定された。これは十分低い発生確率とみなせる。

以上、定性的、定量的に原子炉停止系の評価を行ったが、もんじゅの原子炉停止系は、多様性、独立性を有した信頼性の高いシステムであると考えられる。