

大型高速炉のレベル-1PSA 概括評価 (II)

水・蒸気系を考慮した PLOHS 発生頻度

1994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)

大型高速炉のレベル-1 PSA概括評価 (II)

水・蒸気系を考慮したPLOHS発生頻度

日置 一雅*

要 旨

平成4年度から大型高速炉プラントを対象として確率論的安全評価 (PSA) を実施している。本研究の目的は、概念設計段階のプラントにPSA手法を適用し、システムモデルを作成し、これに基づく定量解析により、系統的な評価・分析を行い、プラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見を提供し、基本設計への反映に役立てることにある。

解析対象プラントは、プラント工学室が主体となって平成2年度から実施してきた「大型炉設計研究」の60万kWe級の大型高速炉とした。

原子炉停止後24時間程度は水・蒸気系のみでも崩壊熱が除去できるとして評価すると、崩壊熱除去系の機能喪失確率は約2桁低減する。しかし、起因事象により水・蒸気系が使用できない場合の崩壊熱除去系の機能喪失確率に対しては、補助冷却設備 (ACS) の空気冷却器のベーン・ダンパ・ナトリウム止め弁の共通要因故障が支配的となり、PLOHS発生頻度は約3分の1にしか減少しない。したがって、共通要因故障を排除することが最も重要である。

空気冷却器まわりの機器を多様化し、共通要因故障を排除できたとすると、ACSに水・蒸気系が加わることにより、崩壊熱除去系の多重度が増すため、PLOHS発生頻度は水・蒸気系に期待しない場合より約2桁小さくなる。このとき、成功基準が最も厳しい原子炉停止直後の機能喪失確率が支配的となる。PLOHS発生頻度を低減するには、原子炉停止直後の崩壊熱除去系の多重度を増すことが効果的である。

先行炉の評価例から、熱流力解析による最確値評価では成功基準は緩和され、原子炉停止直後からACS1ループの自然循環により崩壊熱が除去できる可能性があるという知見が得られている。この条件であればPLOHS発生頻度は約 10^{-7} /炉年という十分に低いレベルになることを示した。

以上のような評価作業を実施することにより、プラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見を提供し、基本設計への反映に役立てる見通しを得た。

May, 1994

Level-1 PSA on Large Fast Breeder Reactor (II)
Evaluation of PLOHS Frequency with the Water Steam System with
Decay Heat Removal Capability

Kazumasa Hioki*

Abstract

The Systems Analysis Section has been performing a probabilistic Safety Assessment (PSA) on a large fast breeder reactor (FBR) since JFY 1992. The objective of the study is to apply the PSA method to a plant in a conceptual design stage, develop system models, perform quantitative analyses and systematic evaluation, supply valuable insights to enhance reliability and safety, and reflect them to the basic design.

The plant analyzed is a 600MWe class large FBR designed by the Plant Engineering Section in the "Large FBR design study" that has been performed since JFY 1990.

The failure probability of the Decay Heat Removal System (DHRS) can be reduced approximately two orders if the Water Steam System (WSS) can remove the decay heat for the first 24 hours. The frequency of PLOHS, however, is not reduced to less than one third because the WSS cannot be used for some initiating events and the PLOHS frequency is dominated by the failure probability of DHRS without the WSS. The failure probability of DHRS is dominated by the common cause failures (CCFs) of vanes, dampers and valves around the air-coolers in the Auxiliary Cooling System (ACS). Therefore it is most important to eliminate the CCFs.

Assuming that the CCFs have been eliminated by diversifying the components, the frequencies of PLOHS were evaluated. An analysis has shown that if the WSS can remove the decay heat alone, the PLOHS frequency is reduced approximately two orders. In this case the PLOHS frequency is dominated by the failure probability of the DHRS right after the reactor shutdown. The most effective way to reduce the PLOHS frequency is to increase the redundancy of the DHRS for the first few hours after reactor shutdown.

It is known through the experience of preceding plants that the success criteria can be relaxed to one loop natural circulation instead of forced circulation in the best estimate evaluation. It was shown that under such condition, the PLOHS frequency can be as low as 10^{-7} per reactor level.

* Systems Analysis Section, Technology Development Division

大型高速炉のレベルー1 PSA概括評価(II)
 水・蒸気系を考慮したPLOHS発生頻度
 目次

		ページ
1	序	1
2	手法	4
3	プラント情報	8
3.1	プラント全体概要	8
3.2	崩壊熱除去系に関するプラント情報	9
4	起因事象及びイベントツリー評価	18
4.1	起因事象評価	18
4.2	イベントツリー評価	23
5	崩壊熱除去系モデルの作成	56
5.1	フォールトツリーの作成	56
5.2	フォールトツリー定量化用データの作成	60
6	設計ベースの評価結果	86
6.1	崩壊熱除去機能喪失確率評価	86
6.2	事故シーケンス評価	89
7	評価ベースの評価結果	105
7.1	崩壊熱除去機能喪失確率評価	105
7.2	事故シーケンス評価	107
8	感度解析ケースの評価結果	124
8.1	崩壊熱除去機能喪失確率評価	124
8.2	事故シーケンス評価	127
9	考察	143
10	結論	149
11	謝辞	151
12	参考文献	152

表リスト

	ページ	
表1-1	略語一覧表	3
表3.1-1	プラント主要目	12
表3.2-1	手動トリップ後の水・蒸気系の運用	16
表4.1-1	もんじゅ起因事象と大型炉起因事象の対比	32
表4.1-2	プラント固有データ	33
表4.1-3	大型炉起因事象発生頻度	35
表4.2-1	起因事象一覧表	36
表4.2-2	フロントラインシステム一覧表	37
表4.2-3	崩壊熱除去系運転モード	38
表4.2-4	崩壊熱除去系運転モードと起因事象の対応	39
表5.2-1	フロントラインシステムの構成機器と定量値	76
表5.2-2	サポートシステムの構成機器と定量値	79
表5.2-3	マクロイベントの内容と定量値	84
表6.1-1	設計ベースの失敗基準（水・蒸気系なし）	91
表6.1-2	設計ベースの失敗基準（水・蒸気系24時間使用）	92
表6.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率（設計ベース）	93
表6.2-1	PLOHS発生頻度（設計ベース）	99
表6.2-2	起因事象別炉心損傷発生頻度（設計ベース）	100
表6.2-3	事故シーケンス別炉心損傷発生頻度（設計ベース）	101
表6.2-4	システム別炉心損傷発生頻度（設計ベース）	102
表7.1-1	評価ベースの失敗基準（水・蒸気系なし）	110
表7.1-2	評価ベースの失敗基準（水・蒸気系24時間使用）	111
表7.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率（評価ベース）	112
表7.2-1	PLOHS発生頻度（評価ベース）	118
表7.2-2	起因事象別炉心損傷発生頻度（評価ベース）	119
表7.2-3	事故シーケンス別炉心損傷発生頻度（評価ベース）	120
表7.2-4	システム別炉心損傷発生頻度（評価ベース）	121
表8.1-1	感度解析ケースの失敗基準（水・蒸気系なし）	129
表8.1-2	感度解析ケースの失敗基準（水・蒸気系24時間使用）	130
表8.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率（感度解析ケース）	131
表8.2-1	PLOHS発生頻度（感度解析ケース）	137
表8.2-2	起因事象別炉心損傷発生頻度（感度解析ケース）	138
表8.2-3	事故シーケンス別炉心損傷発生頻度（感度解析ケース）	139
表8.2-4	システム別炉心損傷発生頻度（感度解析ケース）	140

図リスト (1/2)

	ページ
図2.1-1 システム安全解析の流れ	7
図3.1-1 プラントの基本概念	13
図3.1-2 ヘッドアクセス方式の基本概念	14
図3.2-1 崩壊熱除去系構成概念図	15
図3.2-2 水・蒸気系構成概念図	17
図4.2-1 機能イベントツリー	40
図4.2-2 システムイベントツリー (正の反応度挿入)	41
図4.2-3 システムイベントツリー (1次主冷却系漏洩)	42
図4.2-4 システムイベントツリー (1次メンテナンス冷却系漏洩)	43
図4.2-5 システムイベントツリー (1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ)	44
図4.2-6 システムイベントツリー (1次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ))	45
図4.2-7 システムイベントツリー (1次主冷却系逆止弁閉 (1ループ))	46
図4.2-8 システムイベントツリー (2次主冷却系流量減少)	47
図4.2-9 システムイベントツリー (2次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ))	48
図4.2-10 システムイベントツリー (2次主冷却系漏洩)	49
図4.2-11 システムイベントツリー (外部電源喪失)	50
図4.2-12 システムイベントツリー (給水流量喪失)	51
図4.2-13 システムイベントツリー (タービントリップ)	52
図4.2-14 システムイベントツリー (蒸気発生器伝熱管破損)	53
図4.2-15 システムイベントツリー (局所的燃料破損)	54
図4.2-16 システムイベントツリー (原子炉トリップ)	55
図5.1-1 崩壊熱除去系サポートシステム機能依存関係	64
図5.1-2 サポートシステム系統図 (1)	65
図5.1-3 サポートシステム系統図 (2)	66
図5.1-4 サポートシステム系統図 (3)	67
図5.1-5 補助冷却設備Aループ強制循環失敗のフォールトツリー	68
図5.1-6 補助冷却設備Aループ自然循環失敗のフォールトツリー	69
図5.1-7 メンテナンス冷却系強制循環失敗のフォールトツリー	70
図5.1-8 メンテナンス冷却系自然循環失敗のフォールトツリー	71
図5.1-9 水・蒸気系崩壊熱除去失敗のフォールトツリー	72
図5.1-10 補助冷却設備Aループ強制循環のみ失敗のフォールトツリー	73
図5.1-11 無停電電源A系統機能喪失のフォールトツリー	74

図リスト (2/2)

図5.1-12	非常用電源A系統機能喪失のフォールトツリー	75
図6.1-1	各運転モードの機能喪失確率 (設計ベース)	94
図6.1-2	崩壊熱除去機能喪失確率D1~D5 (設計ベース)	95
図6.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率D6~D10 (設計ベース)	96
図6.1-4	崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別重要度 (設計ベース)	97
図6.1-5	崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (設計ベース)	98
図6.2-1	PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (設計ベース)	103
図6.2-2	PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (評価ベース)	104
図7.1-1	各運転モードの機能喪失確率 (評価ベース)	113
図7.1-2	崩壊熱除去機能喪失確率D1~D5 (評価ベース)	114
図7.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率D6~D10 (評価ベース)	115
図7.1-4	崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別重要度 (評価ベース)	116
図7.1-5	崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (評価ベース)	117
図7.2-1	PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (評価ベース)	122
図7.2-2	PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (評価ベース)	123
図8.1-1	各運転モードの機能喪失確率 (感度解析ケース)	132
図8.1-2	崩壊熱除去機能喪失確率D1~D5 (感度解析ケース)	133
図8.1-3	崩壊熱除去機能喪失確率D6~D10 (感度解析ケース)	134
図8.1-4	崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別重要度 (感度解析ケース)	135
図8.1-5	崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (感度解析ケース)	136
図8.2-1	PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (感度解析ケース)	141
図8.2-2	PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (感度解析ケース)	142
図9-1	PLOHS発生頻度 (／炉年) の比較	147
図9-2	各運転モードの機能喪失確率の比較	148

1. 序

プラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見を提供し、基本設計への反映に役立てることを目的として、概念設計段階の大型高速炉を対象に、確率論的安全評価（PSA）を実施した。PSAの目的は一般的には以下のとおりである。

1. リスクに有意に寄与する起因事象及び事故シーケンスを抽出する。
2. リスクの寄与因子の発生可能性を定量的尺度をもって示す。
3. 事故シーケンスによりもたらされる影響を現実的に評価する。
4. プラントの設計・運転あるいは立地に関する意思決定のために、リスクに基づいた合理的な枠組みを提供する。

平成4年度には、内の事象を対象としたレベル-1 PSAを実施した。すなわち、フォールトツリー、イベントツリー手法によりシステムモデルを作成し、炉心損傷に至る事故シーケンスを同定し定量化した。炉心損傷発生頻度定量化結果、重要度解析結果、及び感度解析結果に基づき、安全確保上重要な系統・機器、支配的な事故シーケンスの整理を行い、系統的な分析を加えることによりプラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見をまとめた。設計報告書によれば、原子炉停止後は水・蒸気系と補助冷却設備（ACS）で崩壊熱を除去するが、蒸気発生器及びタービンバイパス系は安全系ではないため、評価上はタービンバイパス系には期待しないことになっているので、昨年度の評価では、水・蒸気系には崩壊熱除去機能を一切期待しないこととした。その結果、LORLとATWSの発生頻度は十分に低いレベルにあり、PLOHSの発生頻度が支配的になると評価された。そのPLOHSに対しては、原子炉停止直後の機能喪失が支配的であり、特にACS空気冷却器まわりの弁、ダンパ、ベーンの共通要因故障の寄与が大きいと評価された。

そこで平成5年度は、設計に基づいて水・蒸気系でも崩壊熱が除去できるとして評価を行った。水・蒸気系は、長時間（次の起動まで）単独で崩壊熱を除去できるとの設計情報があるが、昨年度の評価で原子炉停止直後の機能喪失確率が大きいと評価されたことから、本評価では水・蒸気系単独で崩壊熱が除去できる時間を原子炉停止後24時間として下記の3ケースの解析を行った。

- (1)設計ベース：崩壊熱除去系の成功基準を設計報告書のとおりとした評価
- (2)評価ベース：原子炉停止後1時間の成功基準を、ACS1ループの自然循環のみでもよいとした評価
- (3)感度解析ケース：メンテナンス冷却系（MCS）の除熱能力がACS1ループ分と同じであるとした評価

起因事象の選定にあたっては、原子炉が出力運転中に内の事象によって炉心損傷に至る可能性のある事象を評価対象とした。内の事象とはプラントを構成する機器の誤動作・

故障あるいは運転員の誤操作により引き起こされる事象で、プラントに直接的に影響を及ぼすものと定義される。一方、外的事象とは火災・地震・洪水などであり、これらの事象によって引き起こされる苛酷環境により機器故障が生じ、プラントに影響を及ぼすものである。尚、外部電源喪失はプラント外で発生する事象であるが、内的事象に分類され、評価に含まれる。逆に、プラント内洪水は外的事象に分類され、これに対する評価は地震・火災と同様に、本報告書には含まれていない。また、燃料取り扱い設備等の炉心以外から放射性物質の放出に至る可能性のある事象に関する評価も本評価のスコープ外である。

本報告書では第2章でレベル1-PSAの手法について、第3章でプラント情報並びに崩壊熱除去系の成功基準、第4章で起因事象及びイベントツリー評価、第5章でフォールトツリーモデルの作成と定量化用データの作成について述べる。第1章から第5章までの内容は、(1)設計ベース、(2)評価ベース、(3)感度解析ケースに共通である。第6章で設計ベースの評価結果、第7章で評価ベースの評価結果、第8章で感度解析ケースの評価結果について述べ、3ケースの評価結果をまとめて、第9章で考察、第10章で結論を述べる。参考文献は第11章に載せた。

本報告書で使用した略語の一覧を表1-1に示す。

表1-1 略語一覧表

略語	原文	和訳
AC	Air Cooler	空気冷却器
ACS	Auxiliary Cooling System	補助冷却設備
ATWS	Anticipated Transient Without Scram	反応度抑制機能喪失事象
BFR法	Binomial Failure Rate Method	共通要因故障発生確率推定手法の1つ
CCF	Common Cause Failure	共通要因故障
DRACS	Direct Reactor Auxiliary Cooling System	直接補助炉心冷却設備
IRACS	Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System	中間補助炉心冷却設備
LORL	Loss of Reactor Level	原子炉容器液位確保失敗事象
MCS	Maintenance Cooling System	メンテナンス冷却系
MGL法	Multiple Greek Letter Method	
PLOHS	Protected Loss of Heat Sink	除熱源喪失事象
PSA	Probabilistic Safety Assessment	確率論的安全評価
RCP	Recirculating Pump	再循環ポンプ
SG	Steam Generator	蒸気発生器
ULOF	Unprotected Loss of Flow	炉心流量減少時、原子炉トリップ失敗事象
ULOHS	Unprotected Loss of Heat Sink	除熱源喪失時、原子炉トリップ失敗事象
ULOPI	Unprotected Loss of Piping Integrity	1次冷却材漏洩時、原子炉トリップ失敗事象
UTOP	Unprotected Transient Overpower	過出力時、原子炉トリップ失敗事象
WSDT	Water Steam Separator Drain Tank	気水分離ドレンタンク

2. 手法

2.1 レベル-1 PSA評価手順

レベル-1 PSAの作業は、炉心損傷に至る事故シーケンスを同定し、その発生頻度を求めることである。評価手順はもんじゅプラントのレベル-1 PSA⁽¹⁾に従った。図2.1-1にその作業の流れ図を示す。図に示すように、レベル-1 PSAでは以下のタスクを実施する。

(0) プラント設計情報の収集

プラントの設計・運転・保守等に関する情報を収集する。

(1) 起因事象の同定、分類

プラントの全システムを対象として、想定される機器の故障、運転員の誤操作、漏洩等の故障の原因を全て摘出し、これらの故障が生じたと仮定した場合に予想される事象の推移を分析する。これを基に、(2)以降の解析に当たって必要となる代表的な起因事象の選定を行う。

(2) イベントツリーの作成

炉心損傷に至る可能性のある種々の事象シーケンスを記述する。分類された起因事象カテゴリーの各々についてシステムの応答を明確にする。

(3) フォールトツリーの作成

対象とすべきシステムとその故障（機能喪失）との関連をイベントツリーとの対応に基づき明確にすると共に、システムの故障に至る原因を順次摘出し、イベントツリーでヘディングとして同定されたシステム及びそのサポートシステムについてフォールトツリーを作成する。この際、共通要因故障の寄与やシステム間相互干渉を考慮する。

(4) データベースの作成

対象プラントに適用可能なデータを、幅広く収集・評価し設定する。その場合、先行プラントの運転データ、すでに他のプラントのPSAで使用されたデータ、現存する各種データソースが参考となる。機器故障率データのみではなく、機器の試験や修理の頻度や所要時間に関するデータも設定する必要がある。また、人的信頼度評価、従属故障解析をも行ない、データを準備する。

(5) 起因事象の定量化

(4)で作成したデータベースを用いて、(1)で同定した起因事象の1炉年あたりの発生頻度を算出する。

(6) フォールトツリー素事象の定量化、フォールトツリーの定量化

(4)で作成したデータベースを用いて、(3)で作成したフォールトツリーに現われる素事象の発生確率を求め、さらに、これを用いてフォールトツリーの頂上事象に対するミニマルカットセットを導出する。原子炉停止後の時間経過と共に、成功基準が変化する崩壊熱除去系に対しては、使命時間を複数のフェイズに区切り、各フェイズの成功基準に対応したミニマルカットセットを導出する。

(7) ユニークシステムコンビネーションの定量化

(4)で作成したデータベースを用いて、イベントツリーで求められたシステム故障の組合せ（ユニークシステムコンビネーション）に従ってフォールトツリーを結合し、シーケンスカットセットを導出する。崩壊熱除去系については、マルコフモデルを用いて、システムの遷移過程をモンテカルロシミュレーション法により追跡して非信頼度を評価する手法を用いる。

(8) 炉心損傷発生頻度の定量化

起回事象の発生頻度と、ユニークシステムコンビネーションの発生確率から、各事故シーケンスを定量化し、炉心損傷発生頻度を求める。

(9) 重要度評価

炉心損傷発生頻度に対する影響の大きな系統・機器を調べるために、重要度評価を行なう。

(10) 不確定性評価

データの不確かさの影響を把握するために、データの不確かさを伝播させ、炉心損傷発生頻度の不確かさを評価する。

(11) 感度解析

モデルやデータの不確かさが、炉心損傷発生頻度に与える影響を把握するために、感度解析を行なう。

(12) 結果の解釈と整理

種々の解析フェイズで得られたデータを統合整理し、結果を解釈する。特に、重要な事故シーケンスとその発生頻度に着目した整理を行なう。支配的因子に係わる事象や系統・機器を摘出して検討を加え、プラントのシステム設計、運転等にとって有効な情報を提供する。

(13) 技術的適合性の検討

上記タスクの各々について、技術的に適合していることを確認する。

各タスクは独立ではなく、互いのタスクの結果を受けて反復的に追加、集約等の修正が加えられる。

尚、本研究では、不確定性評価は行っていない。また、データベースの作成のうち、機器故障、試験、修理等のデータに関しては、もんじゅプラント用に作成したデータベースを使用した。

また、崩壊熱除去系の機能喪失確率の定量化に際しては、成功基準の変化に基づいて、使命時間を複数のフェイズに分割し、マルコフモデルを用いてシステムの遷移過程をモンテカルロシミュレーション法により追跡する手法を用いたが、その詳細については、前年度に作成した報告書⁽²⁾に詳しく述べてある。

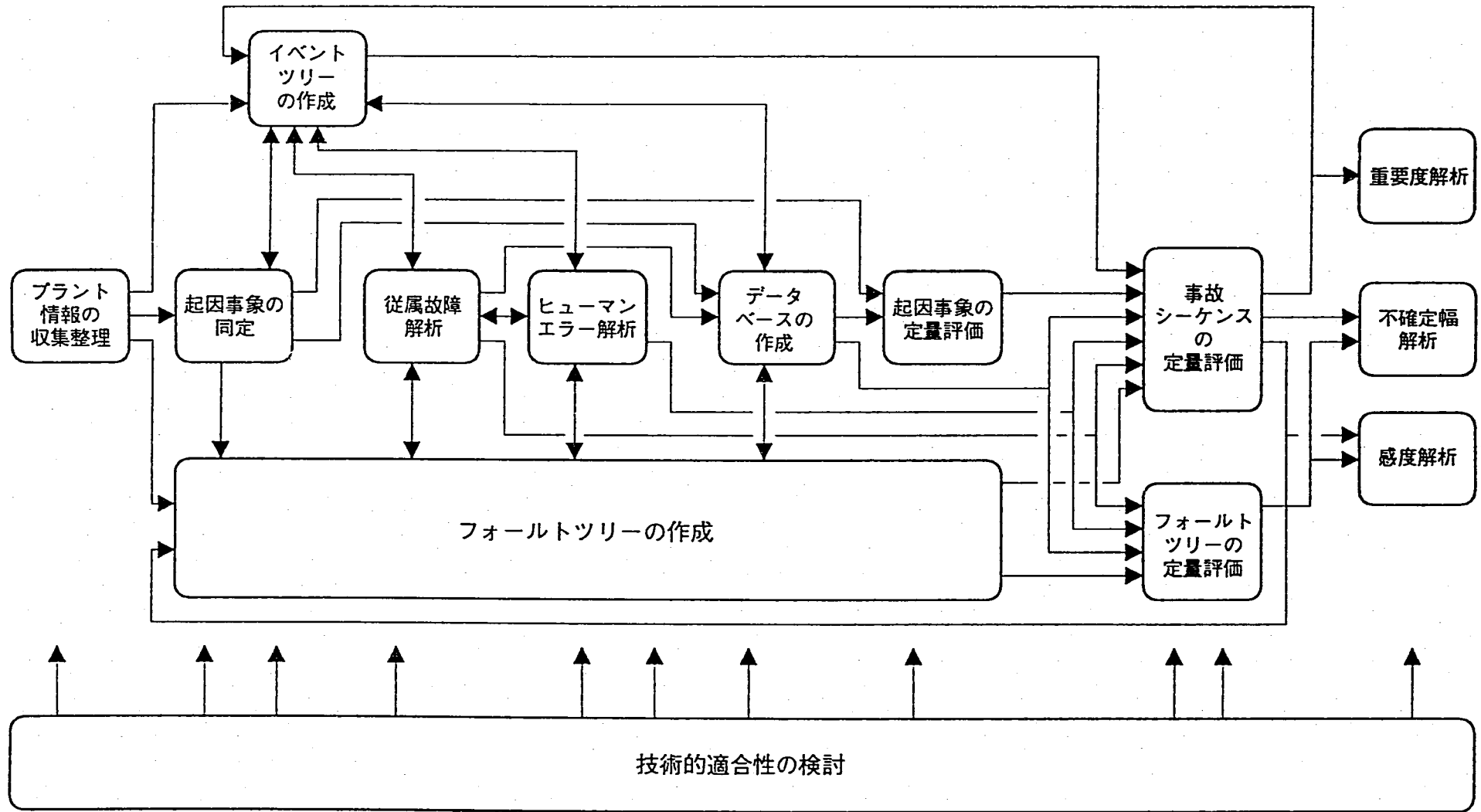


図2.1-1 システム安全解析の流れ

3. プラント情報

3.1 プラント全体概要

解析対象プラントは、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術開発部プラント工学室が主となって平成3年度に設計した熱出力1600MW、電気出力約640MWのループ型高速炉である⁽³⁾。原子炉冷却系は3ループ構成で、それぞれ1次主冷却系、2次主冷却系、水・蒸気系を備えている。1次系ホットレグ、コールドレグ温度がそれぞれ530℃、380℃、2次系がそれぞれ505℃、325℃である。炉心はプルトニウム・ウラン混合酸化物の中空燃料を使用した均質炉心である。プラント主要目を表3.1-1に示す。

プラントの基本概念図を図3.1-1に示す。1次主冷却系にはオーバフロー系は設けられておらず、起動時にのみ純化系を介して原子炉容器の液位を維持する方式を採用している。中間熱交換器は無液面であり、主循環ポンプはコールドレグ側に配置されている。蒸気発生器は一体貫流ヘリカルコイル型である。崩壊熱除去系は、2次主冷却系から分岐した中間補助炉心冷却系(IRACS)方式である。メンテナンス時のために直接補助炉心冷却系(DRACS)型のメンテナンス冷却系(MCS)が設けられている。

炉容器はヘッドアクセス方式を採用し、ノズルのない単純な円筒容器となっている。ヘッドアクセス方式の基本概念を図3.1-2に示す。原子炉容器、中間熱交換器、1次主循環ポンプにはガードベッセルが設けられている。中間熱交換器と1次主循環ポンプのガードベッセルは、一体化されており、空隙は充填材で埋められている。

解析対象プラントをもんじゅと比較すると、出力は約2.2倍であるが、共にループ型の高速炉であり、ループ数や、IRACSタイプの補助冷却設備(ACS)とDRACSタイプのMCSを備えているなど、類似点が多く、もんじゅのレベル-1 PSAが利用できる。起因事象の同定・定量化、イベントツリーの作成、各系統の信頼性評価に影響する主な相違点としては、以下に示すようなものがある。

(1) 水・蒸気系による崩壊熱除去が可能である。

原子炉停止時に水・蒸気系単独で崩壊熱を除去することができる設計となっている。このとき1次主冷却系、2次主冷却系はポニーモータ運転により強制循環を行う必要があるが、ACSによる除熱は必要ない。

(2) 1次ナトリウムオーバフロー系が存在しない。

起動時の原子炉容器液位調整は純化系が受け持ち、原子炉停止時には液位確保のためのシステムは不要である。

(3) 原子炉容器が、ヘッドアクセス方式である。

原子炉容器はヘッドアクセス方式であるので、1次系コールドレグは比較的高所にある。ポンプコーストダウンが適切に設定されており、1次主冷却系コールドレグ破損時にもポンプトリップを遅延する必要がない。このため、「1次主冷却系コールドレグ破損」は、他の「1次主冷却系配管破損」と区別する必要がなくなる。

(4) 1次系、2次系の配管長さが短縮されている。

配管長さが短くなるため、1次主冷却系漏洩、2次主冷却系漏洩の起因事象の発生頻度が小さくなる。

(5) 過熱器が設けられていない。

蒸気発生器(SG)は、蒸発器(EV)と過熱器(SH)が一体化されており、過熱器は単独で存在しない。よって、蒸気発生器伝熱管破損の起因事象の発生頻度が小さくなる。

(6) 原子炉停止系の設計はもんじゅと異なる。

原子炉停止系の論理回路は3トレイン構成になっている。また、主炉停止系と後備炉停止系はそれぞれ別の原子炉トリップ信号によって作動する設計となっている。

(7) 崩壊熱除去系の成功基準がもんじゅと異なる。

原子炉停止後の経過時間によって、崩壊熱除去系の成功基準が変化するので、崩壊熱除去系の機能喪失確率の計算にあたってはフェイズド・ミッション解析が必要となる。

尚、電源や機器冷却系などのサポートシステムについては、まだ設計がなされておらず情報がないので、原則としてもんじゅと同様な設計を想定する。

3.2 崩壊熱除去系に関するプラント情報

3.2.1 崩壊熱除去系の系統構成

崩壊熱除去系は、図 3.2-1 に示すように2次主冷却系の各ループから分岐したIRACSタイプのACS3系統と、主冷却系からは独立したDRACSタイプのMCS1系統、並びに図 3.2-2 に示す水・蒸気系とから構成される。

ACSは、炉心の崩壊熱を1次系ナトリウムから中間熱交換器を介して2次系ナトリウムへ伝達し、更にACS空気冷却器より大気中に放散する。ACS運転時には主ポンプは、ポニーモータによって駆動される。外部電源喪失に対処するため非常用ディーゼル発電機を、ACSの各系統毎に独立して設ける設計となっているが、ACSは自然循環によっても炉心冷却が行なえる設計となっている。

MCSは、低温停止後のメンテナンス時において冷却機能の多重性を確保するために設

ける設備であるが、後に述べるように、崩壊熱除去機能のバックアップとしての役割を果たす。MCSはナトリウムを炉容器から直接1次MCSへ導き、MCS中間熱交換器を介して2次MCSへ熱を伝達し、最終的にMCS空気冷却器より大気中へ放熱する。MCSの強制循環運転は電磁ポンプ駆動である。

水・蒸気系には再循環システムが設けられている。このシステムは気水分離器、気水分離ドレンタンク、並びに再循環ポンプとから構成される。運転時の異常な温度変化及び事故時に原子炉をトリップした後は、表3.2-1に示すごとく、タービンへのラインからタービンバイパスラインに切り換えられ、蒸気は復水器へダンプされる。トリップ後しばらくして蒸気発生器から2相流が流出し始め、気水分離タンクの液位の上昇に伴い、再循環ポンプが自動起動し、再循環ラインの流調弁の制御が開始され、再循環運転に移行する。

運転時の異常な過渡変化及び事故時に原子炉をトリップした後は、水・蒸気系（タービンバイパス系）とACSで除熱しつつ、高温待機状態に移行する。水・蒸気系が期待できないときには、ACSのみを使用することになっている。

3.2.2 崩壊熱除去系の成功基準

崩壊熱除去系の除熱能力は、設計報告書⁽³⁾によれば以下の通りである。

ACSの強制循環冷却機能は、運転時の異常な過渡変化時にあって2系統の運転においても、燃料被覆管及び原子炉冷却材バウンダリの判断基準を超える昇温を生じさせないこと、事故時にあっては1系統のみの運転においても、燃料被覆管及び原子炉冷却材バウンダリの判断基準を超える昇温を生じさせないものとする。

ACSの自然循環冷却機能は次の通りとする。

- (1) 運転時の短時間の全交流動力電源喪失の想定に対して、ACS3系統の自然循環除熱により原子炉停止後の冷却を確保する。当面設計基準並に考え、事故時の判断基準を超える昇温を生じさせないものとする。
- (2) 事故時において、原子炉停止後、ACS1系統のみの強制循環冷却を1時間行なった状態を起点として、同系統の自然循環冷却のみにより事故時の冷却材バウンダリの判断基準を超える昇温を生じさせないものとする。

MCSの強制循環冷却能力としては、異常時においても、原子炉停止後ACS1系統のみの強制循環冷却を24時間行なった状態を起点として、MCSの強制循環冷却のみにより、事故時の冷却材バウンダリの判断基準を超える昇温を生じさせないものとする。

上記の除熱容量に関する情報によれば、ACSの自然循環冷却機能は、炉停止直後は3ループを必要とするが、炉停止1時間後からは1ループのみでよいことになっている。また、MCSは、炉停止後24時間経過した後から使用可能となっている。よって、崩壊熱除去に最低限必要な除熱モードとそのループ数との組み合わせ（成功基準）は炉停止後の時間経過に伴い変化する。

水・蒸気系単独で崩壊熱が除去できる時間を原子炉停止後24時間とすると、崩壊熱除去系の成功基準は以下の表のようになる。

炉停止後時間 (hr)	成功基準
0～1	ACS1ループ強制循環 または ACS3ループ自然循環 または 水・蒸気系
1～24	ACS1ループ自然循環 または 水・蒸気系
24～	ACS1ループ自然循環 または MCS強制循環

表3.1-1 プラント主要目

項目	仕様	備考
原子炉出力	熱出力 160万kWt 電気出力 約60万kWe	実用炉出力規模: 60~150万kWe
炉型	ループ型、3ループ (原子炉容器ヘッドアクセス方式)	
原子炉出口温度	530°C 蒸気条件: 483°C、154kg/cm ²	
炉心	均質炉心、混合酸化物中空燃料 燃焼度(取出平均): 約9万MWd/t 材料: 改良オーステナイト鋼(PNC1520)	ラップ管材料としてフェライト鋼(PNC-FMS)をバックアップとする
運転期間	12ヵ月/サイクル プラント寿命 40年	
増殖比	約1.20 / 約1.05(基底増殖)	基底増殖炉心は径ブランケットなし
原子炉容器	材料: SUS316LCN鋼 炉壁保護: 起動時液位変動抑制システム + 熱遮蔽板	
炉心上部機構	単円筒型 燃料交換時引抜き	炉容器径の縮小、基本構造の単純化、サーマルストライピング対策構造の簡素化
1次主循環ポンプ	単段片吸込み、コールドレグ	
中間熱交換器	1次冷却材管側、無液面	
1次冷却材漏洩事故対策	長円形ガードベッセル (内部に充填材設置)	単純形状化
蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル型 伝熱管材料: 改良9Cr-1Mo鋼	
原子炉停止系	主炉停止系、 後備炉停止系	(SASSの有効性の検討)
崩壊熱除去系	補助炉心冷却系(IRACS)	
燃料取扱設備	可変アームパンタグラフ、フィン付ポット、インセルクレーン	UIS引き抜き方式と整合する設備の簡素化
使用済燃料貯蔵設備 (減衰待ち貯蔵)	空冷保持筒内貯蔵 (通常時強制通風、事故時自然通風)	搬出待ち貯蔵の分離、 冷却の信頼性確保
原子炉格納施設	鋼製筒型アンユラス付 (下部補助建屋埋込み一体型)	二重格納施設を形成
耐震設計	「もんじゅ」サイト条件 深く埋設した耐震建屋	高地震地帯設置可能

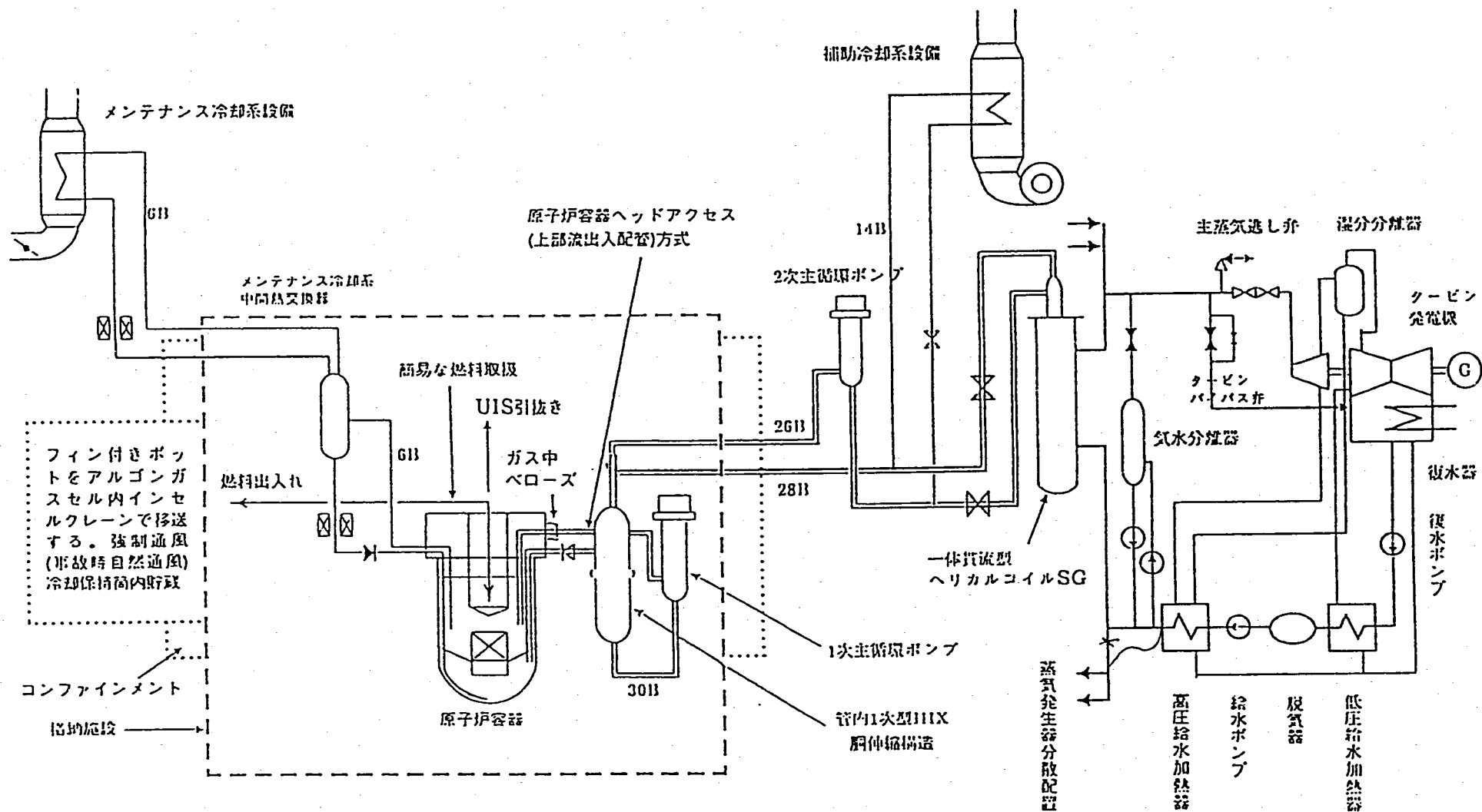


図3.1-1 プラントの基本概念

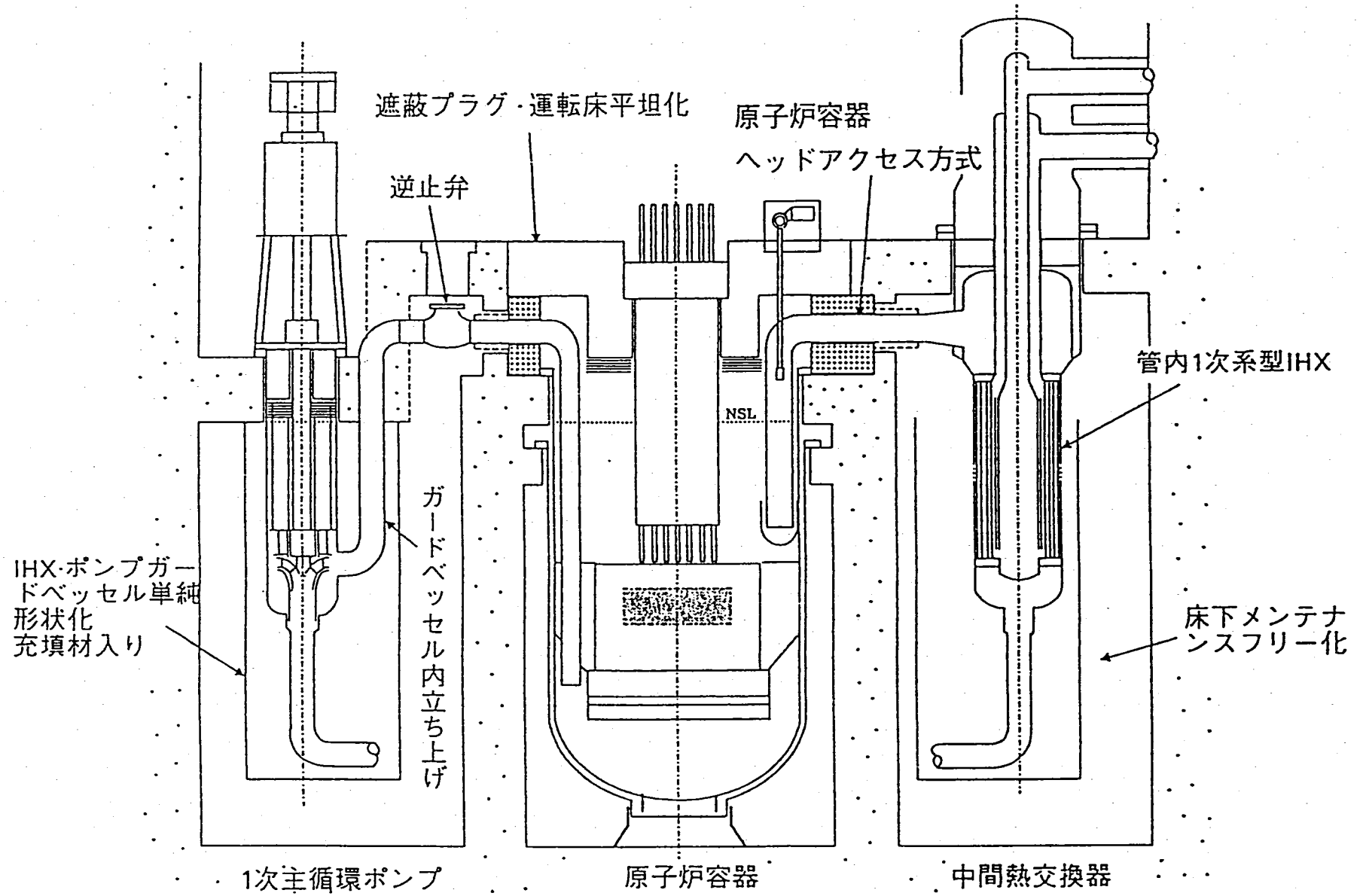


図3.1-2 ヘッドアクセス方式の基本概念

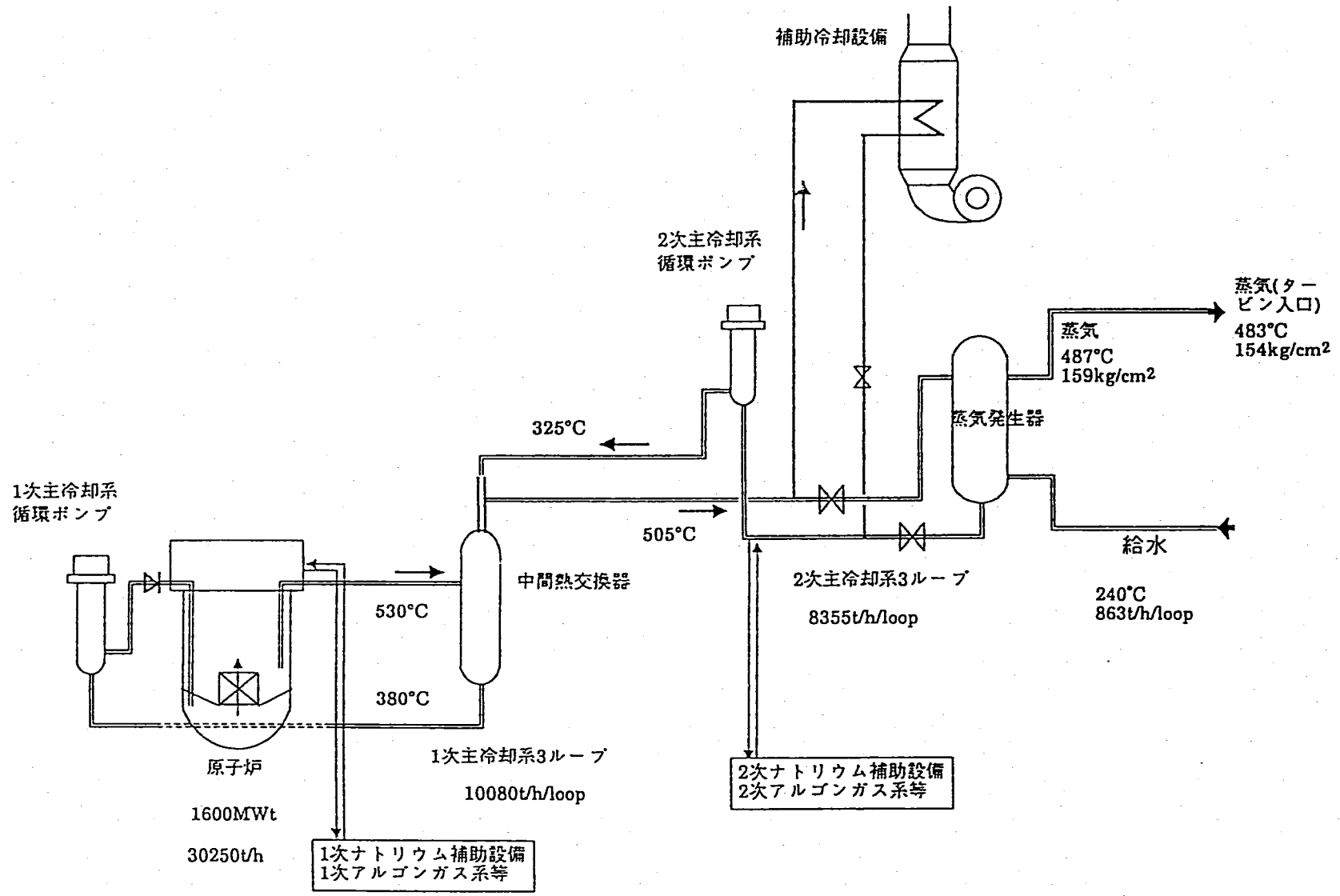


図3.2-1 崩壊熱除去系構成概念図

表3.2-1 手動トリップ後の水・蒸気系の運用

運転モード		㉑ 定格時(100%出力運転時)	㉒ 手動トリップ後RCP起動直後	㉓ 再循環安定モード(高温停止)		
系 統 図						
	考 え 方	給水温度	○ 高圧タービン出口からの抽気により240℃加熱	○ 起動用圧力調整弁からの蒸気で240℃加熱	○ 同 左	
		WSDT圧力維持	○ 蒸気加熱弁により圧力制御	○ タービンバイパス弁及び起動用圧力調整弁により圧力制御	○ 起動用圧力調整弁により圧力制御する(154atg)	
		給水流速	○ T-FWPによるSG給水	○ プログラム制御、T-FWPの生蒸気運転とM-FWP起動により確保	○ M-FWP運転継続するが、給水流速はインジェクション水のみとなる	
		WSDT液位	○ ウォーミング水(0.3%)のドレンにより液位維持	○ RCP起動と同時に再循環ライン調整弁とWSDT液弁により制御	○ 同 左	
		RCP入口温度/流速	○ RCPは停止状態で、ウォーミングされている	○ 240℃から上昇する。流速はクオリティの低下に伴ない増加する	○ 飽和温度近くなるが高低差とインジェクション水によりサブクール度確保	
		SG給水温度	○ 高圧給水加熱器出口温度と同じ240℃	○ 同 上	○ 同 上	
		SG給水流速	○ 100%負荷相当	○ プログラム制御だが再循環流量の増大につれて増える	○ 41%	
		昇降速度	○ —	○ —	○ 崩壊熱レベルにより異なるが通常は高温待機状態維持	
DHR	○ —	○ A/C除熱	○ A/C除熱(3.75%流量)			
1次系/2次系流量	○ 100%/100%	○ ポンプコストダウン(1次/2次とも半減時間5.5秒)	○ 1次/2次とも9.5%流量			
主な操作と特徴		<ul style="list-style-type: none"> ○ RCPウォーミングを実施 ○ ウォーミング水は脱気器に戻して熱回収する 	<ul style="list-style-type: none"> ○ タービンバイパス弁および起動用圧力調整弁による圧力制御 ○ 生蒸気運転とM-FWPの起動によるプログラム給水制御 ○ WSDT液位高々で再循環システムの自動起動(RCP起動、再循環ライン調整弁制御開始、インジェクション水注入弁開) ○ A/C除熱開始 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 同 左 ○ M-FWPによるインジェクション水の注入 		
備 考		<p>給水パターン例</p> <p>本パターンで主配管部の流調整弁を制御。RCP流量大のときには閉止される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 原子炉を停止している状態なので高温停止と呼ぶ。放熱が大きくNa温度低下が大きいときは飽和圧力の状態で徐々に降圧、降温する。 ○ この高温停止t-fから主t-fに切替えて原子炉を起動することにより㉓高温待機t-fに移行できる。 			

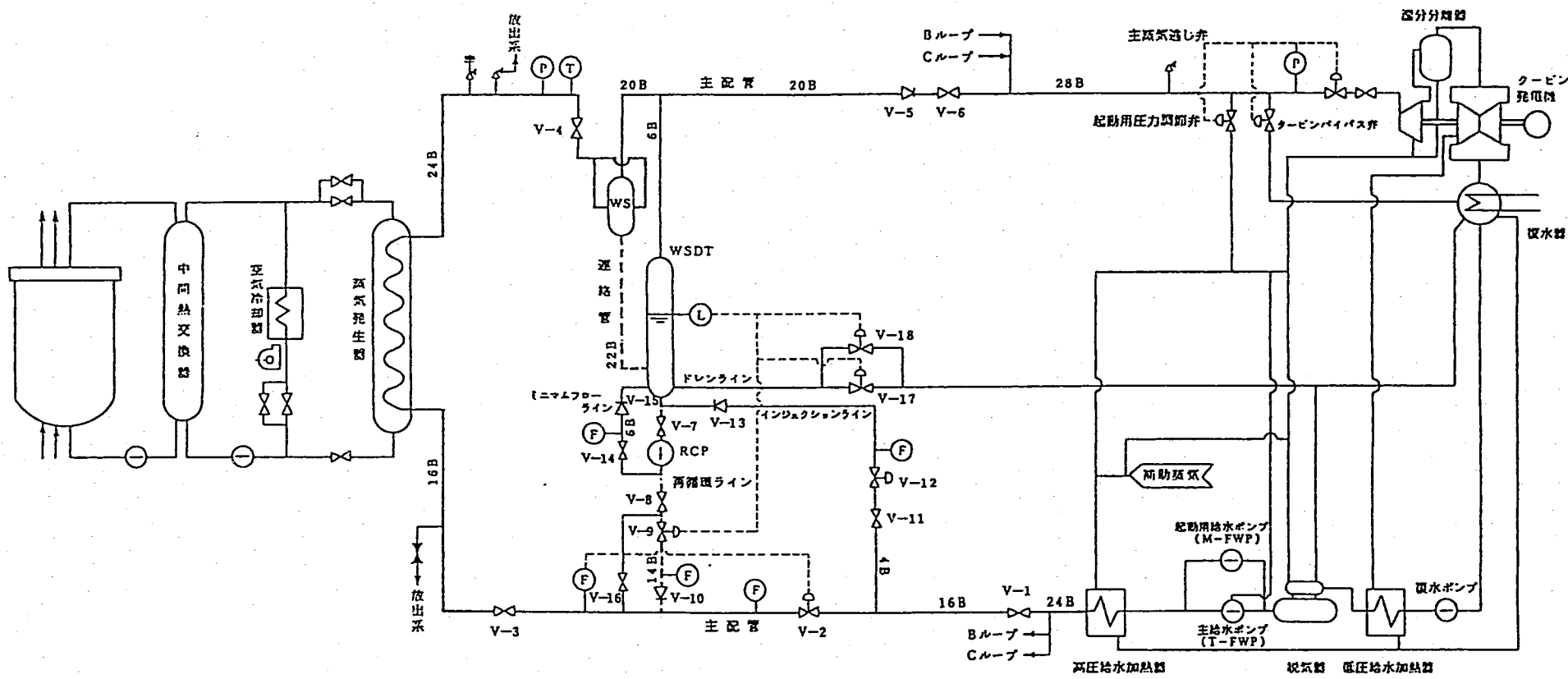


図3.2-2 水・蒸気系構成概念図

4. 起因事象及びイベントツリー評価

本章では、4.1章で起因事象の同定と定量化、4.2章でイベントツリー評価について述べる。

4.1 起因事象評価

本章では起因事象の同定とその発生頻度の定量化について述べる。起因事象とはその影響を緩和する安全設備の機能が喪失すると炉心損傷に至り、放射性物質の放出に至る可能性のある事象である。本評価では炉心に着目し、炉心以外からの放射性物質の放出に至る起因事象は対象外とする。また、地震、洪水、津波、破壊・妨害行為等の外的事象も対象外とする。ただし、外部電源喪失はプラント外で発生する事象であるが、内的事象に分類し評価に含める。また、定期点検や燃料交換時の運転計画情報もないことから、プラント出力運転中の事象のみを対象とする。

4.1.1 起因事象の同定

起因事象の同定手法としては、マスターロジックダイアグラムと呼ばれる演繹的なロジックツリーを作成し、解析対象プラントの設計・運転を考慮して、考えられる全ての起因事象を見つけだす方法があり、もんじゅのレベル-1 PSA⁽¹⁾を行った際にもこの手法に従った。今回の大型炉の評価に際しては、新たなマスターロジックダイアグラムを作成することはせず、もんじゅの起因事象と大型炉の設計情報を基に、起因事象を選定した。なぜならば、大型炉ともんじゅは、ともにループ型の高速炉であり、IRACSタイプの崩壊熱除去系とDRACSタイプのメンテナンス冷却系を有するなど、出力を除いては類似点が多いからである。

もんじゅ起因事象と大型炉起因事象を対比して表4.1-1に示す。大型炉ではもんじゅ起因事象の内、2番、4番、17番を削除し、3番の記述を変更した。以下にその理由を示す。

まず、起因事象2番「1次主冷却系コールドレグ破損」を削除した理由は、大型炉の原子炉容器が3章で述べたようにヘッドアクセス方式であり、コールドレグが高所にあり、コールドレグ破損を他の1次主冷却系配管破損と区別する必要がないためである。

次に、起因事象3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」と起因事象4番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル外）」とは統合して1つの起因事象3番「1次主冷却系漏洩」とした。これは、中間熱交換器と循環ポンプが1つのガードベッセル内に納められているため、ミドルレグ配管もガードベッセル内にあることや、ガードベッセル上端（NsL）を超える高所配管が直線的に配置されていることから、ガードベッセル外に設けられた

1次主冷却系の機器は1ループあたり逆止弁が1個と配管が約10mだけであり、ガードベッセル内の機器・配管に比べてはるかに少ないからである。

最後に、もんじゅ起因事象17番「ディーゼル建物電気設備室空調装置故障」は、もんじゅの設計に固有であることから削除した。すなわち、もんじゅでは3系統ある非常用電源設備がいずれもディーゼル建物電気設備室空調装置によって冷却される設計となっている。大型炉のサポートシステムの設計情報はないが、このような設計を行わないものとして本起因事象は削除した。

その結果、大型炉ではもんじゅより3個少ない15個の起因事象を同定した。各起因事象について以下に述べる。

起因事象1番「正の反応度挿入」

制御棒誤引き抜き等によって正の反応度が挿入され、中性子束高により原子炉トリップ信号が発せられる事象である。主冷却系統には異常はないので、崩壊熱除去には、補助冷却設備3ループとメンテナンス冷却系、水・蒸気系が使用できる。

起因事象3番「1次主冷却系漏洩」

1次主冷却系機器・配管から1次冷却材が漏洩する事象である。原子炉容器ナトリウム液位低、ガードベッセルナトリウム液位高信号が発せられ、原子炉トリップ信号が発せられる。漏洩の発生した当該ループは崩壊熱除去運転には使用できないものと想定する。

起因事象5番「1次メンテナンス冷却系漏洩」

本起因事象は1次メンテナンス冷却系から1次冷却材が漏洩する事象である。原子炉容器ナトリウム液位低、格納容器床下雰囲気温度高信号が発せられ、原子炉トリップ信号が発せられる。対象プラントの1次メンテナンス冷却系は高所配置となっているが、1次カバーガス圧が約 $1.9\text{kg/cm}^2\text{a}$ であるので、1次メンテナンス冷却系から漏洩が発生した場合には、1次アルゴンガス系を隔離する必要がある。隔離に失敗すると、原子炉容器液位は1次メンテナンス冷却系出口ノズルまで低下する可能性がある。また、崩壊熱除去にメンテナンス冷却系が使用できず、起因事象発生後のプラント応答が異なるため、起因事象3番「1次主冷却系漏洩」からは独立した起因事象としている。

起因事象6番「1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ」

1次主冷却系循環ポンプの主モータが故障または何らかの信号によりトリップし、1次主冷却系の流量が低下して原子炉トリップ信号が発せられる事象である。1次主冷却系循環ポンプには、主モータとポニーモータが備えられており、崩壊熱除去運転時にはポニーモータによって駆動されるので、崩壊熱除去運転には補助冷却設備3ループとメンテナンス冷却系及び水・蒸気系が使用できる。なお、ポンプ自体の故障等で強制循環能力が喪失するような事象は次の起因事象7番に含まれる。

起回事象7番「1次主冷却系強制循環能力喪失」

1次主冷却系循環ポンプ軸固着等によって1次主冷却系の流量が低下して原子炉トリップ信号が発せられる事象である。当該ループの強制循環能力は喪失するが、自然循環は可能である。

起回事象8番「1次主冷却系逆止弁閉」

1次主冷却系のあるループにおいて、逆止弁が誤閉し、1次主冷却系の流量が低下して原子炉トリップ信号が発せられる事象である。当該ループは強制循環、自然循環とも不能となり、崩壊熱除去運転に使用できない。

起回事象9番「2次主冷却系流量減少」

本起回事象は起回事象6番「1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ」と同様、2次主冷却系循環ポンプの主モータが故障または蒸気発生器ナトリウム液位異常信号等によりトリップし、2次主冷却系の流量が低下して原子炉トリップ信号が発せられる事象である。2次主冷却系循環ポンプにも、主モータとポニーモータが備えられており、崩壊熱除去運転時にはポニーモータによって駆動されるので、崩壊熱除去運転には補助冷却設備3ループとメンテナンス冷却系及び水・蒸気系が使用できる。なお、ポンプ自体の故障等で強制循環能力が喪失するような事象は次の起回事象10番に含まれる。

起回事象10番「2次主冷却系強制循環能力喪失」

本起回事象は起回事象7番「1次主冷却系強制循環能力喪失」と同様、2次主冷却系循環ポンプ軸固着や蒸気発生器水漏洩誤信号等によって2次主冷却系の流量が低下して原子炉トリップ信号が発せられる事象である。当該ループの強制循環能力は喪失するが、自然循環は可能である。

起回事象11番「2次主冷却系漏洩」

本起回事象には2次主冷却系機器・配管からの2次冷却材漏洩、及び2次冷却系誤ドレイン事象が含まれる。漏洩の発生した当該ループは崩壊熱除去運転には使用できないものと想定する。

起回事象12番「外部電源喪失」

外部電源が喪失すると常用母線電圧低信号が発せられ、原子炉トリップ信号が発せられる。ディーゼル発電機の起動に失敗すると、補助冷却設備並びにメンテナンス冷却系による強制循環除熱は不能となり、水・蒸気系による崩壊熱除去も不能となるが、補助冷却設備による自然循環除熱は可能である。

起回事象13番「給水流量喪失」

本起回事象は、給水の漏洩、各種止め弁の誤閉、各種蒸気逃し弁の誤開、給水ポンプト

リップ等により、給水流量が減少し、蒸気発生器の除熱能力が減少する事象である。蒸気発生器出口ナトリウム温度高信号により、原子炉トリップ信号が発せられる。本起回事象が発生しても、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系による崩壊熱除去には影響はない。給水流量が喪失する原因としては、給水ポンプの故障の他に、配管漏洩などもあるため、本評価では本起回事象が発生すると、水・蒸気系による崩壊熱除去は不能となるとした。

起回事象14番「タービントリップ」

本起回事象は何らかの原因でタービンがトリップし、主蒸気止め弁閉信号により原子炉トリップ信号が発せられる事象である。本起回事象が発生しても、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系による崩壊熱除去には影響はない。タービンがトリップする原因としてはタービン自身の故障の他に、復水器の真空度低下などもあるため、本評価では本起回事象が発生すると、水・蒸気系による崩壊熱除去は不能となるとした。

起回事象15番「蒸気発生器伝熱管破損」

本起回事象が発生すると、当該蒸気発生器の水／蒸気系をドレンして、ナトリウム側を隔離し、ナトリウム・水反応の進展を抑制する機能が必要である。この機能に失敗すると、2次主冷却系の圧力が上昇し、中間熱交換器伝熱管の健全性が損なわれ、1次主冷却材が格納容器をバイパスして環境に放出される可能性がある。蒸気発生器伝熱管破損の発生したループは崩壊熱除去運転には使用できないものと想定する。

起回事象16番「局所的燃料破損」

本起回事象は燃料の過出力または冷却材流路閉塞等によって、燃料被覆管が破損する事象である。燃料破損の早期検出に失敗すると、燃料破損が炉心全体に波及し、炉心が冷却可能形状を維持できなくなる可能性がある。

起回事象18番「原子炉トリップ」

本起回事象は、誤信号による自動原子炉トリップ、運転員の誤操作による手動原子炉トリップ、また、直接は炉心に脅威を与えないが手動により原子炉トリップに至る事象である。

4.1.2 起回事象の定量化

第4.1.1章で同定した各起回事象の1炉年当りの発生頻度を定量化した。定量化に当たっては、次の2つの方法を用いた。第1の方法は一般的な方法で、機器故障率データとプラントの機器数、配管長さ、稼働率等から各起回事象の発生頻度を算出するものである。これらの定量化に使用したプラント固有のデータを表4.1-2にまとめて示す。これに対して第2の方法は、常陽や国内軽水炉の運転経験データを用いて起回事象をマクロに定量化する方法（グローバル法）である。一般に第2の方法で定量化した結果の方が、発生

頻度が低く評価される場合が多く、当然のことながら日本の軽水炉の起回事象発生頻度の実績に近い。そこで、本評価では全起回事象をまず第1の方法で定量化し、第2の方法で定量化できる起回事象についてはその定量化結果を採用することとした。

表4.1-3に起回事象の発生頻度を上記の2つの方法で定量化した結果を対比して示す。起回事象15個の内、6番「1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ」、7番「1次主冷却系循環能力喪失」、9番「2次主冷却系流量減少」、12番「外部電源喪失」、13番「給水流量喪失」、14番「タービントリップ」、18番「原子炉トリップ」の7つの起回事象については第2の方法で定量化した結果を用い、残り8個については第1の方法で定量化した結果を用いた。

その結果、起回事象発生頻度合計値は1炉年あたり約1.9回と評価された。発生頻度が0.1回／炉年以上と評価された起回事象は、起回事象18番「原子炉トリップ」（約0.57回／炉年）、起回事象9番「2次主冷却系流量減少」（約0.49回／炉年）、起回事象13番「給水流量喪失」（約0.31回／炉年）、起回事象14番「タービントリップ」（約0.19回／炉年）の4事象である。

冷却材の漏洩事象は、起回事象11番「2次主冷却系漏洩」（約 5.3×10^3 ／炉年）、起回事象3番「1次主冷却系漏洩」（約 1.6×10^3 ／炉年）、起回事象5番「1次メンテナンス冷却系漏洩」（約 7.2×10^4 ／炉年）と、いずれも 10^2 ／炉年を下回る。

4.2 イベントツリー評価

第4.1章で述べた各起因事象毎にイベントツリーを作成する。イベントツリーはある起因事象が発生した場合に、いかなる状態になりうるかを検討する帰納的手法であり、プラントの異常を緩和する機能またはシステムの成功・失敗を二分岐図で表す論理モデルである。イベントツリーの分岐は上が成功、下が失敗を表わす。分岐する点の機能またはシステムをイベントツリーのヘディングと呼ぶ。これらのヘディングは実際のプラント応答の順に従ってイベントツリーに出現する。分岐条件の決定に際しては起因事象とヘディング間及びヘディング相互の従属性が考慮される。

解析手法として、「小規模イベントツリー・大規模フォールトツリー手法」と「大規模イベントツリー・小規模フォールトツリー手法」とがあるが、本評価では、前者に基づいた評価手法を採用している。イベントツリー作成は2段階に分けて行う。まず初めに、機能に関するイベントツリー（機能イベントツリー）を作成し、次に、各機能を達成するシステムに関するイベントツリー（システムイベントツリー）を作成する。最終的には、システムイベントツリーで事故シーケンスを同定する。

4.2.1 機能イベントツリー

イベントツリー作成の第一段階は、機能イベントツリーの作成である。機能イベントツリーは起因事象が発生した場合、プラントの異常を緩和する機能について、その成功・失敗を二分岐図で表すものである。これらのヘディングの出現順序は、実際のプラント応答の順を考慮して決定される。また、分岐条件の決定に際しては起因事象とヘディング間及びヘディング相互の従属性が考慮される。

高速炉の安全機能として要求されるのは、起因事象によって多少異なるが、主なものは時系列順に「原子炉出力低下」、「原子炉容器液位確保」、「崩壊熱除去」の3種類である。

1) 原子炉出力低下

すべての起因事象に対して必要な機能であり、これに失敗すると、崩壊熱除去や原子炉容器液位確保などの他の機能の成否に拘らず、炉心損傷に至る可能性がある。

2) 原子炉容器液位確保

機能起因事象が1次冷却材の漏洩の場合、崩壊熱除去系の機能が損なわれないようにするためには、原子炉容器の液位を確保することが必要である。原子炉出力低下に成功しても、原子炉容器液位が出口ノズル高さ配管レベル以下に低下すると崩壊熱除去が不能となり、炉心損傷に至る可能性がある。

3) 崩壊熱除去

すべての起因事象に対して必要な機能である。原子炉出力低下に成功し、原子炉容器液位確保に成功しても、崩壊熱除去に失敗すると、炉心損傷に至る可能性がある。

以上の1)から3)の機能は、他の機能が健全であっても、その機能の単独の喪失によって直接、炉心損傷に至る可能性があると考えられるプラント応答機能である。起因事象によっては、上記の機能の他にいくつかの機能が必要となるが、これについてはその機能を果たすシステムを挙げながら、第4.2.2章の「システムイベントツリー」で論じる。

起因事象を緩和するプラントの機能の成功・失敗の組み合わせによって、プラントが到達すると考えられる状態をレベル-2 PSAとの関連を考慮して分類し、類似しているものをまとめて事故カテゴリーと呼ぶ。8つの事故カテゴリーを設けた。以下に各カテゴリーについて記す。1)の成功シーケンスのカテゴリー以外はすべて炉心損傷に至るシーケンスである。但し、ここで炉心損傷とは、「異常時に必要な安全機能が不十分であることによって、炉心あるいは冷却材バウンダリーが設計上の基準を超えた状態」と定義しており、必ず炉心損傷に至るというものではない。

事故カテゴリー

1) 成功 (Success)

起因事象発生後、プラントの異常緩和機能の働きによって、炉心損傷に至らないシーケンス。

2) LORL (Loss of Reactor Level)

1次冷却材漏洩事象時に、原子炉トリップには成功するが、原子炉容器内冷却材液位の確保に失敗する事象。この場合、原子炉容器液位が出口ノズル高さ以下に低下し、崩壊熱の除去に失敗する。

3) PLOHS (Protected Loss of Heat Sink)

原子炉がトリップした後に、除熱源が喪失し、崩壊熱除去に失敗する事象。

4) ATWS (Anticipated Transients Without Scram)

1 ULOF (Unprotected Loss of Flow)

炉心流量減少時に原子炉のトリップに失敗する事象。

2 UTOP (Unprotected Transient Over Power)

正の反応度が挿入され、原子炉出力が上昇した際に原子炉のトリップに失敗する事象。

3 ULOPI (Unprotected Loss of Piping Integrity)

1次冷却材漏洩時に原子炉トリップに失敗する事象。

4 ULOHS (Unprotected Loss of Heat Sink)

除熱源喪失時に原子炉トリップに失敗する事象。

5 UTOP/ULOF

前述2と1の重ね合わせ事象。すなわち、正の反応度挿入時に原子炉トリップ信号が発せられ、これにより1次主冷却系循環ポンプ主モータはトリップするが、制御棒の挿入による原子炉トリップに失敗する事象。

図4.2-1に、一般的な機能イベントツリーの例を示す。一般的な起因事象に対して必要な機能は、原子炉出力低下、原子炉容器液位確保、崩壊熱除去である。起因事象が1次冷却材の漏洩ではない場合は、原子炉容器液位確保機能は必要ない。1番目のシーケンスは、原子炉出力低下、原子炉容器液位確保、崩壊熱除去の全てに成功して、炉心損傷には至らないシーケンスである。2番目は、原子炉出力低下、原子炉容器液位確保に成功するが、崩壊熱除去に失敗するシーケンスであり、PLOHSに至る。3番目のシーケンスは原子炉トリップには成功するが、原子炉容器液位確保に失敗するシーケンスである。原子炉容器液位確保に失敗すると、崩壊熱除去は不可能となるので、イベントツリーは崩壊熱除去のヘディングの下では分岐せず、LORLに至る。4番目のシーケンスは原子炉トリップに失敗するシーケンスである。原子炉トリップに失敗すると、原子炉容器液位確保、崩壊熱除去の成功・失敗に拘らず、ATWSに至るのでイベントツリーは、原子炉容器液位確保、崩壊熱除去の下で分岐しない。

4.2.2 システムイベントツリー

機能イベントツリーが作成されると、次にシステムイベントツリーを作成する。システムイベントツリーは機能イベントツリーのヘディングに現れる機能を、その機能を果たすシステムに置き換えたイベントツリーである。各機能を果たすシステムは以下のとおりである。

1) 原子炉出力低下

原子炉出力低下（原子炉トリップ）には、原子炉トリップ信号が発せられ、原子炉トリップ遮断器が作動し、制御棒が挿入される必要がある。原子炉停止系には主炉停止系と後備炉停止系があり、各々、別の原子炉トリップ信号によって作動し、一方の作動によって原子炉を停止することができる。主炉停止系と後備炉停止系の作動に、時間的な順番はないが、イベントツリー上では主炉停止系を先に、後備炉停止系を後に配置してある。原子炉トリップ信号は起因事象によって異なる。また、原子炉トリップ信号には、起因事象毎に考えられる猶予時間によって運転員による手動トリップ信号に期待する場合と、しない場合がある。具体的には、起因事象がI05「1次メンテナンス冷却系漏洩」、I16「局所的燃料破損」の場合には、手動によるトリップ信号にも期待するが、他の起因事象については自動信号にのみ期待するものとする。原子炉トリップ信号が発生し、原子炉トリップ遮断器が開となると1次主冷却系循環ポンプがトリップされるので、制御棒が挿入されないと、起因事象が2次系以降に係わるものでもULOFとなるが、トリップ信号が発生しないと、ULOHSとなるので、イベントツリー上では、原子炉ト

トリップ信号発生と遮断器作動までを「原子炉トリップ信号発生」に含め、「制御棒挿入」は別のヘディングとしている。なお、起因事象がI18「原子炉トリップ」の場合には、トリップ信号の発生を前提としているのでそのヘディングは必要ない。

2) 原子炉容器液位確保

1次冷却材漏洩時には、ガードベッセルが健全であることが要求される。また、漏洩量を抑制するために、1次主冷却系循環ポンプを3ループともトリップする必要がある。さらに、原子炉通常運転時、原子炉容器カバーガスは約 $1.9\text{kg/cm}^2\text{a}$ に加圧されているため、漏洩量抑制のために1次アルゴンガス系を隔離する必要がある。

3) 崩壊熱除去

崩壊熱除去機能を果たすシステムは、補助冷却設備とメンテナンス冷却系である。補助冷却系の循環モードには強制循環と自然循環がある。メンテナンス冷却系の循環モードは強制循環のみである。なお、補助冷却設備及びメンテナンス冷却系の強制循環には、非常用電源が確立されている必要がある。

起因事象によって、崩壊熱除去系として使用できるループ数並びに循環モードが異なる。そこでまず、水・蒸気系が崩壊熱除去に使用できない場合の運転モードを5つ(D1～D5)に分類し、水・蒸気系が崩壊熱除去に使用できる場合の運転モードをこの5つのモードに対応して設けた(D6～D10)。

第1モードは主冷却系統に影響のない起因事象が発生した場合であり、崩壊熱除去は、補助冷却系が3ループとも強制循環、自然循環ともに可能で、メンテナンス冷却系も使用可能な場合。

第2モードは起因事象が主冷却系の漏洩等の場合で、補助冷却系3ループの内、1ループが強制循環、自然循環とも不能で、メンテナンス冷却系が使用可能な場合。

第3モードは起因事象が主冷却系ポンプ故障等の場合で、補助冷却系3ループの内、1ループが強制循環は不能だが、自然循環は可能で、メンテナンス冷却系が使用可能な場合。

第4モードは起因事象が外部電源喪失の場合で、補助冷却系は3ループとも強制循環、自然循環とも可能で、メンテナンス冷却系も使用可能だが、ディーゼル発電機の運転が必要な場合。水・蒸気系は使用できないものとしており、結果的に第9モードは第4モードと区別する必要はなくなる。

第5モードは起因事象がメンテナンス冷却系からの漏洩の場合で、補助冷却設備は3ループとも強制循環、自然循環ともに使用可能だが、メンテナンス冷却系が使用で

きない場合である。

第6モードは第1モードで使用できる崩壊熱除去系に加えて水・蒸気系が使用できる場合。

第7モードは第2モードで使用できる崩壊熱除去系に加えて水・蒸気系が使用できる場合。

第8モードは第3モードで使用できる崩壊熱除去系に加えて水・蒸気系が使用できる場合。

第9モードは第4モードで使用できる崩壊熱除去系に加えて水・蒸気系が使用できる場合として設定したが、起因事象が外部電源喪失の場合は、水・蒸気系は使用できないものとしており、結果的に第9モードは第4モードと区別する必要はなくなる。

第10モードは第5モードで使用できる崩壊熱除去系に加えて水・蒸気系が使用できる場合。

次に、各起因事象に対するシステムイベントツリーについて以下に説明する。

1) 正の反応度挿入 (図4.2-2)

正の反応度挿入の起因事象発生時に、原子炉出力低下の機能を果たすのは、主炉停止系と後備炉停止系である。シーケンス1は、主炉停止系のトリップ信号の発生・制御棒挿入、崩壊熱除去 (D6) の全てが成功した場合で、炉心損傷には至らない (success)。シーケンス2は主炉停止系のトリップ信号発生・制御棒挿入には成功するが、崩壊熱除去に失敗し、PLOHS至るシーケンスである。シーケンス3は主炉停止系の原子炉トリップ信号発生には成功し、主炉停止系の制御棒挿入に失敗、しかし、後備炉停止系が成功して崩壊熱除去にも成功して炉心損傷には至らない (success)。シーケンス4は原子炉停止はシーケンス3と同様に成功するが、崩壊熱除去に失敗してPLOHS至るシーケンスである。シーケンス5は主炉停止系、後備炉停止系とも原子炉トリップ信号発生には成功するが、ともに制御棒挿入に失敗するシーケンスである。原子炉トリップ信号が発せられると、1次主冷却系循環ポンプ主モータはトリップする。一方、制御棒挿入に失敗しているので原子炉出力は低下せず、UTOP/ULOFに至る。シーケンス6は主炉停止系の信号発生成功、制御棒挿入失敗の後に、後備炉停止系が原子炉トリップ信号発生に失敗するシーケンスである。この場合も、シーケンス5と同じくUTOP/ULOFに至る。シーケンス7は主炉停止系が原子炉トリップ信号発生に失敗するが、後備炉停止系が成功して、崩壊熱除去にも成功し、炉心損傷には至らない (success)。シーケンス8は原子炉停止はシーケンス7と同様に成功するが、崩壊熱除去に失敗してPLOHS至るシーケンスである。シーケンス9はシーケンス5と同様にUTOP/ULOFに至るシーケンスである。最後

のシーケンス10は主炉停止系、後備炉停止系とも原子炉トリップ信号の発生に失敗するシーケンスである。原子炉トリップ信号が発せられていないので、1次主冷却系循環ポンプもトリップしていない。従って、事故カテゴリーはUTOPとなる。

3) 1次主冷却系漏洩 (図4.2-3)

この起因事象に対して、原子炉出力低下の機能を果たすのは、主炉停止系と後備炉停止系である。原子炉容器液位確保の機能を果たすのは、1次主冷却系循環ポンプトリップ、1次アルゴンガス系隔離、ガードベッセル健全性である。起因事象が1次主冷却系漏洩であるので、補助冷却系3ループの内1ループは崩壊熱除去に使用できない。よって、崩壊熱除去モードは第7モード (D7) となる。

シーケンス1は、原子炉出力低下、原子炉容器液位確保を果たすシステムが全て成功し、崩壊熱除去にも成功して、炉心損傷には至らないシーケンスである。シーケンス2は、崩壊熱除去に失敗する以外はシーケンス1と同じであり、PLOHSに至る。シーケンス3は原子炉出力低下には成功するが、原子炉容器液位確保機能を果たすシステムのうち、1次アルゴンガス系隔離に失敗し、LORLに至るシーケンスである。原子炉容器液位の確保に失敗すると、崩壊熱除去は不可能となり、崩壊熱除去機能のヘディングの下では分岐しない。シーケンス4は原子炉出力低下には成功するが、1次主冷却系循環ポンプトリップに失敗し、LORLに至るシーケンスである。シーケンス5は、原子炉出力低下には成功するが、ガードベッセルの健全性が損なわれLORLに至る。シーケンス6からシーケンス10はそれぞれ主炉停止系が失敗するが、後備炉停止系が成功しており、シーケンス1からシーケンス5までと同様である。シーケンス11とシーケンス12は、主炉停止系も後備炉停止系も失敗し、起因事象が1次主冷却系漏洩であるのでULOPIに至る。シーケンス13からシーケンス19はシーケンス6からシーケンス12と同様である。

5) 1次メンテナンス冷却系漏洩 (図4.2-4)

本起因事象発生時に、原子炉出力低下の機能を果たすシステムは、主炉停止系と後備炉停止系である。1次メンテナンス冷却系には隔離弁が設けられていないので、原子炉容器液位確保の機能を果たすのは1次アルゴンガス系隔離だけである。起因事象が1次メンテナンス冷却系からの漏洩であるので、メンテナンス冷却系は崩壊熱除去に使用できない。よって崩壊熱除去モードは第10モード (D10) である。シーケンス1は主炉停止系の原子炉トリップ信号 (手動信号あり)、制御棒挿入、崩壊熱除去の全てに成功して炉心損傷には至らないシーケンスである。シーケンス2は崩壊熱除去に失敗する以外はシーケンス1と同じであり、PLOHSに至る。シーケンス3は原子炉出力低下には成功するが、原子炉容器液位確保に失敗してLORLに至るシーケンスである。シーケンス4は、主炉停止系は失敗するが、後備炉停止系が成功し、崩壊熱除去にも成功して炉心損傷には至らないシーケンスである。シーケンス5は崩壊熱除去に失敗する以外はシーケンス3と同じであり、PLOHSに至る。シーケンス6はシーケンス3と同様にLORLに至る。シーケンス7は主・後備とも信号発生には成功するが、制御棒挿入に失敗するシーケンスである。この場合、原子炉トリップ信号が発せられているので、1次主冷却系循環ポンプはトリッ

プしており、制御棒挿入に失敗しているのでULOFに至る。シーケンス8は、主炉停止系は信号発成功、制御棒挿入失敗、後備炉停止系は信号の発生に失敗するシーケンスであり、シーケンス5と同様ULOFに至る。シーケンス9からシーケンス12はシーケンス4からシーケンス7と同様である。最後のシーケンス13は、主・後備とも原子炉トリップ信号（手動信号あり）に失敗するシーケンスである。この場合、原子炉トリップ信号が発せられていないので、1次主冷却系循環ポンプもトリップせず、原子炉出力及び1次主冷却系流量は起因事象発生前と変わらないが、1次アルゴンガス系の隔離も行われないので、ULOPIに至る。

6) 1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ（図4.2-5）

本起因事象のシステムイベントツリーは、1)の正の反応度挿入のシステムイベントツリーとヘディング、分岐とも同一である。しかし、起因事象が反応度挿入事象ではなく、流量減少事象であるので、シーケンス5、6、9、10の事故カテゴリーがULOFとなる点が異なる。崩壊熱除去モードは第6モード（D6）である。

7) 1次主冷却系強制循環能力喪失（図4.2-6）

本起因事象のシステムイベントツリーは、6)の1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップのシステムイベントツリーと類似するが、起因事象によって、補助冷却設備の1ループが強制循環不能になっているので、崩壊熱除去モードが第8モード（D8）になっている点が異なる。

8) 1次主冷却系逆止弁閉（1ループ）（図4.2-7）

本起因事象のシステムイベントツリーは、7)の1次主冷却系強制循環能力喪失のシステムイベントツリーと類似するが、起因事象によって、補助冷却設備の1ループが強制循環、自然循環とも不能になっているので、崩壊熱除去モードが第7モード（D7）になっている点が異なる。

9) 2次主冷却系流量喪失（図4.2-8）

本起因事象のシステムイベントツリーは、6)の1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップのシステムイベントツリーとヘディング、分岐とも同一である。しかし、起因事象が1次主冷却系ではなく、2次主冷却系の流量減少事象であるので、シーケンス10の事故カテゴリーがULOHSとなる点が異なる。崩壊熱除去モードは第6モード（D6）である。

10) 2次主冷却系強制循環能力喪失（図4.2-9）

本起因事象のシステムイベントツリーは、9)の2次主冷却系流量喪失のシステムイベントツリーと類似するが、起因事象によって、補助冷却設備の1ループが強制循環不能となっているので、崩壊熱除去モードが第8モード（D8）になっている点が異なる。

11) 2次主冷却系漏洩（図4.2-10）

本起因事象のシステムイベントツリーは、10)の2次主冷却系強制循環能力喪失のシステムイベントツリーと類似するが、起因事象によって、補助冷却設備の1ループが強制循環、自然循環とも不能になっているので、崩壊熱除去モードが第7モード (D7) になっている点が異なる。

12) 外部電源喪失 (図4.2-11)

本起因事象発生後、外部電源復旧までの間にディーゼル発電機による非常用電源確立に失敗すると、補助冷却設備、メンテナンス冷却系による強制循環除熱は不可能となり、水・蒸気系による崩壊熱除去も不能となるが、補助冷却設備による自然循環除熱は可能であるので、崩壊熱除去モードが第4モード (D4) になっている他は6)1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップのイベントツリーと同じである。

13) 給水流量喪失 (図4.2-12)

本起因事象のイベントツリーは9)の2次主冷却系流量喪失イベントツリーと同じであるが、原子炉トリップ信号の種類が異なる。また、給水流量が喪失する原因としては、給水ポンプの故障の他に、配管漏洩などもあるため、本評価では給水流量喪失事象が発生すると、水・蒸気系による崩壊熱除去は不能となるとしたので崩壊熱除去モードは第1モード (D1) である。

14) タービントリップ (図4.2-13)

本起因事象のイベントツリーも9)の2次主冷却系流量喪失イベントツリーと同じであるが、原子炉トリップ信号の種類が異なる。また、タービンがトリップする原因としてはタービン自身の故障の他に、復水器の真空度低下などもあるため、本評価では本起因事象が発生すると、水・蒸気系による崩壊熱除去は不能となるとしたので崩壊熱除去モードは第1モード (D1) である。

15) 蒸気発生器伝熱管破損 (図4.2-14)

起因事象が蒸気発生器伝熱管破損の場合には、原子炉トリップ信号より先に水漏洩信号が発せられ、ナトリウム・水反応生成物収納設備が作動する。水漏洩信号により2次主冷却系循環ポンプがトリップ信号が発せられ、これにより原子炉トリップ信号が発せられる。ナトリウム・水反応生成物収納設備が失敗すると、中間熱交換器伝熱管の健全性が問題になる。よって本起因事象のイベントツリーのヘディングには、これらの起因事象緩和、初期プラント応答のためのシステムが加えられている。起因事象緩和、初期プラント応答の後には、11)2次主冷却系漏洩のイベントツリーと類似しているが、中間熱交換器伝熱管の健全性が損なわれた場合には1次主冷却系循環ポンプトリップがヘディングとして、崩壊熱除去の前に加えられている点が異なる。崩壊熱除去モードは第7モード (D7) である。

16) 局所的燃料破損 (図4.2-15)

本起因事象発生時に、原子炉出力低下の機能を果たすシステムは主炉停止系と後備炉停止系である。シーケンス1、3、7は原子炉出力低下に成功し崩壊熱除去にも成功して炉心損傷に至らないシーケンスである。シーケンス2、4、8は原子炉出力低下には成功するが、崩壊熱除去に失敗し、PLOHSに至る。

シーケンス5、6、9は主または後備炉停止系どちらかの原子炉トリップ信号が発せられているのに、制御棒挿入に失敗しており、ULOFに至る。シーケンス10は、原子炉トリップ信号発生に失敗し、原子炉出力は低下しないが、1次主冷却系循環ポンプもトリップせず、炉心冷却形状が維持されて、炉心損傷には至らないシーケンスである。シーケンス11は、シーケンス10と同様だが、炉心冷却形状が維持されず、炉心流量が減少してULOFに至る。崩壊熱除去モードは第6モード (D6) である。

18) 原子炉トリップ (図4.2-16)

本起因事象は、上記1)から17)までの起因事象以外の何らかの原因で原子炉トリップ信号が発せられる事象であるので、原子炉出力低下の機能を果たすのは主及び後備炉停止系の制御棒挿入のみである。崩壊熱除去モードは第6モード (D6) である。本起因事象のイベントツリーは6)1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップのイベントツリーと殆ど同じだが、原子炉トリップ信号は起因事象ですでに発せられているので、原子炉トリップ信号発生失敗のヘディングが不要である。

表4.2-1に起因事象の一覧表を、表4.2-2にフロントラインシステム略号の一覧表を、表4.2-3に崩壊熱除去系の運転モードを、そして表4.2-4崩壊熱除去系の運転モードと起因事象の対応表を示す。

表4.1-1 もんじゅ起因事象と大型炉起因事象の対比

コード	もんじゅ起因事象	大型炉起因事象
I01	正の反応度挿入	正の反応度挿入
I02	1次主冷却系コールドレグ破損	
I03	1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）	1次主冷却系漏洩
I04	1次主冷却系漏洩（ガードベッセル外）	
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩（ホットレグノズルより低所）	1次メンテナンス冷却系漏洩
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ	1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）	1次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）
I08	1次主冷却系逆止弁閉（1ループ）	1次主冷却系逆止弁閉（1ループ）
I09	2次主冷却系流量減少	2次主冷却系流量減少
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）	2次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）
I11	2次主冷却系漏洩	2次主冷却系漏洩
I12	外部電源喪失	外部電源喪失
I13	給水流量喪失	給水流量喪失
I14	タービントリップ	タービントリップ
I15	蒸気発生器伝熱管破損	蒸気発生器伝熱管破損
I16	局所的燃料破損	局所的燃料破損
I17	ディーゼル建物電気設備室空調装置故障*	
I18	原子炉トリップ	原子炉トリップ

*非常用電源設備冷却用

表4.1-2 プラント固有データ (1 / 2)

Code	Description	Value	Unit
001	GENERIC: plant operating rate per year	0.8	No Unit
002	PHTS: Number of PHTS loops	3	No Unit
003	PHTS: Cold leg piping length per loop	0	ft
004	PHTS: Piping length within GV per loop	200	ft
005	PHTS: Piping length outside of G/V per loop	30	ft
006	PHTS AUX: Pump overflow column piping length per loop	100	ft
007	PHTS AUX: PSOS piping length of overflow line	0	ft
008	PHTS AUX: PSOS number of manual valve in overflow line	0	No Unit
009	PHTS AUX: PSAS makeup line piping length within G/V	10	ft
010	PHTS AUX: PSAS overflow line piping length	10	ft
011	PHTS AUX: PSAS makeup line piping length outside of G/V	20	ft
012	PHTS AUX: No. of PHTS Drain & Vent line Manual Valves per Loop(Fst)	8	No Unit
013	PHTS AUX: PHTS Drain & Vent Line Piping Length within G/V per Loop	90	ft
014	PHTS AUX: PHTS Drain & Vent Line Piping length outside G/V per Loop	450	ft
015	IHTS: Piping length (Total ; include all 3 loops)	900	ft
016	IHTS: No. of IHX per loop	1	No Unit
017	IHTS: No. of Pumps per loop	1	No Unit
018	IHTS: No. of Rupture Disks per loop	2	No Unit
019	IHTS: Number of SG sodium inlet/outlet valves	2	No Unit
020	IHTS: No. of SGs per loop (EV, SH)	1	No Unit
021	IHTS: No. of Isolation MOVs per Loop	2	No Unit
022	IHTS: IHTS Isolation Valve Bypass Line Piping Length (.LT.4inch)	50	ft
023	IHTS: Isolation Valve Bypass Line, No. of Valves	1	No Unit
024	IHTS AUX: Number of CVs in SAGS	1	No Unit
025	IHTS AUX: Number of AOVs in SAGS	2	No Unit
026	IHTS AUX: Number of Pressurized Tanks in SAGS (pump,ovflw clm,EV,SV)	4	No Unit
027	IHTS AUX: Piping Length of SAGS (.GT.4inch)	200	ft
028	IHTS AUX: Pump Overflow Column System Piping Length (.GT.4inch)	100	ft
029	IHTS AUX: Pump Overflow Column System, No. of Overflow column per loop	1	No Unit
030	IHTS AUX: Pump Overflow Column System, No of Manual Valve per Loop	1	No Unit

表4.1-2 プラント固有データ (2/2)

Code	Description	Value	Unit
031	IHTS AUX: No of Drain Line in IHTS per Loop	10	No Unit
032	IHTS AUX: Drain/Vent Line , Piping Length per Loop	1300	ft
033	IHTS AUX: Drain/Vent Line , No of Manual Valves	18	No Unit
034	IHTS AUX: Secondary Auxiliary Sodium System Piping Length(Ovfl clm-CV)	50	ft
035	IHTS AUX: Sec Aux Sodium System, Piping Length(Makeup line,IHTS_CV)	9	ft
036	IHTS AUX: Sec Aux Sodium System, No. of Check Valve	1	No Unit
037	ACS : Piping Length per Loop (.GT.4inch)	200	ft
038	ACS : No of Air Cooler per Loop	1	No Unit
039	ACS : No of Control Valves(MOV) per Loop	1	No Unit
040	ACS : Piping Length of Control Valve Bypass Line	30	ft
041	ACS : No of Valves in Control Valve Bypass Line	1	No Unit
042	MCS : Piping length within G/V and outside of Reactor Vessel (4 inch)	0	ft
043	MCS : Piping length outside of G/V (btwn R/V G/V and Isolation Valve)	0	ft
044	MCS : Primary Loop Piping Length	200	ft
045	MCS : Number of MCS MOVs outside of G/V	0	No Unit
046	MCS : Number of EM Pumps in MCS Primary Loop	1	No Unit
047	MCS : MCS Vent Line Piping Length	56	ft
048	MCS : Number of Manual Valves in MCS Vent Line	3	No Unit
049	Water/Steam: No of SH Steam Stop Valves	2	No Unit
050	Water/Steam: No of Main Steam Control Valves	4	No Unit
051	Water/Steam: Loop Steam Line Piping Length per Loop	240	ft
052	Water/Steam: Loop Steam Line, No of Steam Drumn per Loop	1	No Unit
053	Water/Steam: Loop Steam Line, No of MOVs per Loop	31	No Unit
054	Water/Steam: Feedwater System, No of Manual Valves on Drain Lines	31	No Unit
055	Water/Steam: Extract Steam Line Piping Length (.GT.3inch ; all loops)	300	ft
056	Water/Steam: Extract Steam Line, No of MOVs (all loops)	3	No Unit
057	Water/Steam: Extract Steam Line, No of CVs (all loops)	3	No Unit
058	Electrical: No. of Emergency 6.6 kv AC Buses	3	No Unit
059	Electrical: No. of Emergency 110v AC/DC Buses	6	No Unit
060	IHTS AUX: Number of manual valves in SH inlet/outlet line	1	N/U
061	IHTS AUX: Number of vapor traps in SH inlet/outlet line	2	N/U

表4.1-3 大型炉起因事象発生頻度

コード	起因事象 記述	発生頻度/炉年		
		一般的な方法	グローバル法	採用値
I01	正の反応度挿入	2.8E-2		2.8E-2
I02				
I03	1次主冷却系漏洩	1.6E-3		1.6E-3
I04				
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩	7.2E-4		7.2E-4
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	6.7E-1	7.2E-2	7.2E-2
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	1.8E-1	7.2E-2	7.2E-2
I08	1次主冷却系逆止弁閉(1ループ)	3.2E-3		3.2E-3
I09	2次主冷却系流量減少	2.7E+0	4.9E-1	4.9E-1
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失(1ループ)	5.1E-2		5.1E-2
I11	2次主冷却系漏洩	5.3E-3		5.3E-3
I12	外部電源喪失	1.1E-1	5.2E-2	5.2E-2
I13	給水流量喪失	4.7E+0	3.1E-1	3.1E-1
I14	タービントリップ	2.0E+0	1.9E-1	1.9E-1
I15	蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-3		6.8E-3
I16	局所的燃料破損	3.0E-4		3.0E-4
I17				
I18	原子炉トリップ	3.5E+0	5.7E-1	5.7E-1
	合計	1.4E+1	1.8E+0	1.9E+0

表4.2-1 起因事象一覧表

コード	起因事象記述
I01	正の反応度挿入
I02	
I03	1次主冷却系漏洩
I04	
I05	1次メンテナンス冷却系漏洩
I06	1次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ
I07	1次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）
I08	1次主冷却系逆止弁閉（1ループ）
I09	2次主冷却系流量減少
I10	2次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ）
I11	2次主冷却系漏洩
I12	外部電源喪失
I13	給水流量喪失
I14	タービントリップ
I15	蒸気発生器伝熱管破損
I16	局所的燃料破損
I17	
I18	原子炉トリップ

表4.2-2 フロントラインシステム一覧表

コード	システム名
A	1次アルゴンガス系隔離
C	炉心冷却形状維持
D1	崩壊熱除去第1モード*
D2	崩壊熱除去第2モード*
D3	崩壊熱除去第3モード*
D4	崩壊熱除去第4モード*
D5	崩壊熱除去第5モード*
D6	崩壊熱除去第6モード*
D7	崩壊熱除去第7モード*
D8	崩壊熱除去第8モード*
D9	崩壊熱除去第9モード*
D10	崩壊熱除去第10モード*
G	ガードベッセル健全性
P	1次主冷却系循環ポンプトリップ
RB	後備炉停止系制御棒挿入
RM	主炉停止系制御棒挿入
SB	後備炉停止系原子炉トリップ信号発生
SM	主炉停止系原子炉トリップ信号発生
T	中間熱交換器伝熱管健全性
W	ナトリウム・水反応生成物収納設備

* : 崩壊熱除去の各運転モードの説明を表4.2-3に示す。

表4.2-3 崩壊熱除去系運転モード

崩壊熱除去	補助冷却設備	メンテナンス冷却系	水・蒸気系	外部電源
第1モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	○	×	○
第2モード	1ループ強制循環不能、 自然循環不能	○	×	○
第3モード	1ループ強制循環不能、 自然循環可能	○	×	○
第4モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	○	×	×
第5モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	×	×	○
第6モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	○	○	○
第7モード	1ループ強制循環不能、 自然循環不能	○	○	○
第8モード	1ループ強制循環不能、 自然循環可能	○	○	○
第9モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	○	×	×
第10モード	全ループ強制循環可能、 自然循環可能	×	○	○

○：使用可能

×：使用不能

第9モードは第4モードと等しくなる。

表4.2-4 崩壊熱除去系運転モードと起因事象の対応

崩壊熱除去系運転モード				起因事象	
モード番号	補助冷却設備	メンテナンス冷却系	水・蒸気系		
D1	全ループ、強制循環可能、自然循環可能	○	×	I13	給水流量喪失
				I14	タービントリップ
D4	全ループ、強制循環可能、自然循環可能	○	×	I12	外部電源喪失
D5	全ループ、強制循環可能、自然循環可能	×	×	I06	1次メンテナンス冷却系漏洩
D6	全ループ、強制循環可能、自然循環可能	○	○	I01	正の反応度挿入
				I06	1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ
				I09	2次主冷却系流量減少
				I16	局所的燃料破損
				I18	原子炉トリップ
D7	1ループ、強制循環不能、自然循環不能	○	○	I03	1次主冷却系漏洩
				I08	1次主冷却系逆止弁誤閉
				I11	2次主冷却系漏洩
				I15	蒸気発生器伝熱管破損
D8	1ループ、強制循環不能、自然循環可能	○	○	I07	1次主冷却系強制循環能力喪失
				I10	2次主冷却系強制循環能力喪失
D10	全ループ、強制循環可能、自然循環可能	×	○	I06	1次メンテナンス冷却系漏洩

○：使用可能

×：使用不能

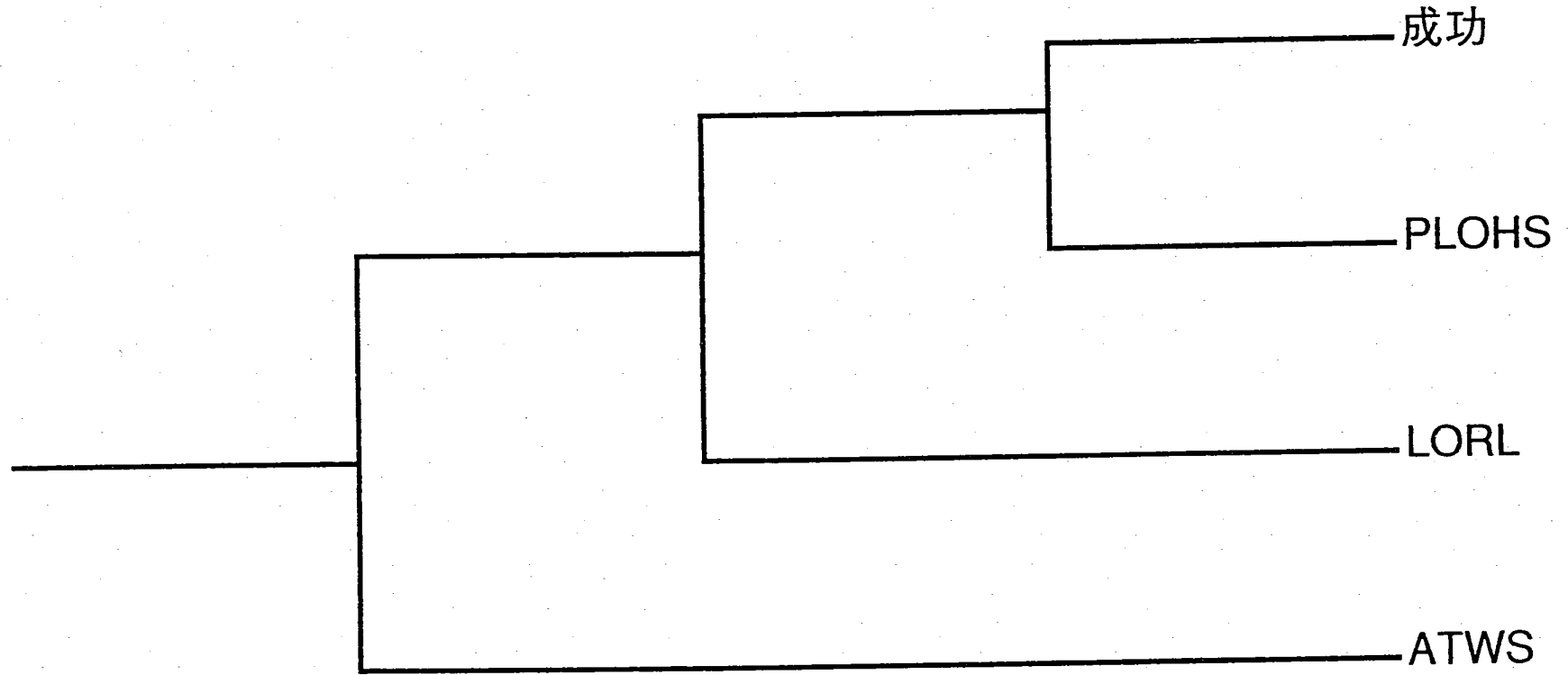
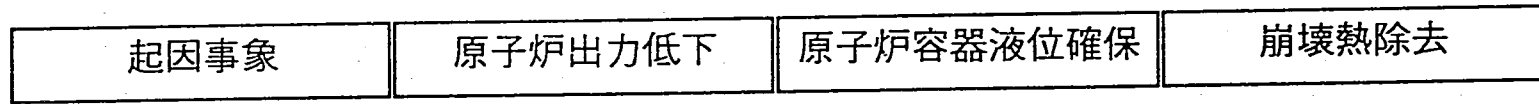


図 4.2-1 機能イベントツリー

System Event Tree Edit Program

IE : I01 : Positive Reactivity Insertion						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	AB	D6		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	UTOPULOF
						6	UTOPULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	UTOPULOF
						10	UTOP

図4.2-2 システムイベントツリー (正の反応度挿入)

System Event Tree Edit Program

IE : I03 : PHTS Leakage									Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		MS		DH			
Code	SM	RM	SB	RB	G	P	A	D7		
									1	Success
									2	PLOHS
									3	LORL
									4	LORL
									5	LORL
									6	Success
									7	PLOHS
									8	LORL
									9	LORL
									10	LORL
									11	ULOPI
									12	ULOPI
									13	Success
									14	PLOHS
									15	LORL
									16	LORL
									17	LORL
									18	ULOPI
									19	ULOPI

図4.2-3 システムイベントツリー (1次主冷却系漏洩)

System Event Tree Edit Program

IE : I05 : MCS Leakage							Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		MS	DH		
Code	SM	RM	SB	RB	A	D0		
							1	Success
							2	PLOHS
							3	LORL
							4	Success
							5	PLOHS
							6	LORL
							7	ULOF
							8	ULOF
							9	Success
							10	PLOHS
							11	LORL
							12	ULOF
							13	ULOPI

図4.2-4 システムイベントツリー (1次メンテナンス冷却系漏洩)

System Event Tree Edit Program

IE : I06 : PHTS Pump Fault/Trip in One or More Loops						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR	BR	DH				
Code	SM	RM	SB	RB	D6		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOF

図4.2-5 システムイベントツリー (1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ)

System Event Tree Edit Program

IE : I07 : Loss of Flow Capability in One PHTS Loop						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	DB		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOF

図4.2-6 システムイベントツリー（1次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ））

System Event Tree Edit Program

IE : I08 : PHTS Check Valve Closure in One Loop						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR	BR	DH				
Code	SM	AM	SB	AB	D7		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOF

図4.2-7 システムイベントツリー（1次主冷却系逆止弁閉（1ループ））

System Event Tree Edit Program

IE : I09 : Loss of Flow in One or More IHTS Loops						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D6		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOHS

図4.2-8 システムイベントツリー (2次主冷却系流量減少)

System Event Tree Edit Program

IE : I10 : Loss of Flow Capability in One IHTS Loop						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D8		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOHS

図4.2-9 システムイベントツリー（2次主冷却系強制循環能力喪失（1ループ））

System Event Tree Edit Program

IE : I11 : IHTS Leakage in One Loop						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D7		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOHS

図4.2-10 システムイベントツリー (2次主冷却系漏洩)

System Event Tree Edit Program

IE : I12 : Loss of Offsite Power						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D4		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOF

図4.2-11 システムイベントツリー (外部電源喪失)

System Event Tree Edit Program

IE : I13 : Loss of Feedwater						Seq. No.	Accident Category
F. Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D1		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOHS

図4.2-12 システムイベントツリー (給水流量喪失)

System Event Tree Edit Program

IE : I14 : Turbine Trip						Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR		BR		DH		
Code	SM	RM	SB	RB	D1		
						1	Success
						2	PLOHS
						3	Success
						4	PLOHS
						5	ULOF
						6	ULOF
						7	Success
						8	PLOHS
						9	ULOF
						10	ULOHS

図4.2-13 システムイベントツリー (タービントリップ)

System Event Tree Edit Program

IE : I15 : Steam Generator Tube Rupture

F.Code	IM		MR		BR		MS	DH	Seq. No.	Accident Category
Code	W	T	SM	RM	SB	RB	P	D7		
									1	Success
									2	PLOHS
									3	Success
									4	PLOHS
									5	ULOF
									6	ULOF
									7	Success
									8	PLOHS
									9	ULOF
									10	ULOHS
									11	Success
									12	PLOHS
									13	Success
									14	PLOHS
									15	ULOF
									16	ULOF
									17	Success
									18	PLOHS
									19	ULOF
									20	ULOHS
									21	Success
									22	PLOHS
									23	LORL
									24	Success
									25	PLOHS
									26	LORL
									27	ULOF
									28	ULOF
									29	Success
									30	PLOHS
									31	LORL
									32	ULOF
									33	ULOHS

図4.2-14 システムイベントツリー (蒸気発生器伝熱管破損)

System Event Tree Edit Program

IE : I16 : Local Fault							Seq. No.	Accident Category
F. Code	MR	BR	AP	DH				
Code	SM	RM	SB	RB	C	D6		
							1	Success
							2	PLOHS
							3	Success
							4	PLOHS
							5	ULOF
							6	ULOF
							7	Success
							8	PLOHS
							9	ULOF
							10	Success
							11	ULOF

図4.2-15 システムイベントツリー (局所的燃料破損)

System Event Tree Edit Program

IE : I18 : Reactor Trip				Seq. No.	Accident Category
F.Code	MR	BR	DH		
Code	RM	RB	D6		
				1	Success
				2	PLOHS
				3	Success
				4	PLOHS
				5	ULOF

図4.2-16 システムイベントツリー (原子炉トリップ)

5. 崩壊熱除去系モデルの作成

本節では、崩壊熱除去機能に係わる系統、即ち補助冷却設備（ACS）、メンテナンス冷却系（MCS）、水・蒸気系のモデルの作成について述べる。

最初に、設計情報を基にして系統に含まれる機器の種類、系統構成、システム間の従属関係等を同定する。次に、崩壊熱除去機能の喪失確率を導出するため、フォールトツリーモデルを作成するとともに、定量化用データを整備する。また、修復操作を考慮した信頼度解析のためには、修復操作に費やすことの可能な猶予時間が必要となるので、プラント情報を基に算定する。崩壊熱除去機能喪失確率の導出にはフェイズドミッション解析コード：PHAMMON⁽⁴⁾を使用した。

5.1 フォールトツリーの作成

(1) マクロイベントについて

フェイズドミッション解析コードでは、評価対象システムの構成単位（成功→失敗、失敗→成功の遷移が行われる単位）の個数が多いと、モンテカルロ法によるサンプリングで、除熱失敗の条件であるミニマルカットセット条件が成立するまでには多数回のサンプリングを必要とするので、計算時間の効率が悪くなる。そこで、複数の機器の故障事象からなる和事象を一つにまとめ（マクロイベント）、これをシステムモデルの構成単位として取り扱っている。例えば、ある系統は、その系統内に含まれる複数の機器の故障事象のいずれかが生ずれば機能喪失に至るのであれば、これらの複数の機器故障事象を一つにまとめてマクロイベントとして取り扱う。

(2) 崩壊熱除去系の構成機器

崩壊熱除去系は、3系統のACSと1系統のMCS、水・蒸気系とからなる。ACS、MCS、水・蒸気系を構成する機器に関する設計情報は、主冷却系統部分を除けば図3.2.1-1に示すような概略的な系統構成が示されているだけであり、詳細な情報はない。本評価では、図3.2.1-1の系統図ともんじゅプラントにおける系統設計例とを参考にして、機器をモデル化した。

ACSは、1次主冷却系の配管、逆止弁、機械式ポンプ、ポニーモータ、中間熱交換器、2次主冷却系の配管、機械式ポンプ、ポニーモータ、2次主冷却系から分岐したACSの空気冷却器(AC)、AC出口止め弁、ブロワ、ベーン、AC出入口ダンパ、ダクトから構成される。

MCSは、1次系配管、逆止弁、1次系電磁ポンプ、中間熱交換器、2次系配管、2次系電磁ポンプ、空気冷却器(AC)、ブロワ、ベーン、AC出入口ダンパ、ダクトから構成される。

水・蒸気系は気水分離器、分離タンク、再循環ポンプ、主蒸気止め弁、タービンバイパス弁、タービン、復水器、主給水ポンプ、起動用給水ポンプ等から構成される。

ACSの起動時には、ポニーモータ、ブロワの起動、ベーン、ダンパの開操作等が必要

となる。

MCSの起動の際には、電磁ポンプの起動、ブロワの起動、ACのベーン、ダンパの開操作等が必要である。

水・蒸気系による崩壊熱除去を行う際には、主蒸気止め弁を閉めタービンバイパス弁を開いて、蒸気を定格運転時のタービンへのラインから、復水器へダンプするラインに切り換える。タービンが停止するため、タービンからの蒸気で駆動されていた主給水ポンプは停止するので、* 常用電源で駆動する起動用給水ポンプを起動する。この他に、1次主冷却系、2次主冷却系は3ループのうち少なくとも1ループがポニーモータにより強制循環を行うことが必要である。また、3ループある再循環ラインのうち、少なくとも1ループのポンプ及び弁が作動する必要がある。

なお、崩壊熱除去系に係わる起動信号系統は、モデル化していない。強制循環モードが失敗したときに、自然循環除熱モードに移行する信号もモデル化していない。強制循環モードから自然循環モードへは自動的に切り替わるものと仮定している。

(3) サポートシステムの構成機器と従属関係

(2)に挙げた機器から構成される崩壊熱除去系が機能を果たすためには、電源設備や機器の冷却設備等のサポートシステムが必要となる。サポートシステムについては設計内容がはっきりしている段階ではないので、もんじゅプラントの設計例を参考にして、評価モデルを作成した。

a. サポートシステムの種類

ACS、MCS、水・蒸気系に対して以下のサポートシステムを仮定した。

- ・非常用電源（ポニーモータ、ブロワ等の駆動電源）
- ・無停電電源（ダンパ、ベーン等の駆動電源）
- ・常用電源（起動用給水ポンプの駆動電源）
- ・機器冷却系（ポニーモータ、1次MCS電磁ポンプの冷却）

b. サポートシステムの従属関係と系統構成

a. で仮定したサポートシステムは、さらに下位のサポートシステムによってサポートされる。各サポートシステム間の機能依存関係を以下の様に設定した（図 5.1-1）。

- 非常用電源 ← 外部電源、DG電源、換気空調系
- 無停電電源 ← 非常用電源、バッテリー電源
- DG電源 ← 補機冷却海水系
- 常用電源 ← 外部電源
- 機器冷却系 ← 補機冷却水系、非常用電源
- 補機冷却水系 ← 補機冷却海水系、非常用電源

- 補機冷却海水系 ← 非常用電源
- 換気空調系 ← 補機冷却海水系、非常用電源

各サポートシステムの系統構成は、ACSがA, B, Cの3系統構成であることに合わせて基本的に独立3系統とする。MCSの各々のサポートシステムは、メンテナンス時の系統構成を考慮してA, C系統の両方からサポートされているものとした。

ここで仮定した各々のサポートシステムに対して、もんじゅプラントで対応するシステム設計を参考にして、系統構成・構成機器を仮定した。作成した各サポートシステムの系統図を図5.1-2～図5.1-4に示す。

なお、サポートシステムのモデルの妥当性を評価するため、各サポートシステムについてフォールトツリーモデルを作成した段階で定量化を行ない、もんじゅレベル-1 PSA評価⁽¹⁾で作成された詳細システムフォールトツリーの定量評価値と比較することにより、信頼度評価上重要な機器等の見落としがない様に設定した。

(4) 評価用システムモデル（フォールトツリー）の作成

フロントラインシステムとサポートシステムの構成機器を基にして、システムモデルを作成した。手順は以下のとおりである。ACSについては、A, B, Cの3系統に対するフォールトツリーを作成した。サポートシステムの機能喪失事象は、これらのツリーの中では展開せず、以下で作成するサポートシステムに対するフォールトツリーを結合する。

- a. ACS、MCS、水・蒸気系について、以下の事象に対するフォールトツリーをマクロイベントを基にして作成した。

○ACS1ループ強制循環失敗＝ACSの強制循環のみを阻害する事象＋ACSの強制循環・自然循環の両方を阻害する事象＋ACS強制循環用サポートシステムの故障（図5.1-5）

ACSFC A = AFC + AFN + CCA + EPSASS + UPSASS.

ACSFC B = BFC + BFN + CCB + EPSBSS + UPSBSS.

ACSFC C = CFC + CFN + CCC + EPSCSS + UPSCSS.

○ACS1ループ自然循環失敗＝ACSの自然循環のみを阻害する事象＋ACS自然循環用サポートシステムの故障（図5.1-6）

ACSNCA = AFN + UPSASS.

ACSNCB = BFN + UPSBSS.

ACSNC C = CFN + UPSCSS.

ACSの自然循環を阻害する事象はさらに、修復可能な事象と修復不可能な事象に分ける。

$$AFN = AFNNR + AFNRC.$$

$$BFN = BFNNR + BFNRC.$$

$$CFN = CFNNR + CFNRC.$$

○MCS強制循環失敗=MCSの強制循環のみを阻害する事象+MCSの強制循環・自然循環の両方を阻害する事象+MCS強制循環用サポートシステムの故障 (図5.1-7)

$$MCSF = MCSFC + MCSFN + \\ (CCA + EPSASS + UPSASS) * (CCC + EPSCSS + UPSCSS).$$

○MCS自然循環失敗=MCSの自然循環のみを阻害する事象+MCS自然循環用サポートシステムの故障 (図5.1-8)

$$MCSF = MCSFN + UPSASS * UPSCSS.$$

MCSの自然循環を阻害する事象はさらに、修復可能な事象と修復不可能な事象に分ける。

$$MCSFN = MCSFNNR + MCSFNRC.$$

○水・蒸気系失敗=水・蒸気系故障+水・蒸気系のサポートシステムの故障+1次・2次主冷却系強制循環失敗 (図5.1-9、図5.1-10)

$$WSSSF = WSSS + OSP + ACSFCAW * ACSFCBW * ACSFCCW.$$

$$ACSFCAW = AFC + CCA + EPSASS.$$

$$ACSFCAW = BFC + CCB + EPSBSS.$$

$$ACSFCCW = CFC + CCC + EPSCSS.$$

b. サポートシステム間の従属関係を基に各サポートシステム毎にフォールトツリーを作成する。図5.1-11に無停電電源機能喪失、図5.1-12に非常用電源機能喪失のフォールトツリーを示す。

c. a.で作成したフロントラインシステムのフォールトツリーに、b.で作成したサポートシステムのフォールトツリーを結合する。論理ループが生ずる場合には適切に切断することが必要となる。結合したフォールトツリーを論理式表現とし、ブール代数処理により式を簡単化し、各系統の除熱モード毎のミニマルカットセットを作成する。この過程においても、和事象として1つにまとめられるマクロイベントは1つのマクロイベントとしてまとめ、ミニマルカットセットを構成する項数をできるだけ少なくするようにした。

d. これらのミニマルカットセットを組み合わせて、それぞれの成功基準に対応した

ミニマルカットセットを作成し、フェイズドミッション解析コードPHAMMONの入力データとする。

例えば、「ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗」に対応するミニマルカットセットは、以下のようにして作成される。

$$F3N1 = (ACSFCA * ACSFCB * ACSFCC) * (ACSNCA + ACSNCB + ACSNCA) \cdots (1)$$

ただし、

F3N1：ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗

ACSFCA：Aループ強制循環失敗

ACSFCB：Bループ強制循環失敗

ACSFCC：Cループ強制循環失敗

ACSNCA：Aループ自然循環失敗

ACSNCB：Bループ自然循環失敗

ACSNCC：Cループ自然循環失敗

式(1)を、ブール代数処理により簡略化し、ミニマルカットセットを作成する。

5.2 フォールトツリー定量化用データの作成

表5.2-1にフロントラインシステム、表5.2-2にサポートシステムの構成機器と定量値を示す。表5.2-3にはマクロイベントの構成事象と定量値を示す。

a. 機器の故障率データ

各機器の故障率データは、基本的に、もんじゅレベル-1 PSA⁽¹⁾で作成されたデータセットを使用している。ただし、ディーゼル発電機(DG)については、国内データ⁽⁸⁾を参考として設定した。

各機器の起動時故障率：Qdは、待機時故障率： λ と試験間隔、又は故障通報時間：Taを用いて以下の式に従い導出した。

$$Qd = (1/2) \times \lambda \times Ta$$

試験間隔、又は故障通報時間：Ta は以下のように定めた。

○通常運転時 運転中の機器： 故障通報時間を1時間とした。

○通常運転時 待機中の機器： 試験間隔を720時間とした。但し、電源ケーブル、ブレーカについては、定期パトロールにより発見されるものと仮定して、故障通報時間を8時間として算出した。

○水・蒸気系の起動用給水ポンプの試験間隔は6ヶ月、主蒸気止め弁及びタービンバイパス弁の試験間隔は1週間とした。

定量化に際しては、メンテナンスアウトエージ、テストアウトエージは含めていない。

b. マクロイベントに対する故障率と修復率

本評価では、マクロイベントを基にフォールトツリーを作成している。マクロイベン

トの、起動時故障率、運転時故障率は、マクロイベントを構成する複数の故障事象のそれぞれの値を合計すればよい。ダイヤモンド故障を除くマクロイベントの故障確率の時間分布は、それぞれの故障事象の確率分布と同じく指数分布となる。

次に、このマクロイベントの修復率を考える。このマクロイベントは、信頼性工学での「修理度1の修理を伴う直列系」と等価である。各々の故障事象の修復確率分布は、対応する修復率をパラメータに持つ指数分布となる。マクロイベントの修復確率分布は、各々の故障事象の修復確率分布関数を、対応する故障率で重み付けして加えたものとなり、全ての故障事象の修復率の値が等しくないかぎり、この分布は指数分布とはならない。

よって、マクロイベントの修復確率分布を指数分布として扱うための修復率パラメータの値を、一般的に決定することはできない。そこで、修復を考慮した場合の効果が大きい事象をマクロイベントから独立させて、新たなマクロイベントとし、修復率の値に応じて分類し保守的に修復率を当てはめて取り扱っていくことにした。

修復操作を考慮する機器・故障モードは以下のように設定した。

- 空気冷却器 (AC) 入口・出口ダンパ
- 空気冷却器 (AC) ベーン
- 空気冷却器 (AC) 出口止め弁
- 電源
- 外部電源

もんじゅPSA定量化用データより、修復率は、故障モードに対応して以下の様になる。

機器	故障モード	修復率 (/hr)
ベーン、ダンパ	開閉失敗、誤動作	0.1
	関連電気系統故障	0.17
AC出口止め弁	開閉失敗	0.1
	外部、内部漏洩	0.0
	関連電気系統故障	0.17
電気系統	故障	0.17

これらの機器のうち、AC出口止め弁、ACベーン、AC入口・出口ダンパに関する事象は全て、自然循環、強制循環両モード失敗 (AFN, BFN, CFN) のマクロイベントに含まれている。そこでこのマクロイベントを修復可能とした事象とそうでないものとの2種類に分割し、修復可能な事象群を独立なマクロイベント (AFNRC, BFNRC, CFNRC) とし、修復率を0.1/hrとした。

外部電源以外の電気系統についても修復率 0.1/hr を割り当てて評価を行った。

また、外部電源については、マクロイベントOSPに対して、修復率 0.2/hr を割り当て

た。これは、マクロイベントOSPに含まれる外部送電系統の平均修理時間が3時間（修復率0.3/hr）、その他の電力関連機器の修復率が0.17/hrであることから設定したものである。

マクロイベントの定量値データを表5.2-3に示す。

c. 入力データについての仮定

(i) 外部電源

簡易モデルでは、外部電源は、マクロイベントOSPでモデル化されている。起因事象が、外部電源喪失の場合には、

ダイヤモンド故障確率 $Q_d=1.0/\text{demand}$

故障率 $\lambda=4\times 10^{-5}/\text{hr}$

修復率 $\mu=2\times 10^{-1}/\text{hr}$

として評価を行なった。

外部電源喪失以外の起因事象では、

ダイヤモンド故障確率 $Q_d=0.0/\text{demand}$

故障率 $\lambda=4\times 10^{-5}/\text{hr}$

修復率 $\mu=2\times 10^{-1}/\text{hr}$

とした。起因事象発生時点で、外部電源の喪失が生じていないことになるのでダイヤモンド故障確率を0.0としている。

(ii) DG電源

DGは、原子炉トリップ信号とともに起動し、外部電源が健全であれば、停止するものとする。DGの連続運転可能時間は24時間であるとし、第1フェイズ、第2フェイズに対してのみDG電源が利用可能であり、第3フェイズでは、DG電源は利用できないものと保守的に仮定した。

(iii) バッテリー電源

バッテリー電源に相当するマクロイベントは、BTPS(A)であり、バッテリー本体とバッテリーからの給電に必要とされる電気系統からなる。バッテリーの容量は1~2時間程度であるが、この電源は空気冷却器のベーン、ダンパ等の開閉操作時のみに必要であり、連続して給電を行う必要はないものと仮定した。よって、バッテリー電源は使命時間の間、故障状態に至らないかぎり使用可能であるとする。

(iv) 起因事象で使用不可能な系統が生ずる場合

IRACSタイプの崩壊熱除去系では、主冷却系統の一部を崩壊熱除去系として利用しているため、漏洩等の起因事象によっては、2系統のみの運用になる場合がある。この場合、ACSのみの運転であれば、各系統のサポートシステムが独立なため、どの2系統の

組み合わせも信頼度上は同等となる。ACSとMCSを組み合わせた成功条件の場合（第3フェイズ）はMCSがA、C系統のサポート系によってサポートされていることから、ACSのB系統とMCSを組み合わせた運用よりも、ACSのA,C系統とMCSとの組み合わせの方が非信頼度が大きくなる。本評価では、主冷却系統の中の1系統について強制循環、自然循環の両除熱モードが不可能になる起因事象の場合、Bループが使用不可能になっているとして保守的に評価を行った。

また、主冷却系統の内の1系統が、ポンプ軸固着事象のように強制循環のみ使用不可能となる起因事象の場合も、同様な理由からBループの強制循環が不可能であるとした。

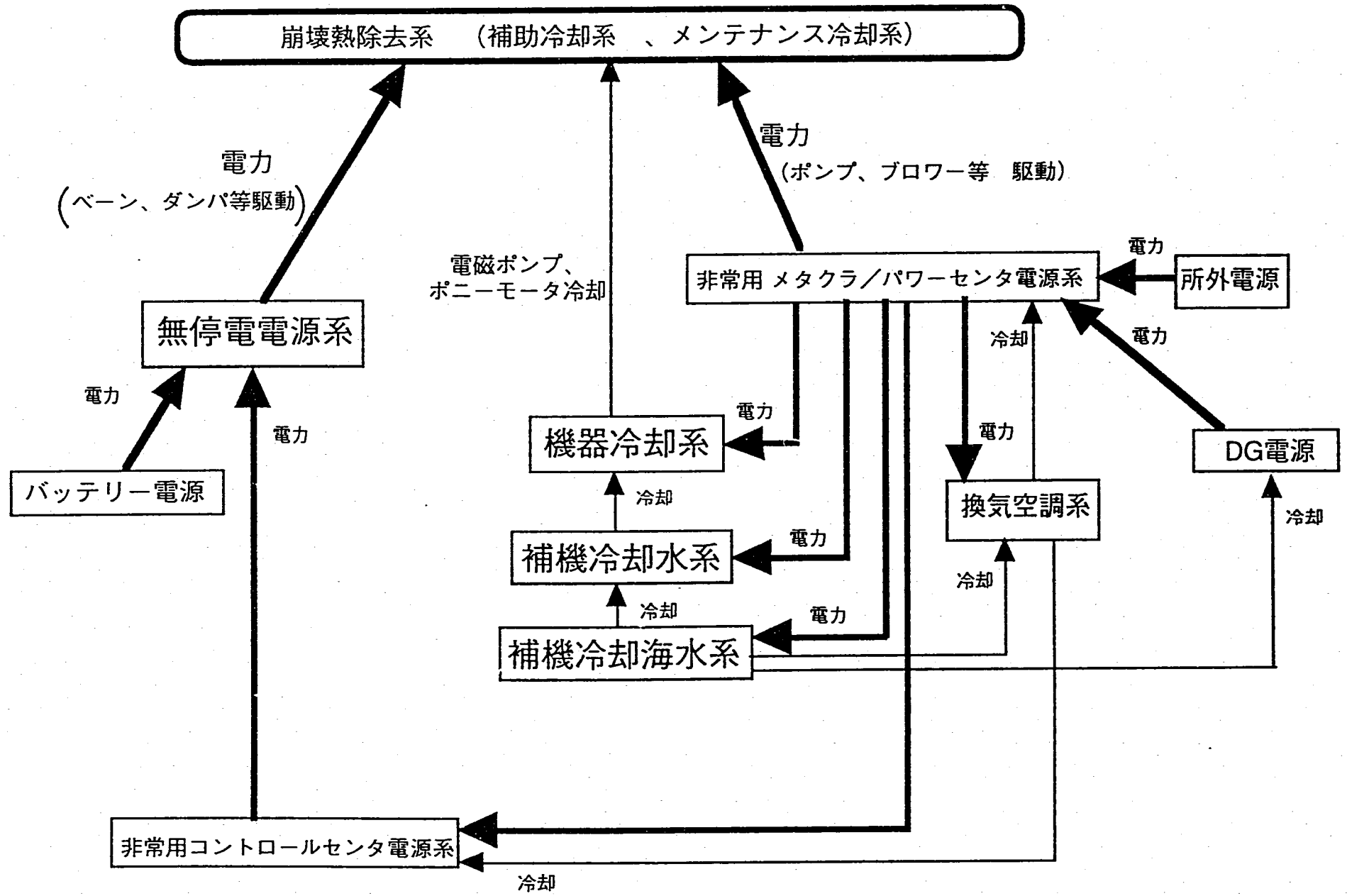


図5.1-1 崩壊熱除去系サポートシステム機能依存関係

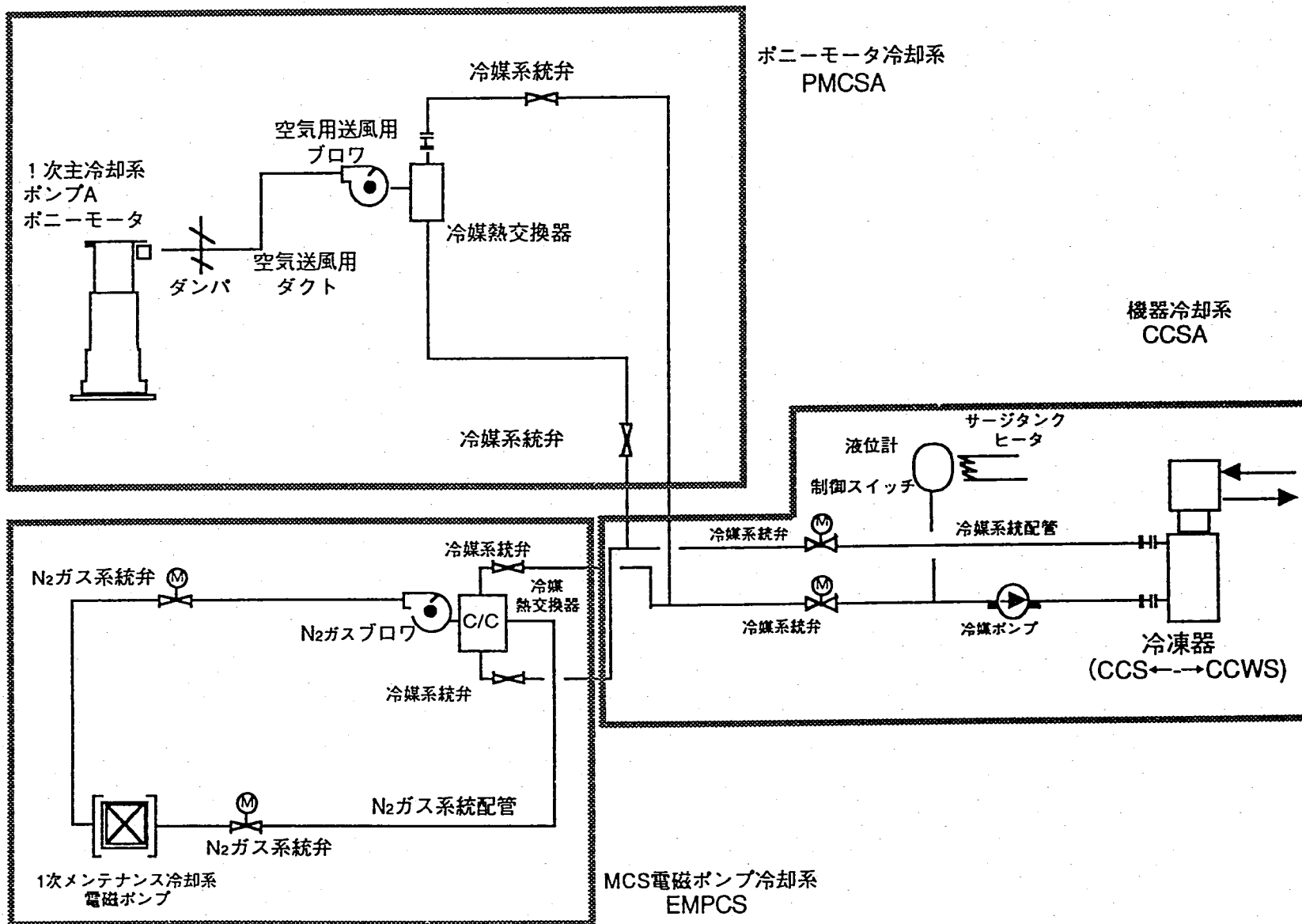


図5.1-2 サポートシステム系統図 (1)

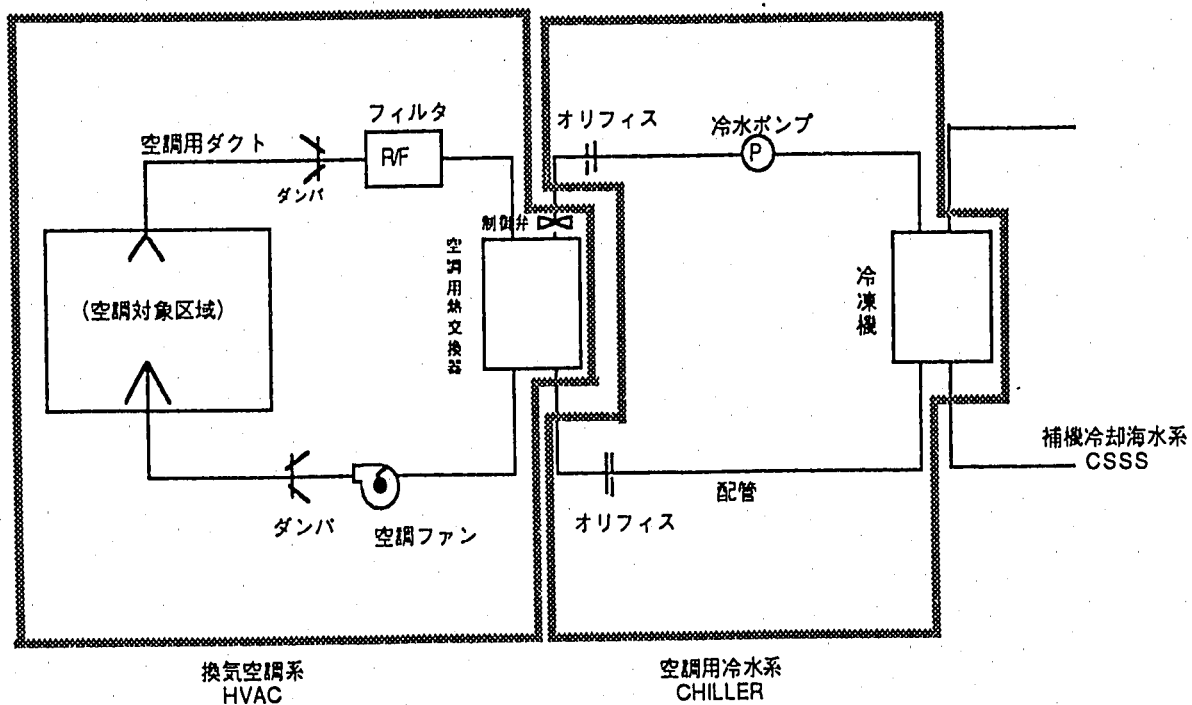
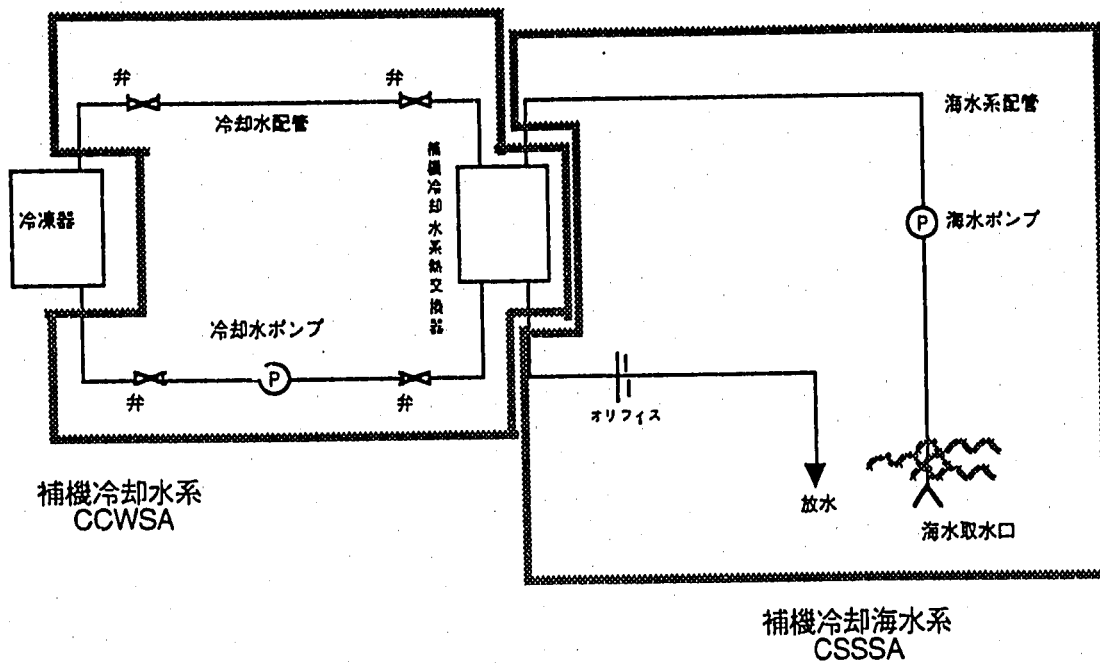


図5.1-3 サポートシステム系統図 (2)

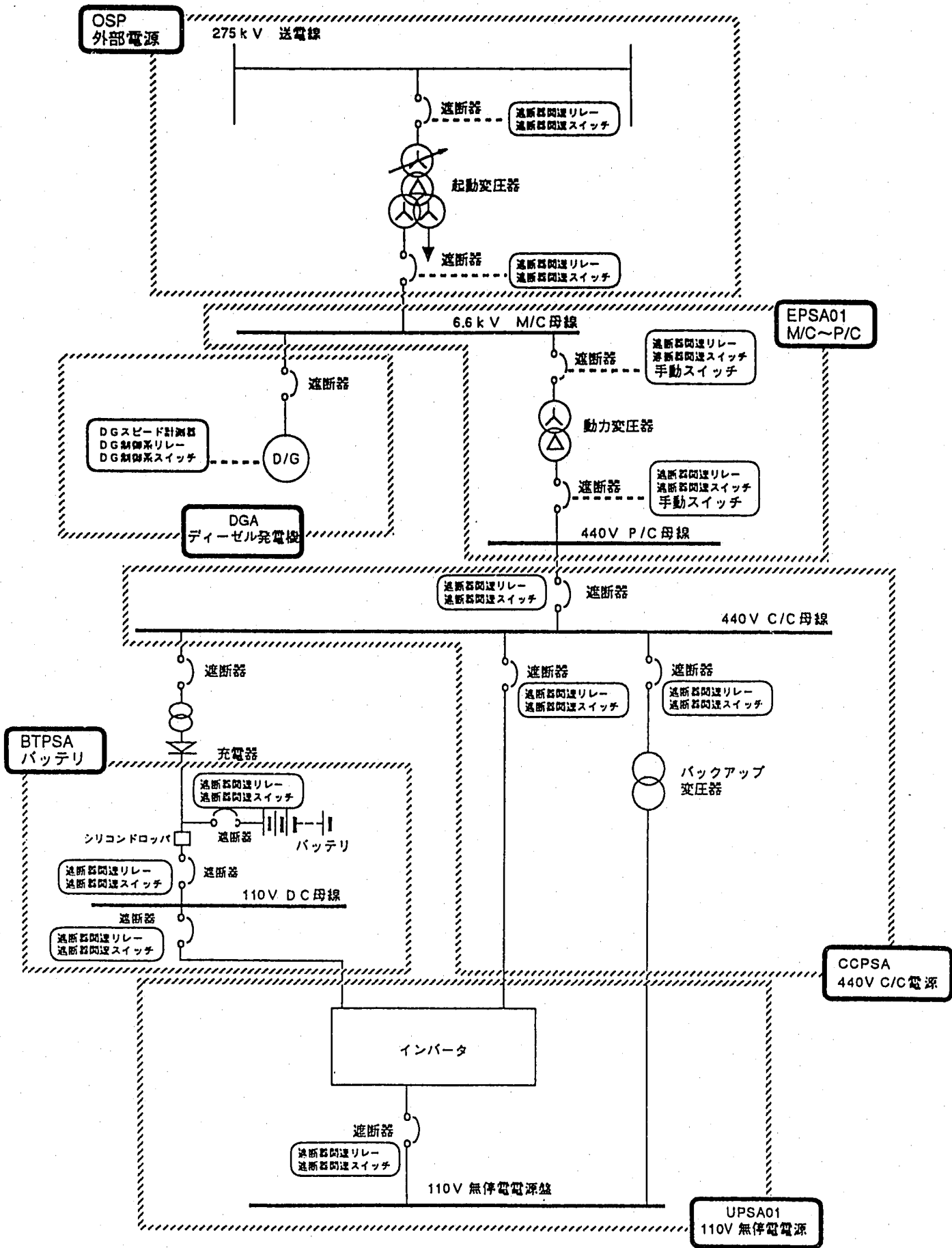


図5.1-4 サポートシステム系統図 (3)

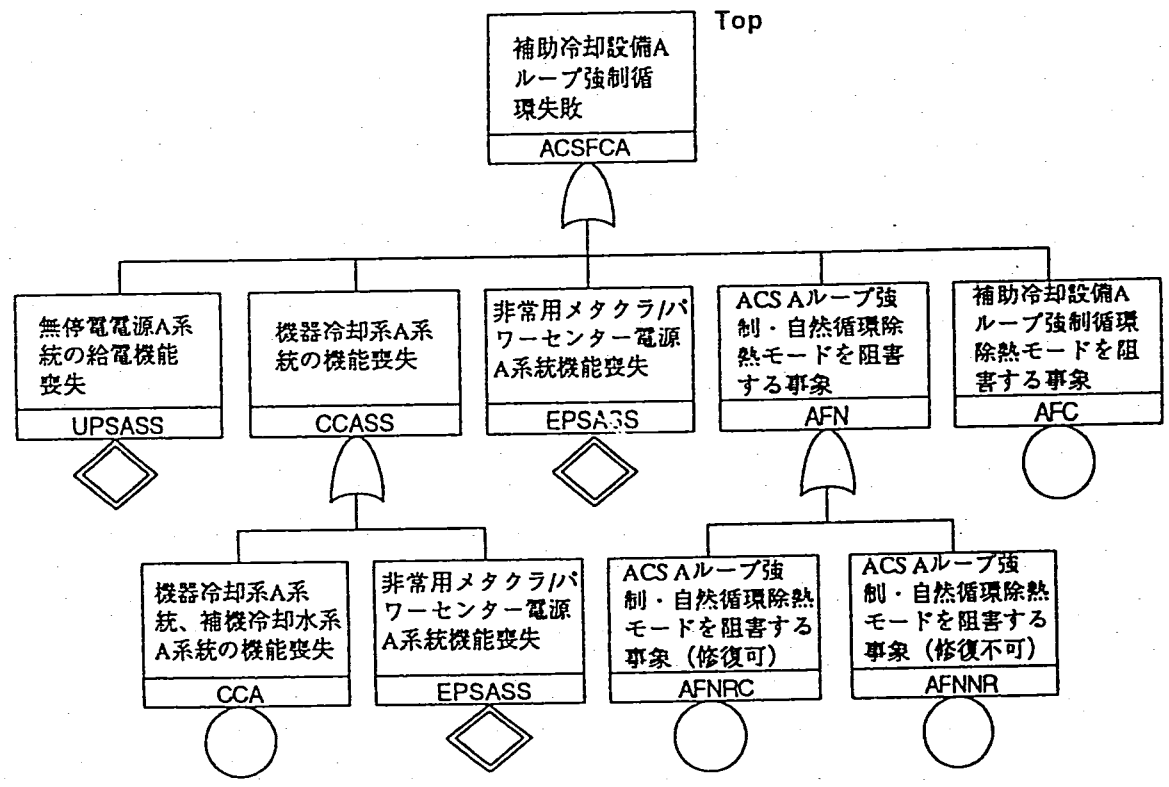


図5.1-5 補助冷却設備Aループ強制循環失敗のフォールトツリー

Title: ACSNCA	
Description of Top Event: 補助冷却設備Aループ自然循環失敗	
Date: 1/25/1994	Page: 1/1

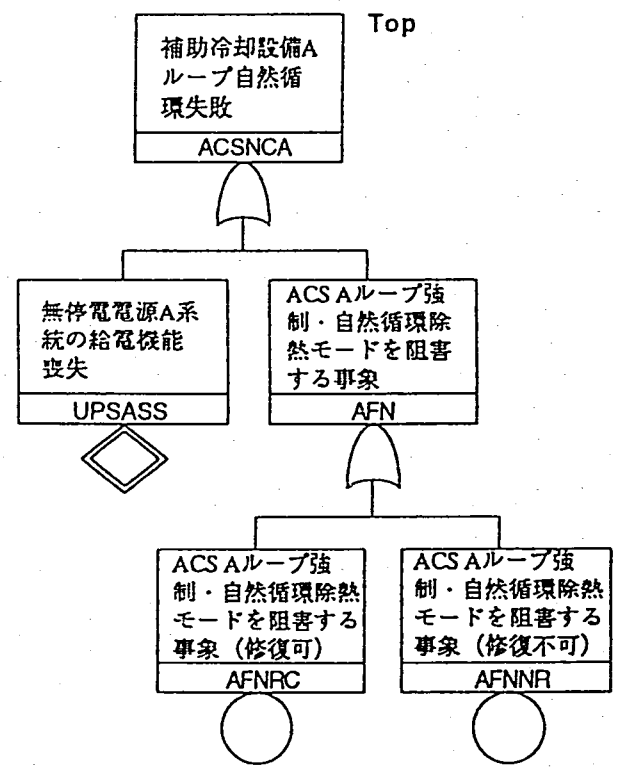


図5.1-6 補助冷却設備Aループ自然循環失敗のフォールトツリー

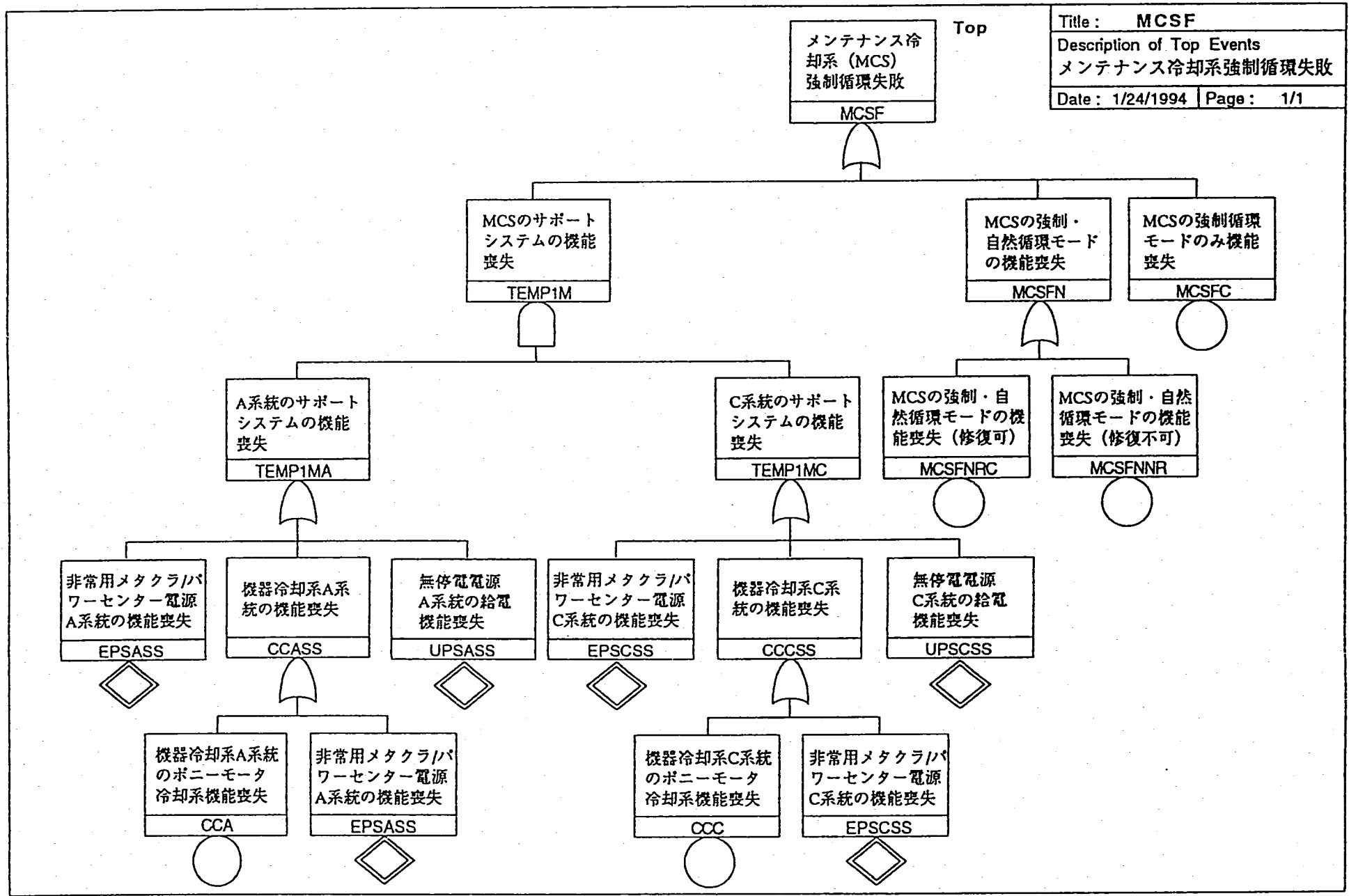


図5.1-7 メンテナンス冷却系強制循環失敗のフォールトツリー

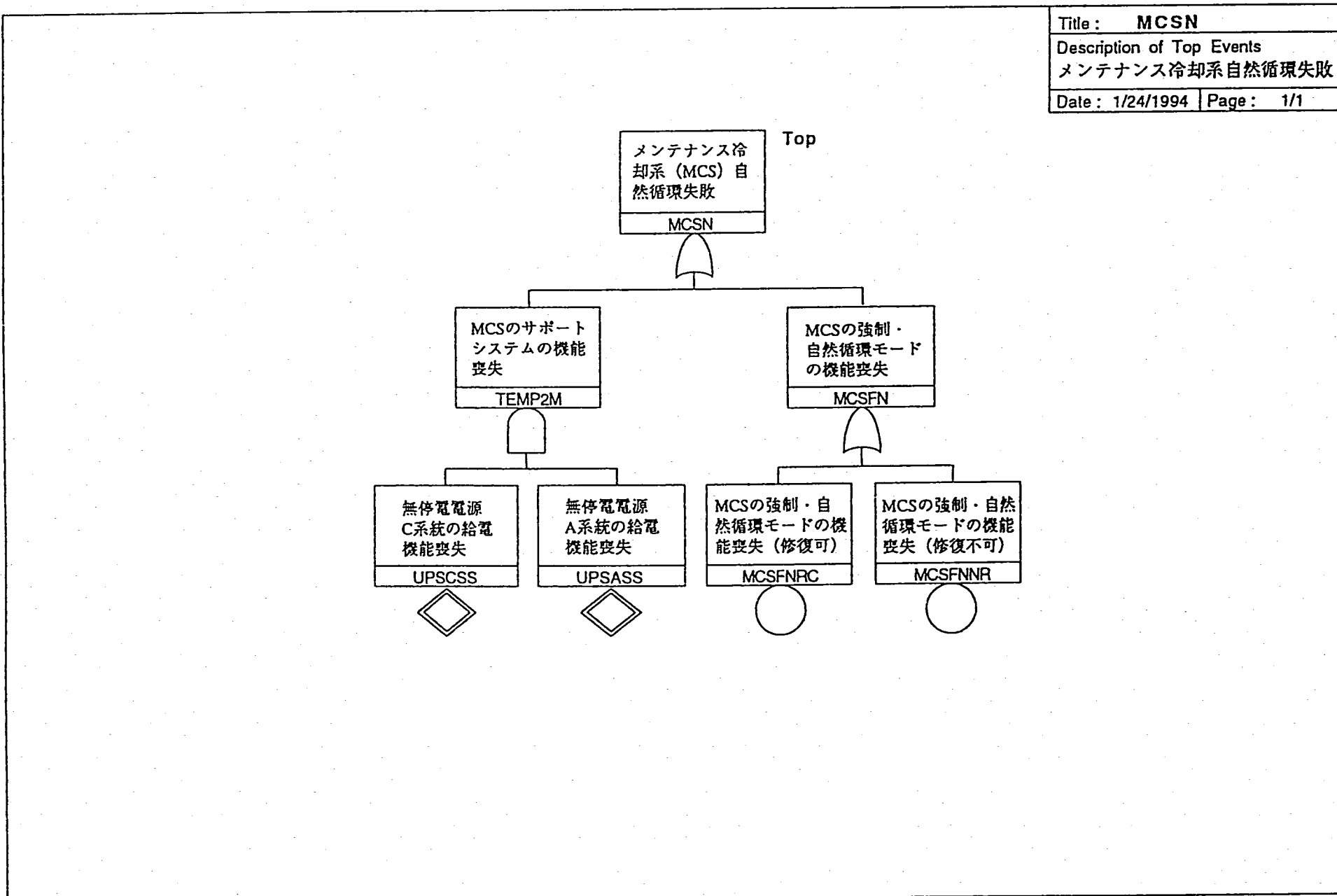


図5.1-8 メンテナンス冷却系自然循環失敗のフォールトツリー

Title : WSSSF	
Description of Top Event : 水・蒸気系崩壊熱除去失敗	
Date : 1/24/1994	Page : 1/1

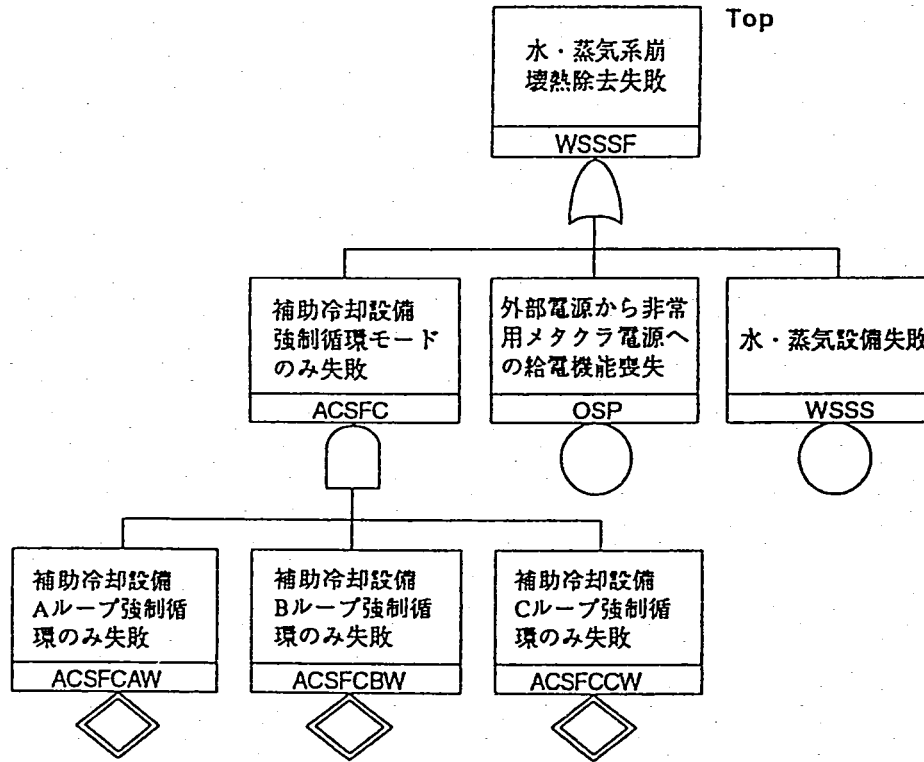


図5.1-9 水・蒸気系崩壊熱除去失敗のフォールトツリー

Title:	ACSFCAW
Description of Top Event:	ACS Aループ強制循環のみ失敗
Date:	1/25/1994
Page:	1/1

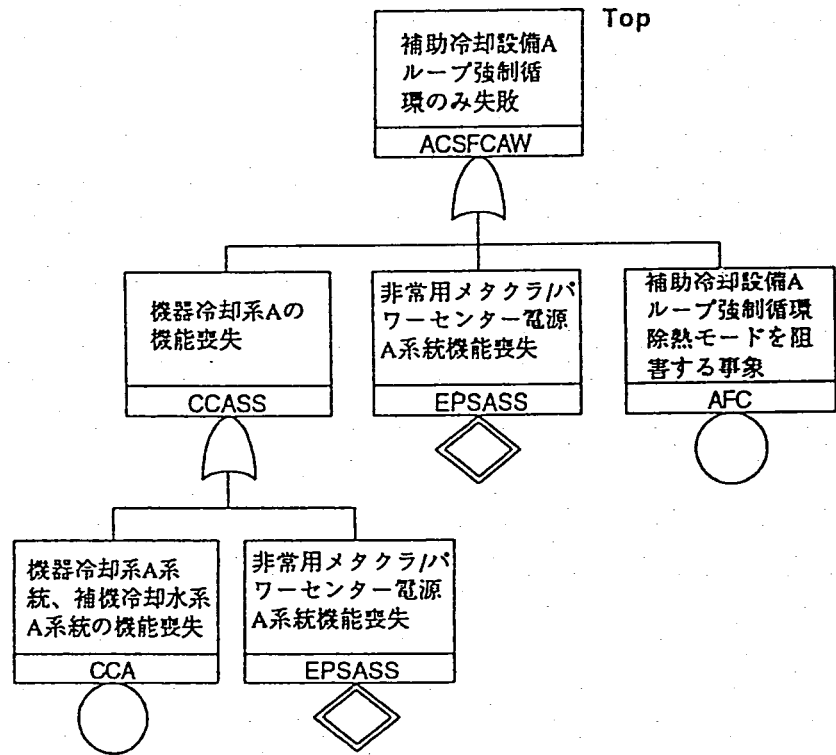


図5.1-10 補助冷却設備Aループ強制循環のみ失敗のフォールトツリー

Title:	UPSASS
Description of Top Event:	無停電電源A系統機能喪失
Date:	1/25/1994 Page: 1/1

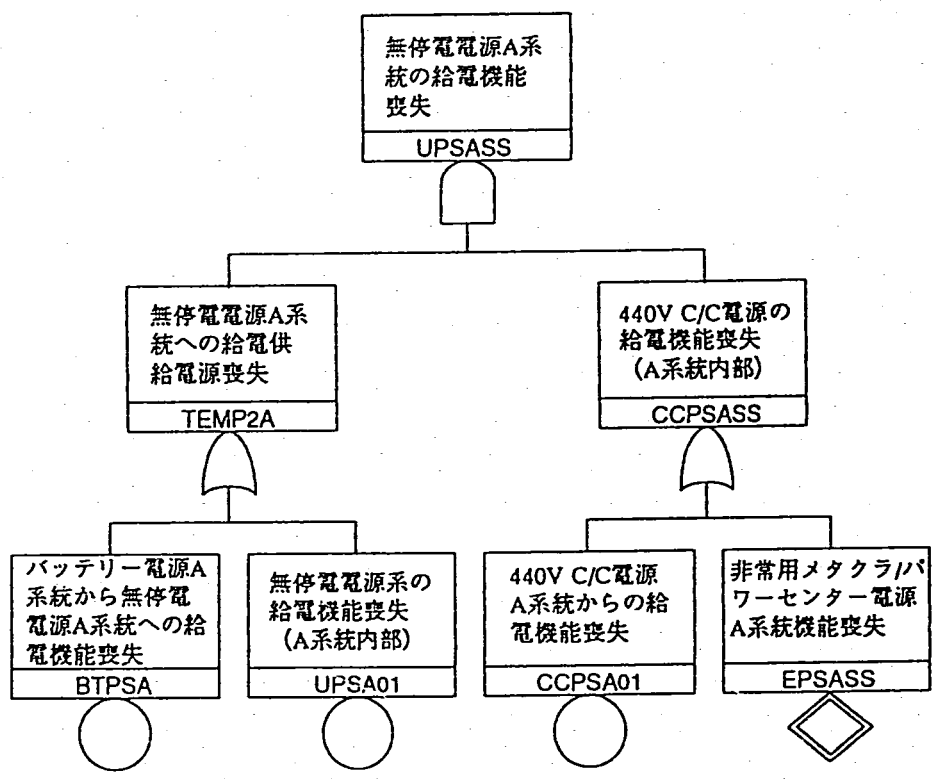


図5.1-11 無停電電源A系統機能喪失のフォールトツリー

Title: EPSASS

Description of Top Event:

非常用電源A系統機能喪失

Date: 1/25/1994 Page: 1/1

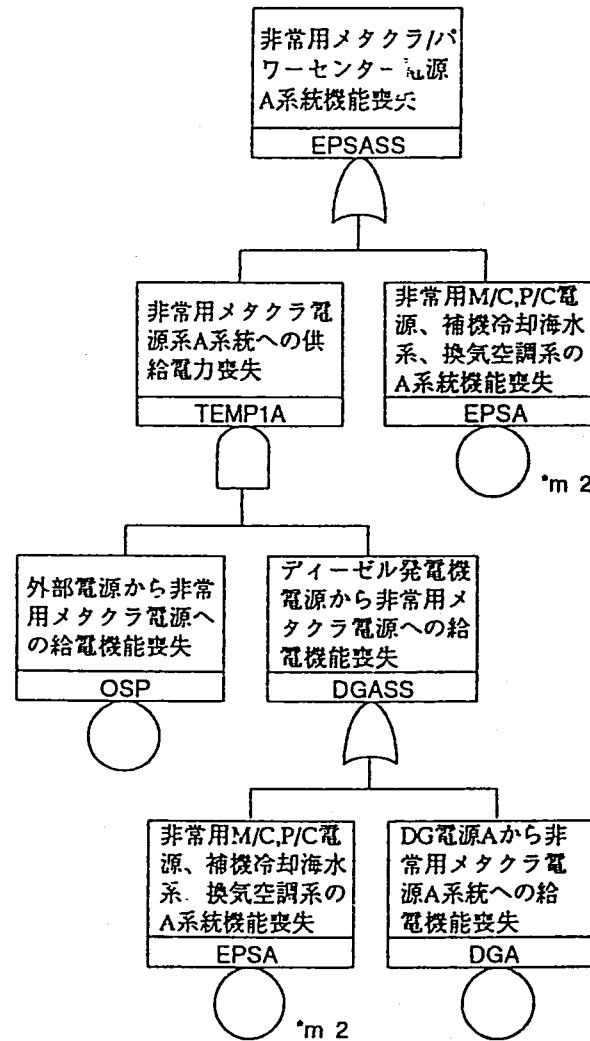


図5.1-12 非常用電源A系統機能喪失のフォールトツリー

表5.2-1 フロントラインシステムの構成機器と定量値 (1/3)

○各系統は基本的にA、B、Cの3系統からなる。

本表ではA、B、Cの3系統に共通な事象についてはA系統のみについて載せてある。

※1 Qd: デイモンド故障確率 [/demand]

※2 Ta: 故障通報時間、又は試験間隔

※3 λ: 故障率 [/hr]

※4 起因事象として評価される故障モードであるので、デイモンド故障確率値はゼロとする。

AFC01

構成機器	故障モード	Qd (※1)	Ta (※2)	λ (※3)	備考
1次系ポンプボニーモータ	起動失敗(UA)	1.0E-3	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	4.0E-5	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
2次系ポンプボニーモータ	起動失敗(UA)	1.0E-3	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	4.0E-5	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
ACプロワ	起動失敗(UA)	2.0E-4	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	5.0E-6	
	外部漏洩	7.2E-6	720	2.0E-8	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AFC01		2.3E-3		1.1E-4	

AACMOV01

構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
AC出口止め弁	閉閉失敗(UA)	8.0E-4	720	-	電動弁1個
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	8.0E-7	
	閉塞	6.0E-8	8	1.5E-8	
	内部漏洩	起因事象に含まれる(※4)	8	4.0E-7	
	外部漏洩	起因事象に含まれる	8	3.0E-9	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AACMOV01		8.3E-4		8.3E-6	

表5.2-1 フロントラインシステムの構成機器と定量値 (2/3)

MCSFC01					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
1次系電磁ポンプ	起動失敗(UA)	4.0E-4	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	4.0E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
	外部漏洩	起回事象に含まれる	8	8.0E-8	
2次系電磁ポンプ	起動失敗(UA)	4.0E-4	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	4.0E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
	外部漏洩	3.2E-7	8	8.0E-8	
中間熱交換器	伝熱管閉塞	1.2E-5	8	3.0E-6	/unit
	伝熱管漏洩	6.0E-7	8	1.5E-7	/unit
	胴側 外部漏洩	起回事象に含まれる	8	1.2E-8	
1次系 逆止弁	閉塞	6.0E-7	8	1.5E-7	
	内部漏洩	0.0E+0	8	0.0E+0	
	外部漏洩	起回事象に含まれる	8	4.0E-9	
1次系 Na配管	漏洩	起回事象に含まれる	8	8.0E-10	200ft
	閉塞	1.6E-9	8	8.0E-8	200ft
2次系 Na配管	漏洩	4.8E-9	8	1.2E-9	300ft
	閉塞	4.8E-7	8	1.2E-7	300ft
AC-入口ダンバ	開閉失敗(UA)	2.5E-3	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.5E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AC-伝熱管	漏洩	6.0E-7	8	1.5E-7	/unit
	閉塞	1.2E-5	8	3.0E-6	/unit
ACブロワ	起動失敗(UA)	2.0E-4	720	-	
	運転失敗(UR)	0.0E+0	-	5.0E-6	
	外部漏洩	7.2E-6	720	2.0E-8	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AC-ダクト、シェル	外部漏洩	8.6E-7	720	2.4E-9	30ft
AC-バーン	開閉失敗(UA)	6.0E-4	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.0E-7	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AC-出口ダンバ	開閉失敗(UA)	2.5E-3	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.5E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
MCSFC01		6.8E-3		6.5E-5	

表5.2-1 フロントラインシステムの構成機器と定量値 (3/3)

AFN01					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
1次系ポンプボニーモータ	外部漏洩	起回事象に含まれる	1	1.5E-8	
2次系ポンプボニーモータ	外部漏洩	起回事象に含まれる	1	1.5E-8	
中間熱交換器	伝熱管閉塞	起回事象に含まれる	1	3.0E-6	/unit
	伝熱管漏洩	起回事象に含まれる	1	1.5E-7	/unit
	胴側 外部漏洩	起回事象に含まれる	1	1.2E-8	
1次系 逆止弁	閉塞、外部漏洩	起回事象に含まれる	1	1.5E-7	
1次系 Na配管	閉塞、外部漏洩	起回事象に含まれる	1	8.1E-8	200ft (60m)
1次系 Na配管	閉塞、外部漏洩	起回事象に含まれる	1	1.2E-7	300ft (80m)
AC入口ダンパ	閉閉失敗(UA)	2.5E-3	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.5E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AC-伝熱管	漏洩	6.0E-7	8	1.5E-7	/unit
	閉塞	1.2E-5	8	3.0E-6	/unit
AC-ダクト・SHELL	外部漏洩	8.6E-7	720	2.4E-9	30ft
AC-ベーン	閉閉失敗(UA)	6.0E-4	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.0E-7	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AC-出口ダンパ	閉閉失敗(UA)	2.5E-3	720	-	
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	1.5E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
AFN01		5.7E-3		3.1E-5	

WSSS

構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
起動用給水ポンプ	外部漏洩	0.0E+0	8	1.0E-6	
	運転失敗	0.0E+0	8	2.0E-5	
	起動失敗	4.8E-3	4320	-	
主蒸気止め弁	閉失敗	5.8E-4	168	-	
	外部漏洩	0.0E+0	8	8.0E-9	
	内部漏洩	0.0E+0	8	8.0E-8	
	誤作動	0.0E+0	8	1.2E-6	
タービンバイパス弁	閉失敗	5.8E-4	168	-	
	外部漏洩	0.0E+0	8	8.0E-9	
	閉塞	0.0E+0	8	8.0E-8	
	誤作動	0.0E+0	8	1.2E-6	
WSSS		6.0E-3		2.4E-5	

表5.2-2 サポートシステムの構成機器と定量値 (1/5)

○各系統は基本的にA、B、Cの3系統からなる。

本表ではA、B、Cの3系統に共通な事象についてはA系統のみについて載せてある。

※1 Qd：ダイヤモンド故障確率 [demand]

※2 Ta：故障通報時間間隔、又は試験間隔

※3 λ：故障率 [hr]

※4 起回事象として評価される故障モードであるので、ダイヤモンド故障確率値はゼロとする。

PMCSA					
構成機器	故障モード	Qd (※1)	Ta (※2)	λ (※3)	備考
冷媒熱交換器 (PM---CCS)	伝熱管漏洩	1.0E-6	8	2.5E-7	100本
	伝熱管閉塞	9.0E-4	720	2.5E-6	/unit
	外部漏洩*	4.3E-5	720	1.2E-7	
冷媒系統 弁 手動弁(N.O)	開閉失敗(UA)				手動弁2個
	誤作動	0.0E+0	720	0.0E+0	手動弁2個
	閉塞	2.2E-5	720	6.0E-8	手動弁2個
	内部漏洩	0.0E+0	720	0.0E+0	手動弁2個
	外部漏洩	9.6E-9	8	2.4E-9	手動弁2個
	ケーブル断線	0.0E+0	8	0.0E+0	1000ft
	ケーブル短絡	0.0E+0	8	0.0E+0	1000ft
	ブレーカ誤作動	0.0E+0	8	0.0E+0	手動弁2個
空気送風用ブロワ	起動失敗(UA)	2.0E-4	720		
	運転失敗(UR)	0.0E+0		5.0E-6	
	外部漏洩	7.2E-6	720	2.0E-8	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
送風用ダクト	外部漏洩	2.9E-8	720	8.0E-11	1000ft (>3in.)
	内部閉塞	2.9E-8	720	8.0E-11	1000ft (>3in.)
空気送風ダクト手動ダンパ	誤動作	3.6E-5	720	1.0E-7	
PMCS制御系統(スイッチ)	誤動作	9.0E-4	720	2.5E-6	
PMCSA		2.1E-3		1.8E-5	

CHILLER					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
冷水ポンプ	運転失敗	1.0E-05	1	2.0E-05	
	外部漏洩	5.0E-07	1	1.0E-06	
	ケーブル断線	1.5E-07	1	3.0E-07	1000ft
	ケーブル短絡	3.0E-06	1	6.0E-06	1000ft
	ブレーカ誤作動	4.0E-07	1	8.0E-07	
空調用冷水系 配管	漏洩	9.6E-07	8	2.4E-07	1000ft (>3in.)
	閉塞	9.6E-07	8	2.4E-07	1000ft (>3in.)
冷水系 オリフィス (2個)	外部漏洩	8.0E-07	8	2.0E-07	
	内部閉塞	1.2E-05	8	3.0E-06	
空調用冷水 冷凍機 (CHILLER---CSSS)	運転失敗	1.0E-05	1	2.0E-05	
	ケーブル断線	1.5E-07	1	3.0E-07	1000ft
	ケーブル短絡	3.0E-06	1	6.0E-06	1000ft
	ブレーカ誤作動	4.0E-07	1	8.0E-07	
CHILLER		4.2E-05		5.9E-05	

表5.2-2 サポートシステムの構成機器と定量値 (2/5)

EMPCS					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
冷媒熱交換器 (EMP---CCS)	伝熱管漏洩	9.0E-5	720	2.5E-7	100本
	伝熱管閉塞	9.0E-4	720	2.5E-6	/unit
	外部漏洩*	4.3E-5	720	1.2E-7	
冷媒系統 弁 (手動弁2個)	誤作動	0.0E+0	8	0.0E+0	
	閉塞	2.4E-7	8	6.0E-8	
	外部漏洩	9.6E-9	8	2.4E-9	
N2ガス プロワ	運転失敗	2.0E-5	8	5.0E-6	
	外部漏洩	8.0E-8	8	2.0E-8	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
N2ガス系統 配管	漏洩	2.9E-5	720	8.0E-8	1000ft (>3in.)
	閉塞	2.9E-5	720	8.0E-8	1000ft (>3in.)
N2ガス系統 弁 電動弁2個	開閉失敗	5.0E-3	720	-	電動弁1個
	誤作動(UR)	0.0E+0	-	3.0E-6	
	閉塞	8.6E-5	720	2.4E-7	
	内部漏洩	5.8E-5	720	1.6E-7	
	外部漏洩	5.8E-6	720	1.6E-8	
	ケーブル断線	2.4E-6	8	6.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	4.8E-5	8	1.2E-5	1000ft
	ブレーカ誤作動	6.4E-6	8	1.6E-6	
EMPCS		6.3E-3		3.3E-5	
CCSA					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
冷凍機 (CCS---CCWS)	運転失敗(UR)	8.0E-5	8	2.0E-5	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
冷媒 ポンプ	運転失敗(UR)	8.0E-5	8	2.0E-5	
	外部漏洩	4.0E-6	8	1.0E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
冷媒系統 配管	漏洩	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
	閉塞	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
冷媒系統 弁 (電動弁2個)	誤作動	1.2E-5	8	3.0E-6	
	閉塞	9.6E-7	8	2.4E-7	
	外部漏洩	6.4E-8	8	1.6E-8	
	ケーブル断線	2.4E-6	8	6.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	4.8E-5	8	1.2E-5	1000ft
	ブレーカ誤作動	6.4E-6	8	1.6E-6	
機器冷却系制御スイッチ リミットスイッチ	誤動作	8.0E-5	8	2.0E-5	2個
サージタンク(ヒータ) 配管用ヒータ	ヒータ故障	6.0E-6	8	1.5E-6	
	スイッチ故障	1.0E-5	8	2.5E-6	
	ケーブル断線	1.2E-6	8	3.0E-7	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-5	8	6.0E-6	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-6	8	8.0E-7	
サージタンク液位計	検出器	2.0E-5	8	5.0E-6	
	変換器	1.2E-5	8	3.0E-6	
	プロセススイッチ	8.0E-6	8	2.0E-6	
CCSA		4.6E-4		1.1E-4	

表5.2-2 サポートシステムの構成機器と定量値 (3/5)

CCWSA					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
補機冷 冷却水ポンプ	起動失敗(UA)	1.0E-5	1	-	1000ft 1000ft
	運転失敗(UR)	-	-	2.0E-5	
	外部漏洩	5.0E-7	1	1.0E-6	
	ケーブル断線	1.5E-7	1	3.0E-7	
	ケーブル短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	
	ブレーカ誤作動	4.0E-7	1	8.0E-7	
補機冷 冷却水配管	漏洩	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
	閉塞	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
補機冷 熱交換器 (CCWS---CSSS)	伝熱管漏洩	1.0E-6	8	2.5E-7	100本 /unit
	伝熱管閉塞	1.0E-5	8	2.5E-6	
	外部胴漏洩*	4.8E-7	8	1.2E-7	
補機冷却水系統内弁 (手動弁4個)	開閉失敗(UA)	0.0E+0	1	-	1000ft 1000ft
	誤作動(UR)	-	-	0.0E+0	
	閉塞	6.0E-8	1	1.2E-7	
	内部漏洩	0.0E+0	1	0.0E+0	
	外部漏洩	2.4E-9	1	4.8E-9	
	ケーブル断線	0.0E+0	1	0.0E+0	
	ケーブル短絡	0.0E+0	1	0.0E+0	
	ブレーカ誤作動	0.0E+0	1	0.0E+0	
CCWSA		2.6E-5		3.1E-5	

CSSSA					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
補機冷却海水系 ポンプ	起動失敗(UA)	1.0E-5	1	-	1000ft 1000ft
	運転失敗(UR)	-	-	2.0E-5	
	外部漏洩	5.0E-7	1	1.0E-6	
	ケーブル断線	1.5E-7	1	3.0E-7	
	ケーブル短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	
	ブレーカ誤作動	4.0E-7	1	8.0E-7	
補機冷却海水系 配管	漏洩	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
	閉塞	3.2E-7	8	8.0E-8	1000ft (>3in.)
補機冷却海水系 オリフィス	外部漏洩	4.0E-7	8	1.0E-7	
	内部閉塞	6.0E-6	8	1.5E-6	
CSSSA		2.1E-5		3.0E-5	

OSP					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
外部電源送電線	給電喪失	起回事象に含まれる(※4)	1	6.0E-6	λ はもんじゅデータ
開閉所	故障	起回事象に含まれる	1	3.0E-6	遮断器(屋外)
変圧器	故障	2.5E-7	1	5.0E-7	
ケーブル	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
遮断器	誤動作	8.0E-7	1	1.6E-6	2個
遮断器関連リレー		5.0E-6	1	1.0E-5	20個
遮断器関連スイッチ		5.0E-6	1	1.0E-5	4個
OSP		1.4E-5		3.7E-5	外部電源喪失

表5.2-2 サポートシステムの構成機器と定量値 (4/5)

DGA					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
ディーゼル発電機(DG)	起動失敗	1.2E-3	720	-	
	運転失敗	-	-	2.0E-4	
DGスピード計測器	誤動作	5.4E-4	720	1.5E-6	
DG制御系リレー	誤動作	5.4E-3	720	1.5E-5	
DG制御系スイッチ	誤動作	4.5E-3	720	1.3E-5	
ケーブル	断線	1.1E-4	720	3.0E-7	1000ft
	短絡	2.2E-3	720	6.0E-6	1000ft
遮断器	閉失敗	5.0E-4	720	-	
	誤動作	-	-	8.0E-7	
DGA		1.4E-2		2.4E-4	

EPSA01					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
6.6kv M/C 母線	故障	7.5E-7	1	1.5E-6	
ケーブル(M/C~P/C)	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
遮断器	誤動作	8.0E-7	1	1.6E-6	2個
	遮断器制御リレー	5.0E-7	1	1.0E-6	2個
	遮断器制御スイッチ	2.5E-6	1	5.0E-6	2個
手動スイッチ	誤動作	2.5E-6	1	5.0E-6	2個
変圧器	故障	2.5E-7	1	5.0E-7	
440V P/C(母線)	故障	7.5E-7	1	1.5E-6	
EPSA01		1.1E-5		2.2E-5	

BTPSA					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
バッテリー	一次故障	1.5E-6	1	3.0E-6	
	二次故障	1.5E-6	1	3.0E-6	
遮断器	誤動作	1.6E-6	1	3.2E-6	4個
	遮断器制御リレー	1.0E-6	1	2.0E-6	4個
	遮断器制御スイッチ	誤動作	1	1.0E-5	4個
シリコンドロップバー	誤動作	5.0E-8	1	1.0E-7	4個
	S.D制御リレー	1.0E-6	1	2.0E-6	4個
	S.D制御スイッチ	誤動作	5.0E-6	1	1.0E-5
ケーブル	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
110V DC母線	故障	7.5E-7	1	1.5E-6	
BTPSA		1.6E-5		4.1E-5	


表5.2-2 サポートシステムの構成機器と定量値 (5/5)

CCPSA01					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
440V 非常用電源系					既出
遮断器	誤動作	1.6E-6	1	3.2E-6	4個
遮断器制御リレー	誤動作	1.0E-6	1	2.0E-6	4個
遮断器制御スイッチ	誤動作	5.0E-6	1	1.0E-5	4個
440V C/C(母線)	故障	7.5E-7	1	1.5E-6	
変圧器	故障	2.5E-7	1	5.0E-7	
ケーブル(P/C~C/C)	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
ケーブル(C/C~P1)	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
CCPSA01		1.5E-5		3.0E-5	

UPSA01					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
インバータ	運転失敗	4.0E-6	1	8.0E-6	
無停電電源板	故障	7.5E-7	1	1.5E-6	(母線)
ケーブル(P1~UPSA)	断線	1.5E-7	1	3.0E-7	1000ft
	短絡	3.0E-6	1	6.0E-6	1000ft
UPSA01		7.9E-6		1.6E-5	

HVAC					
構成機器	故障モード	Qd	Ta	λ	備考
空調用ファン	運転失敗	2.0E-05	8	5.0E-06	
	外部漏洩	8.0E-08	8	2.0E-08	
	ケーブル断線	1.2E-06	8	3.0E-07	1000ft
	ケーブル短絡	2.4E-05	8	6.0E-06	1000ft
	ブレーカ誤作動	3.2E-06	8	8.0E-07	
空調用ダクト	外部漏洩	1.6E-06	8	4.0E-07	1000ft (>3in.)
	内部閉塞	1.6E-06	8	4.0E-07	1000ft (>3in.)
空調系統 手動ダンパ (2個)	誤作動	8.0E-07	8	2.0E-07	
	ケーブル断線	0.0E+00	8	0.0E+00	1000ft
	ケーブル短絡	0.0E+00	8	0.0E+00	1000ft
	ブレーカ誤作動	0.0E+00	8	0.0E+00	
制御弁	制御失敗	1.0E-04	8	2.5E-05	
	外部リーク	6.0E-08	8	1.5E-08	
空調系統 フィルタ	故障	2.4E-05	8	6.0E-06	2個
空調系 熱交換器 (HVAC---CHILLER)	伝熱管漏洩	1.0E-06	8	2.5E-07	100本
	伝熱管閉塞	1.0E-05	8	2.5E-06	/unit
	外部漏洩	4.8E-07	8	1.2E-07	
HVAC		1.9E-04		4.7E-05	

表5.2-3 マクロイベントの内容と定量値 (1/2)

- ※1 「××(※2)の・・・機能喪失」と記している場合は|××|の系統内部に含まれる機器故障が原因で××の機能が喪失するという意味であって××をサポートする機能喪失は含まれない。
- ※2 ここではA系統または、Aループのものを示す。
- ※3 網かけ () のしてあるマクロイベントは複数のマクロイベントを更にまとめたものであることを示す。
- ※4 AFNNRとAFNRCはマクロイベントAFNを修復可能か否かで分割したものであり、AFN=AFNNR+AFNRCである。
- ※5 メンテナンス冷却系能力UP時のみ使用


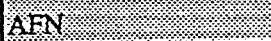



マクロイベント名 (※2) (※3)	ダイヤモンド故障確率 [/demand]	故障率 [/hour]	マクロイベントの内容 (※1)
AFC01	2.3E-3	1.1E-4	ACS Aループ強制循環除熱モードのみを阻害する事象 (ACS関連機器のみ)
PMCSA	2.1E-3	1.8E-5	機器冷却系ポンプモータ冷却設備の機能喪失
 AFC	4E-3	1E-4	ACS Aループ強制循環除熱モードのみを阻害する事象(AFC+PMCSA+ASGMOV12)
AFN01	5.7E-3	3.1E-5	ACS Aループ強制循環除熱・自然循環除熱モードを阻害する事象 (ACS関連機器のみ)
AACMOV1	8.3E-4	8.3E-6	ACS AループAC 出口止め弁開失敗
 AFN	7E-3	4E-5	ACS Aループ強制循環・自然循環除熱モードを阻害する事象 (AFN01+AACMOV1)
 AFNNR (※4)	1E-5	7E-6	ACS Aループ強制循環・自然循環除熱モードを阻害する事象 (修復不可)
 AFNRC (※4)	7E-3	3E-5	ACS Aループ強制循環・自然循環除熱モードを阻害する事象 (修復可)
CCSA	4.6E-4	1.1E-4	機器冷却系の機能喪失 (A系統)
CCWSA	2.6E-5	3.1E-5	補機冷却水系の機能喪失 (A系統)
 CCA	5E-4	1E-4	機器冷却系、補機冷却水系の機能喪失 (A系統) (CCSA+CCWSA)

表5.2-3 マクロイベントの内容と定量値 (2/2)

マクロイベント名 (※2) (※3)	ダイヤモンド故障確率 [/demand]	故障率 [/hour]	マクロイベントの内容 (※1)
EPSA01	1.1E-5	2.2E-5	非常用メタクラ/パワーセンター電源系の機能喪失 (A系統)
CSSSA	2.7E-5	3.1E-5	補機冷却海水系の機能喪失 (A系統)
HVACA	1.9E-4	4.7E-5	換気空調系の機能喪失 (A系統)
CHILLERA	4.2E-5	5.9E-5	空調用冷水系の機能喪失 (A系統)
EPSA	3E-4	2E-4	非常用メタクラ/パワーセンター電源系、補機冷却海水系、換気空調系の機能喪失 (1系統) (EPSA01+CSSSA+HVACA+CHILLERA+HVACHILA)
MCSFC01	6.8E-3	6.6E-5	MCS冷却系、強制循環除熱モードを阻害する事象 (MCS関連機器のみ)
EMPCS	6.3E-3	3.3E-5	電磁ポンプ冷却設備の機能喪失
MCSFC	1E-2	1E-4	MCS冷却系、強制循環除熱モードを阻害する事象
MCSFC (※5)	7E-3	1E-4	MCS強制循環除熱モードのみを阻害する事象 (MCS関連機器+電磁ポンプ冷却設備の機能喪失)
MCSFNRR (※5)	3E-5	7E-6	MCS強制循環・自然循環除熱モードのみを阻害する事象 (MCS関連機器のみ) (修復不可)
MCSFNRC (※5)	6E-3	2E-5	MCS強制循環・自然循環除熱モードのみを阻害する事象 (MCS関連機器のみ) (修復可)
OSP	1E-5	4E-5	外部電源から非常用メタクラ電源系への給電機能喪失
DGA	1E-2	2E-4	ディーゼル発電機電源系機能 (A系統) からメタクラ電源系の給電機能喪失
BTPSA	2E-5	4E-5	バッテリー電源系 (A系統) から、無停電電源系 (A系統) への給電機能喪失
CCPSA01	1E-5	3E-5	440VC/C電源の給電機能喪失
UPSA01	8E-6	2E-5	無停電電源系の給電機能喪失 (1系統)

6. 設計ベースの評価結果

設計に基づき、崩壊熱除去系として補助冷却設備（ACS）、メンテナンス冷却系（MCS）に加えて水・蒸気系も使用できるとしてPLOHS発生頻度を評価した。

6.1 崩壊熱除去機能喪失確率評価

起因事象によって崩壊熱除去系として使用できるループ数並びに循環モードが異なるので、崩壊熱除去系の運転モードを、水・蒸気系が使用できない場合のD1からD5の5つのモードと、これらに対応して水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の5つの合計10個のモードに分類した。ただし、外部電源が喪失した場合には水・蒸気系は使用できないものと仮定したので、D9はD4と全く同じ条件となる。表6.1-1と表6.1-2に各運転モードの失敗基準を示す。MCSが使用できるのは原子炉停止後24時間経過後、水・蒸気系単独で崩壊熱が除去できる時間を原子炉停止後24時間以内とした。

表6.1-1と表6.1-2に示す失敗基準に基づき計算した各運転モードの崩壊熱除去機能喪失確率を表6.1-3にまとめて示す。表6.1-3では、各々のモード毎の崩壊熱除去機能喪失確率（/demand）について、時刻0hrに対応するもの（即ち崩壊熱除去系の起動時失敗確率）と、累積故障確率（起動時失敗確率+運転継続失敗確率）とが示してある。なお、機能喪失確率の値はモンテカルロ法を用いたフェイズドミッション解析コードにより計算を行なったものであり、統計的処理に基づくバラツキを有している。このバラツキの程度を示す指標として、F.S.D.（Fractional Standard Deviation）の値を得られた結果と共に表6.1-3に示した。図6.1-1にはD1からD10までの10のモードの崩壊熱除去機能喪失確率を示す。また、図6.1-2及び図6.1-3には各運転モードの起動時失敗確率と運転継続失敗確率を示す。

水・蒸気系が使用できない場合のD1からD5の5つのモードをその機能喪失確率の小さい順に並べると、 $D5 < D1 < D4 < D3 < D2$ となっている。D1は崩壊熱除去系としてACS3ループとMCSが使用できる場合であり、その機能喪失確率は 6.5×10^{-7} である。D5はMCSが使用できない場合であるが、機能喪失確率は 6.3×10^{-7} であり、統計的処理に基づくバラツキを考慮するとD1とほぼ等しい。これは最も成功基準の厳しい原子炉停止直後の崩壊熱除去系機能喪失確率が支配的であるのに、D1でMCSを使用できるのは原子炉停止後24時間を経過した後であるので、MCSの効果が小さいためである。次にD4は起因事象が外部電源喪失の場合である。外部電源が喪失してディーゼル発電機の起動・運転に失敗するとACSの強制循環及びMCSは使用できないので、機能喪失確率はD1の約3.8倍の 2.5×10^{-6} となる。D3は3ループあるACSのうち1ループが、自然循環には使用できるが強制循環には使用できない場合であり、その機能喪失確率はD1の約89倍の 5.8×10^{-5} である。最後に、D2は3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できない場合であり、その機能喪失確率はD1の約140倍の 9.3×10^{-5} である。したがってACS

の1ループは約2桁の機能喪失確率低減効果をもっていることがわかる。

水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の5つのモードをその機能喪失確率の小さい順に並べると、 $D6 < D10 < D8 < D9 < D7$ となり、その傾向はほぼD1からD5の順番と同じであるが、外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので、D9の機能喪失確率はD4と同一となり、D8より大きくなった点が異なっている。

また、同じ起因事象に対応する運転モードを水・蒸気系使用の有無で比較すると（図6.1-1）、D6の機能喪失確率はD1の約110分の1であり、原子炉停止後24時間、水・蒸気系単独で崩壊熱を除去できることにより、約2桁の機能喪失確率低減効果があることがわかる。次にD2とD7を比較すると、D7の機能喪失確率はD2の約2.8分の1であり、水・蒸気系の効果が小さい。これは水・蒸気系で崩壊熱を除去するためには、3ループある主冷却系のうち少なくとも1ループが強制循環をしている必要があるが、この運転モードの起因事象は、ACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないためである。D8の機能喪失確率はD3の約84分の1である。D9とD4は、外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので条件が全く同じであり機能喪失確率も同じである。最後にD10はD5の約35分の1であり、水・蒸気系の効果がやや小さい。これはMCSが使用できないために、原子炉停止後24時間以上経過した後のアンリライアビリティの寄与が大きくなるためである。

信頼度上支配的な因子を検討するため、重要度評価を行った。重要度の指標としては Fussel Vesely 重要度を用いた。Fussel Vesely 重要度はシステムの構成要素の故障確率が0である場合にシステム全体の非信頼度が何%低下するかを表している。

崩壊熱除去系機能喪失確率に対する設備別及び機器別重要度

各運転モードに対する設備別重要度を図6.1-4に、機器別重要度を図6.1-5に示す。

D1

本運転モードは、ACSは3ループとも使用可能であるが、起因事象により水・蒸気系が使用できない場合であるので、ACSの自然循環・強制循環に係わる機器の重要度が大きい。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が51%、FC（ACS強制循環機能喪失）が41%である。

機器別重要度は、AC出入口ダンパ各17%、1次・2次ポニーモータ各14%、AC出口止め弁9%、ACベーン8%である。

D4

本運転モードは、起因事象が外部電源喪失であり、水・蒸気系が崩壊熱除去系として

使用できない場合である。電源が喪失してもACSの自然循環は可能であるが、強制循環を行うためにはDGが必要なのでDG関係の機器の需要度が大きくなる。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が42%、DG（ディーゼル発電機）が36%、FC（ACS強制循環機能喪失）が18%である。

機器別重要度は、AC出入口ダンパ各14%、DG制御系リレー10%、DG制御系スイッチ9%、DG本体の運転継続失敗9%、AC出口止め弁8%、ACベーン7%、1次・2次ポニーモータ各7%である。

D6

D9を除くD6からD10までの4つのモードは、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用可能な場合である。

D6に対する設備別重要度は、WSSS（水・蒸気系）が55%、FC（ACS強制循環機能喪失）が50%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が46%である。

D6に対する機器別重要度は、起動用給水ポンプ55%、1次・2次ポニーモータ各18%、AC出入口ダンパ各15%、AC出口止め弁8%、ACベーン7%である。起動用給水ポンプは1台だけしか設けられていないとして評価したので重要度が大きい。

D7

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できない場合である。第1フェイズの成功基準はACS1ループの強制循環または3ループの自然循環であるので、本モードの場合は起因事象で影響を受けなかった残りの2ループが強制循環に失敗すると崩壊熱除去失敗となるので、ACSの強制循環に係わる機器の重要度が大きい。また、使命時間が720時間と長いため伝熱管のように静的機器の故障も上位に出てくる。

設備別重要度は、FC（ACS強制循環機能喪失）62%、CC（機器冷却系・補機冷却水設備等）26%である。

機器別重要度は、1次・2次ポニーモータ各24%、AC伝熱管8%、中間交換器7%、ACブロワ6%、ポニーモータ冷却用ブロワ6%、機器冷却系フレオンポンプ5%、機器冷却系フレオン冷凍機5%である。

D8

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環に使用できない場合である。なお、自然循環は可能である。

設備別重要度は、FC（ACS強制循環機能喪失）が59%、WSSS（水・蒸気系）が47%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が37%である。

機器別重要度は、起動用給水ポンプ38%、1次・2次ポニーモータ各21%、AC出入口ダンパ各12%、AC出口止め弁7%、ACベーン6%、ACブロワ5%、ポニーモータ冷却用ブロワ5%である。

D10

本モードは起因事象によりMCSが崩壊熱除去系として使用できない場合である。MCSが使用できないので原子炉停止後24時間以上経過したのちは、ACSの自然循環で崩壊熱除去を行うことになるので、その重要度が大きくなる。

設備別重要度は、FNMR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））44%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））39%、WSSS（水・蒸気系）20%、FC（ACS強制循環機能喪失）17%である。

機器別重要度は、AC伝熱管20%、中間交換器19%、起動用給水ポンプ17%、AC出入口ダンパ各13%、AC出口止め弁7%、ACベーン6%、1次・2次ポニーモータ各6%である。

6.2 事故シーケンス評価

事故シーケンスの定量化は、イベントツリー解析で同定された事故シーケンスに、起因事象で求めた起因事象の発生頻度と、各設備の機能喪失確率を適用して行う。

PLOHS発生頻度

定量結果を起因事象及び運転モード別にまとめた結果を表6.2-1に示す。その結果、PLOHSの発生頻度が約 1.1×10^{-6} /炉年と評価された。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約20%、13番「給水流量喪失」が約18%、11番「2次主冷却系漏洩」が約15%、12番「外部電源喪失」が約12%、14番「タービントリップ」が約11%を占めている。これらの起因事象のうち12番、13番、14番は水・蒸気系が使用できない起因事象である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約51%、D1が約29%を占めている。D1の機能喪失確率はD7より約2桁小さいが、起因事象の発生頻度が大きいので寄与が大きくなっている。

PLOHS発生頻度に対する設備別及び機器別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度を図6.2-1に、機器別重要度を図6.2-2に示す。

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度は、FC（ACS強制循環機能喪失）が50%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が29%、CC（機器冷却系・補機冷却水設備等）が15%、FNMR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が9%等である。その他の設備の重要度は5%未満である。

PLOHS発生頻度に対する機器別重要度

1次・2次ポニーモータが各々19%、AC出入口ダンパが各9%、AC出口止め弁が5%である。その他の機器の重要度は5%未満である。

設計ベースでは原子炉停止直後の成功基準として、ACS1ループの強制循環またはACS3ループの自然循環が必要である。設備別でACS強制循環や機器冷却系の重要度が大きく、機器別で1次・2次ポンプモータの重要度が大きいことは、設計ベースでは原子炉停止直後にACSの強制循環に依存する割合が高いことを示している。

炉心損傷発生頻度

平成4年度の評価によると、LORLの発生頻度は約 3.3×10^7 / 炉年、ATWSは約 1.2×10^8 / 炉年であるので、PLOHS発生頻度と合計すると炉心損傷発生頻度は約 1.4×10^6 / 炉年となり、PLOHSが全体の約76%、LORLが全体の約23%、ATWSは約1%である。

起因事象別炉心損傷発生頻度

起因事象別に見ると、表6.2-2に示すように、3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が約21%、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約15%、13番「給水流量喪失」が約15%、11番「2次主冷却系漏洩」が約12%となっている。3番、15番、11番はいずれも3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できなくなる起因事象である。13番「給水流量喪失」が発生した場合には水・蒸気系は使用できないとした。

事故シーケンス別炉心損傷発生頻度

表6.2-3に炉心損傷発生頻度を事故シーケンスで整理した結果を示す。発生頻度の大きい事故シーケンスは、15番「蒸気発生器伝熱管破損」、13番「給水流量喪失」の起因事象が発生した際に、崩壊熱除去系が機能を喪失するシーケンス、起因事象3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が発生したときに1次アルゴンガス系の隔離に失敗するシーケンスである。以下11番「2次主冷却系漏洩」、12番「外部電源喪失」、14番「タービントリップ」の起因事象が発生した際に、崩壊熱除去系が機能が喪失するシーケンスが続く。1位から6位までのうち3位がLORL、それ以外は全てPLOHSに至るシーケンスである。

システム別炉心損傷発生頻度

表6.2-4に炉心損傷発生頻度をシステム別に整理した結果を示す。システム別では、D7（ACS1ループ強制循環・自然循環不能、水・蒸気系使用可能時崩壊熱除去失敗）が約39%、D1（ACS全ループ健全、水・蒸気系使用不能時崩壊熱除去失敗）が約22%、A（1次アルゴンガス系隔離失敗）が約19%、D4（外部電源喪失時崩壊熱除去失敗）が約9%、D8（ACS1ループ強制循環不能、水・蒸気系使用可能時崩壊熱除去失敗）が約6%で上位を占める。

表6.1-1 設計ベースの失敗基準
水・蒸気系なし

D1 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D2 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS2ループ強制循環失敗
1~24	ACS2ループ自然循環失敗
24~720	ACS2ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D3 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS2ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D4 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D5 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~168	ACS3ループ自然循環失敗

表6.1-2 設計ベースの失敗基準
(水・蒸気系24時間使用)

D6 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D7 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS2ループ強制循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	ACS2ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~720	ACS2ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D8 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS2ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D9 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D10 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗

表6.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率（設計ベース）

除熱モード		崩壊熱 除去時間 [hr]	水・蒸気系を考慮していない場合		水・蒸気系を考慮した場合（24時間）	
			崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)	崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)
D1(D6)	全ループ使用可能	0	5.7E-07	4.6	4.9E-09	8.0
		168	6.5E-07	4.4	5.7E-09	7.8
D2(D7)	補助冷却設備1ループについて強制循環、 自然循環ともに使用不可能	0	7.9E-05	2.6	2.4E-05	3.8
		720	9.3E-05	4.5	3.3E-05	18.1
D3(D8)	補助冷却設備1ループについて 強制循環のみ使用不可能	0	5.4E-05	3.0	6.4E-07	4.3
		168	5.8E-05	3.0	6.9E-07	4.3
D4	外部電源喪失	0	2.3E-06	5.7	—	—
		168	2.5E-06	5.4	—	—
D5(D10)	メンテナンス冷却系使用不可能	0	5.7E-07	4.2	4.9E-09	7.3
		168	6.3E-07	4.0	1.8E-08	31.3

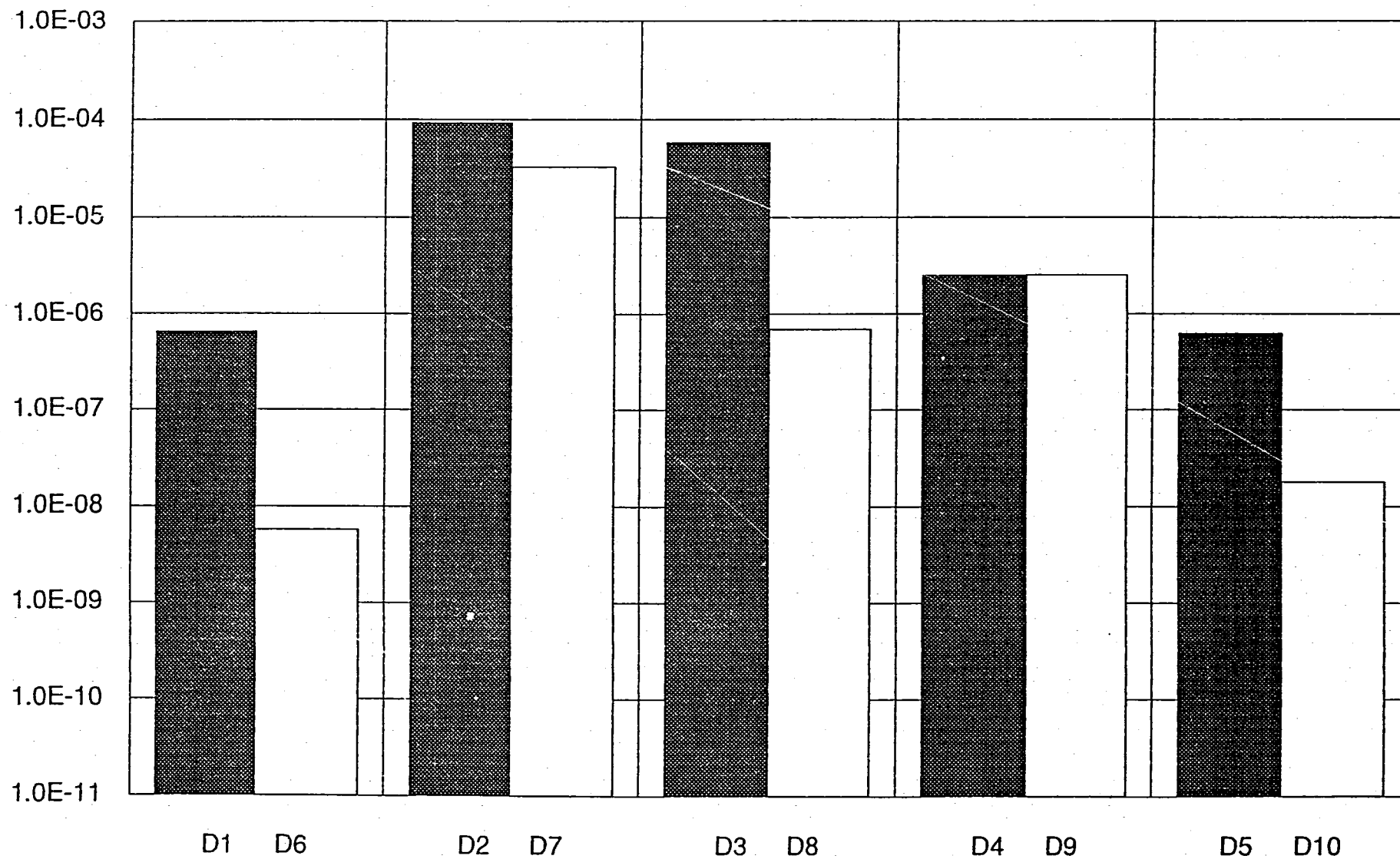
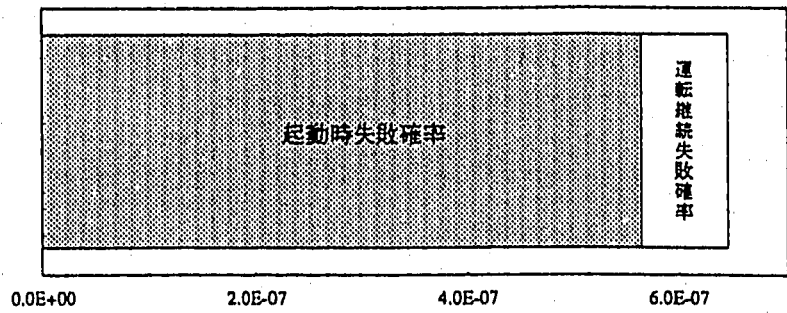
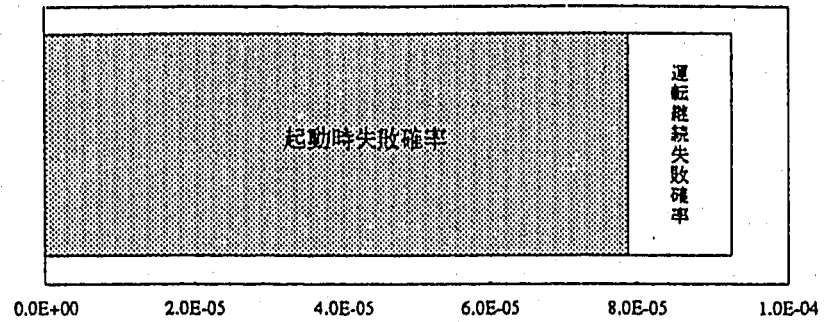


図6.1-1 各運転モードの機能喪失確率（設計ベース）

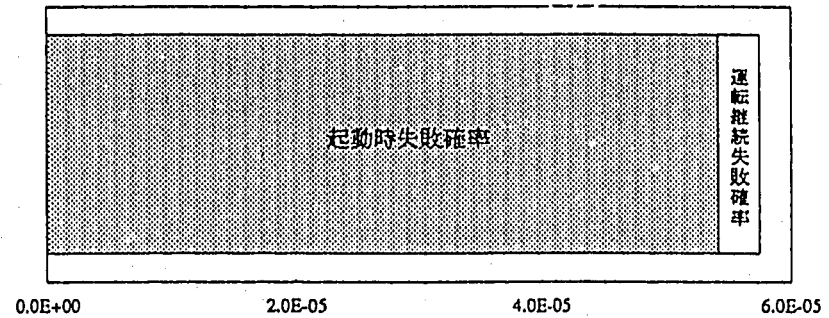
D1
全ループ使用可能



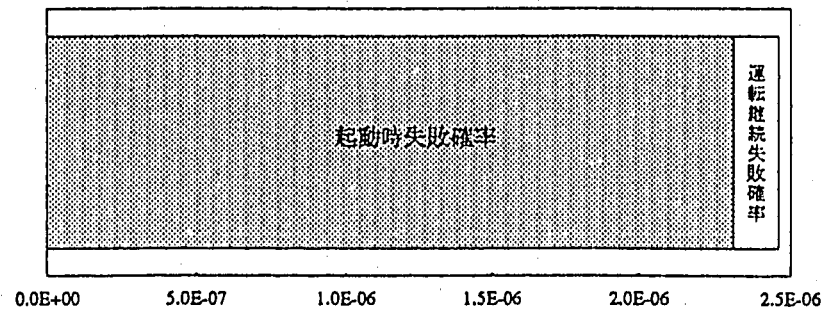
D2
補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環
自然循環ともに
使用不可能



D3
補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D4
外部電源喪失



D5
メンテナンス冷却系
使用不可能

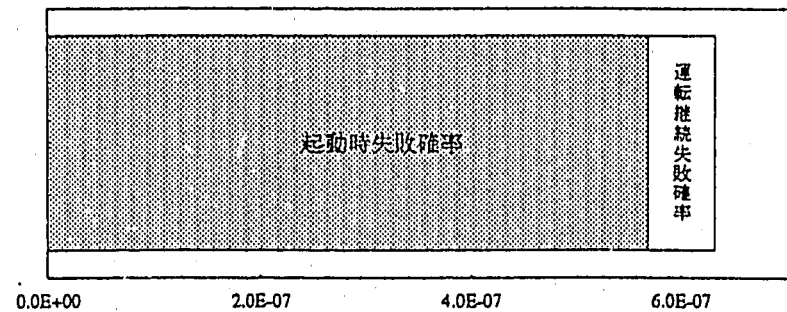
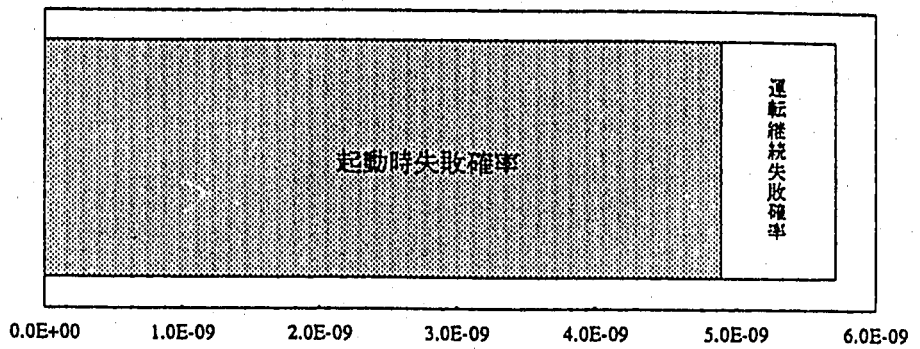
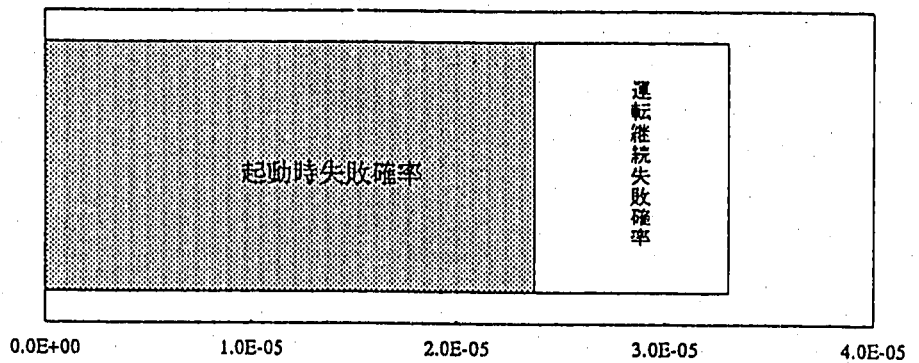


図6.1-2 崩壊熱除去機能喪失確率 (設計ベース)

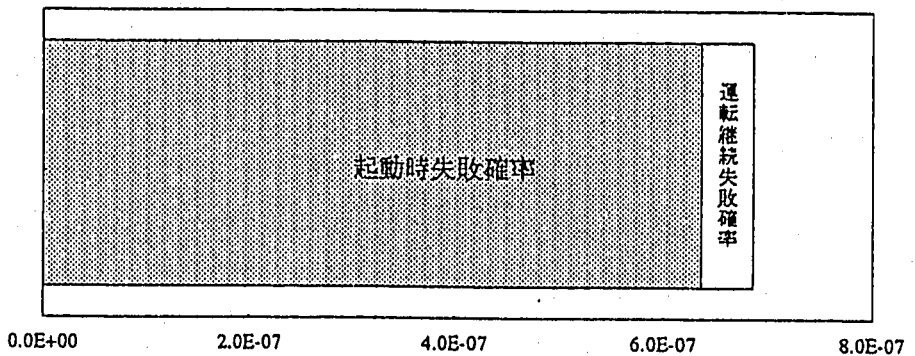
D6
全ループ使用可能



D7
補助冷却設備1ループ
について、強制循環、
自然循環ともに
使用不可能



D8
補助冷却設備1ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D10
メンテナンス冷却系
使用不可能

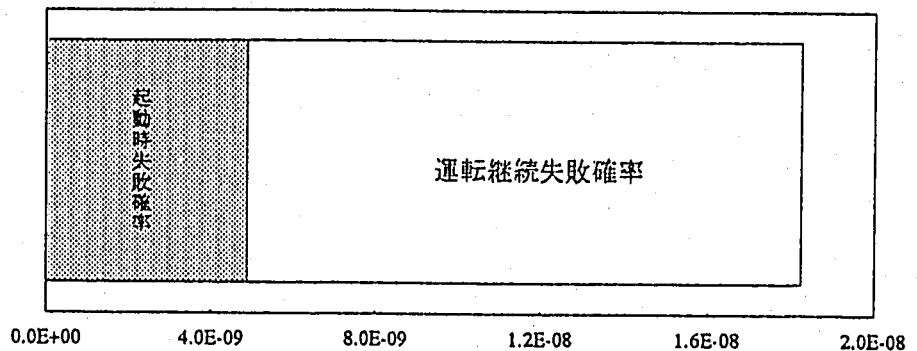


図6.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率 (設計ベース)
(水・蒸気系24時間利用可能な場合)

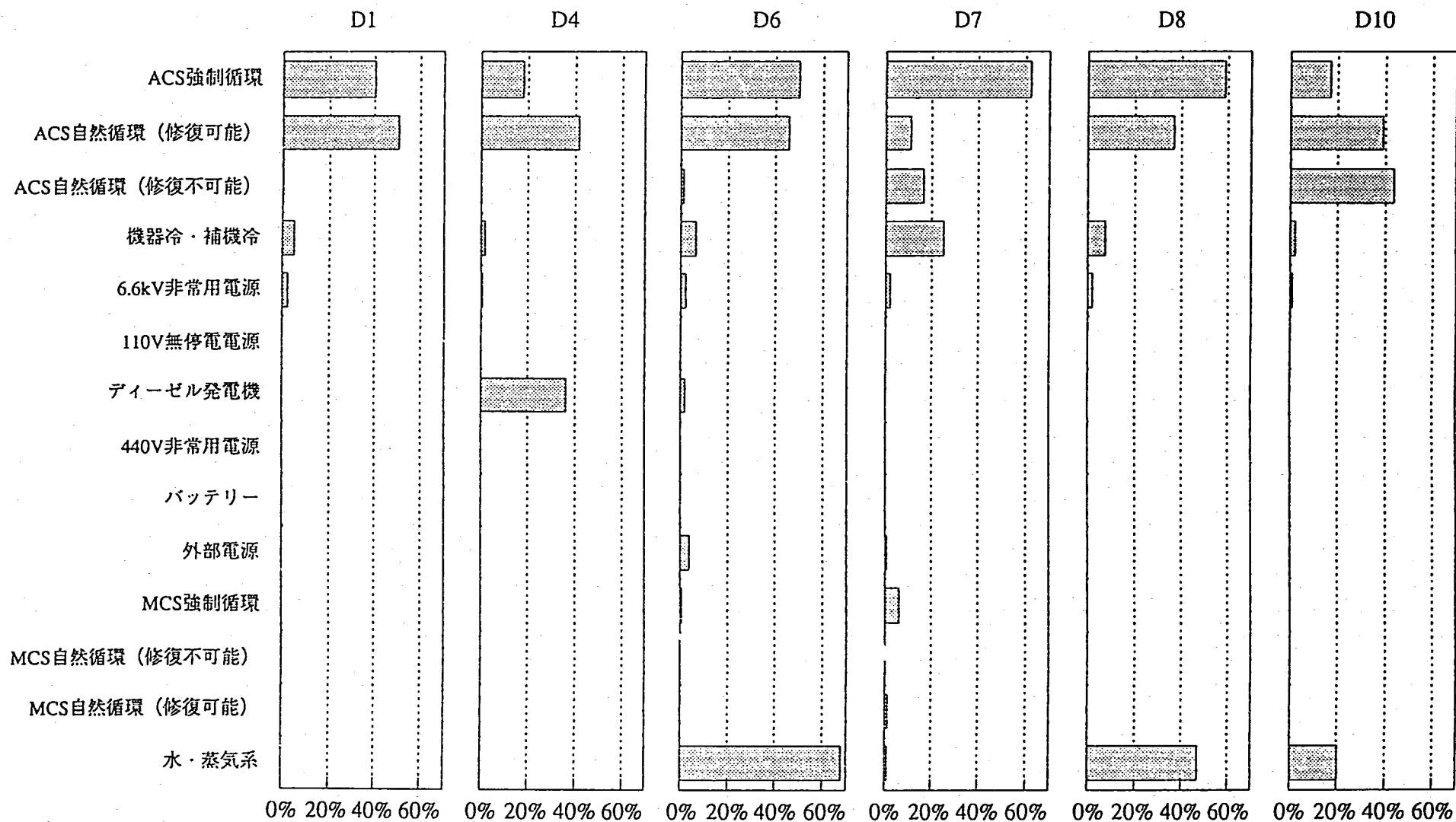


図6.1-4 崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別重要度 (設計ベース)

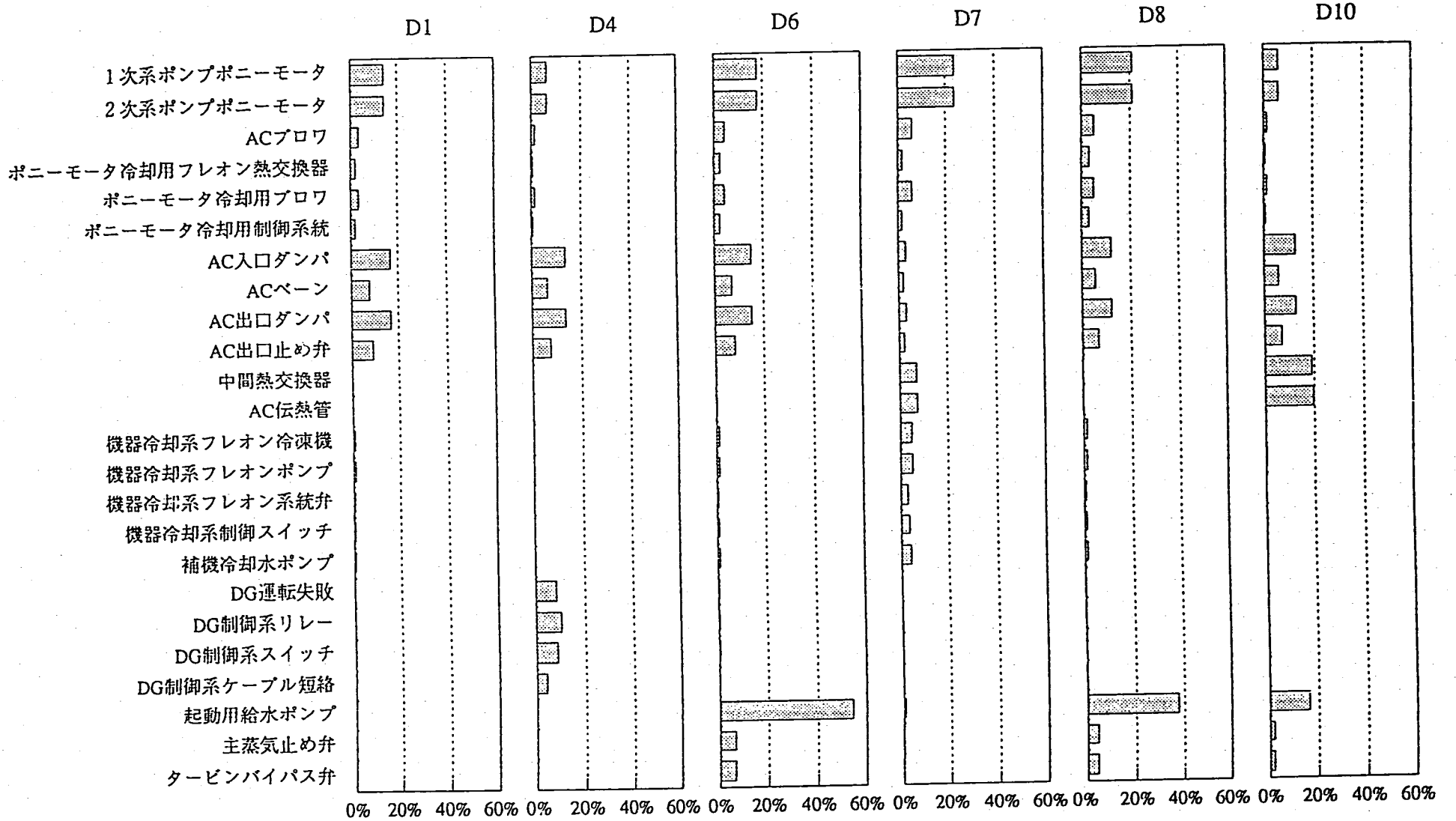


図6.1-5 崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (設計ベース)

表6.2-1 PLOHS発生頻度 (設計ベース)

絶対値

起因事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
		D1	D4	D6	D7	D8	D10	
番号	発生頻度	6.5E-07	2.5E-06	5.7E-09	3.3E-05	6.9E-07	1.8E-08	発生頻度
I01	2.8E-02			1.6E-10				1.6E-10
I03	1.6E-03				5.3E-08			5.3E-08
I05	7.2E-04						1.3E-11	1.3E-11
I06	7.2E-02			4.1E-10				4.1E-10
I07	7.2E-02					5.0E-08		5.0E-08
I08	3.2E-03				1.1E-07			1.1E-07
I09	4.9E-01			2.8E-09				2.8E-09
I10	5.1E-02					3.5E-08		3.5E-08
I11	5.3E-03				1.7E-07			1.7E-07
I12	5.2E-02		1.3E-07					1.3E-07
I13	3.1E-01	2.0E-07						2.0E-07
I14	1.9E-01	1.2E-07						1.2E-07
I15	6.8E-03				2.2E-07			2.2E-07
I16	3.0E-04			1.7E-12				1.7E-12
I18	5.7E-01			3.2E-09				3.2E-09
合計	1.9E+00	3.3E-07	1.3E-07	6.6E-09	5.6E-07	8.5E-08	1.3E-11	1.1E-06

相対値

起因事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
		D1	D4	D6	D7	D8	D10	
番号	発生頻度	6.5E-07	3.3E-05	5.7E-09	3.3E-05	6.9E-07	1.8E-08	発生頻度
I01	2.8E-02			0.0%				0.0%
I03	1.6E-03				4.8%			4.8%
I05	7.2E-04						0.0%	0.0%
I06	7.2E-02			0.0%				0.0%
I07	7.2E-02					4.5%		4.5%
I08	3.2E-03				9.6%			9.6%
I09	4.9E-01			0.3%				0.3%
I10	5.1E-02					3.2%		3.2%
I11	5.3E-03				15.8%			15.8%
I12	5.2E-02		11.8%					11.8%
I13	3.1E-01	18.2%						18.2%
I14	1.9E-01	11.2%						11.2%
I15	6.8E-03				20.3%			20.3%
I16	3.0E-04			0.0%				0.0%
I18	5.7E-01			0.3%				0.3%
合計	1.9E+00	29.4%	11.8%	0.6%	50.5%	7.7%	0.0%	100.0%

表6.2-2 起因事象別炉心損傷発生頻度 (設計ベース)

Event Tree Quantification Result

Init Event \ Accident Category	Accident Category								IE Total (/Yr)	%
	UTOP (/Yr)	UTOPULOF (/Yr)	PLOHS (/Yr)	ULOPI (/Yr)	LORL (/Yr)	ULOF (/Yr)	ULOHS (/Yr)	IE Total (/Yr)		
I01	4.3E-10	2.2E-10	1.6E-10	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1E-10	0.1	
I03	0.0	0.0	5.3E-8	4.7E-11	2.4E-7	0.0	0.0	3.0E-7	20.6	
I05	0.0	0.0	1.3E-11	1.4E-11	8.6E-8	5.9E-12	0.0	8.6E-8	6.0	
I06	0.0	0.0	4.1E-10	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	1.2E-9	0.1	
I07	0.0	0.0	5.0E-8	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	5.1E-8	3.5	
I08	0.0	0.0	1.1E-7	0.0	0.0	3.5E-11	0.0	1.1E-7	7.7	
I09	0.0	0.0	2.8E-9	0.0	0.0	6.6E-10	6.1E-11	3.5E-9	0.2	
I10	0.0	0.0	3.5E-8	0.0	0.0	6.9E-11	6.3E-12	3.5E-8	2.4	
I11	0.0	0.0	1.7E-7	0.0	0.0	7.2E-12	6.6E-13	1.7E-7	11.8	
I12	0.0	0.0	1.3E-7	0.0	0.0	7.5E-11	0.0	1.3E-7	9.1	
I13	0.0	0.0	2.0E-7	0.0	0.0	2.5E-9	5.4E-9	2.1E-7	14.5	
I14	0.0	0.0	1.2E-7	0.0	0.0	2.6E-10	2.4E-11	1.2E-7	8.4	
I15	0.0	0.0	2.2E-7	0.0	2.9E-13	5.5E-11	1.2E-10	2.2E-7	15.3	
I16	0.0	0.0	1.7E-12	0.0	0.0	2.3E-12	0.0	4.0E-12	0.0	
I18	0.0	0.0	3.2E-9	0.0	0.0	4.1E-10	0.0	3.6E-9	0.3	
Category Total (/Yr)	4.3E-10	2.2E-10	1.1E-6	6.1E-11	3.3E-7	5.7E-9	5.6E-9	1.4E-6		
Percentage (%)	0.0	0.0	76.3	0.0	22.9	0.4	0.4			

表6.2-3 事故シーケンス別炉心損傷発生頻度 (設計ベース)

Accident Sequence Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = 1.4E-6 / Yr)

No.	Sequence Designation	Accident Category	Frequency (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)	Cumulative Frequency (/Yr)	Percentage of Cumulative Frequency (%)
1	I15-D7	PLOHS	2.2E-7	15.3	2.2E-7	15.3
2	I13-D1	PLOHS	2.0E-7	13.9	4.2E-7	29.3
3	I03-A	LORL	1.9E-7	13.2	6.1E-7	42.5
4	I11-D7	PLOHS	1.7E-7	11.8	7.8E-7	54.3
5	I12-D4	PLOHS	1.3E-7	9.1	9.1E-7	63.4
6	I14-D1	PLOHS	1.2E-7	8.4	1.0E-6	71.7
7	I08-D7	PLOHS	1.1E-7	7.7	1.1E-6	79.4
8	I05-A	LORL	8.6E-8	6.0	1.2E-6	85.4
9	I03-D7	PLOHS	5.3E-8	3.7	1.3E-6	89.1
10	I07-D8	PLOHS	5.0E-8	3.5	1.3E-6	92.6
11	I03-P	LORL	4.8E-8	3.3	1.4E-6	95.9
12	I10-D8	PLOHS	3.5E-8	2.4	1.4E-6	98.4
13	I13-SM-SB	ULOHS	5.4E-9	0.4	1.4E-6	98.7
14	I03-G	LORL	4.8E-9	0.3	1.4E-6	99.1
15	I18-D6	PLOHS	3.2E-9	0.2	1.4E-6	99.3
16	I09-D6	PLOHS	2.8E-9	0.2	1.4E-6	99.5
17	I13-/SM RM-SB	ULOF	1.4E-9	0.1	1.4E-6	99.6
18	I13-SM-/SB RB	ULOF	8.7E-10	0.1	1.4E-6	99.6
19	I07-/SM RM-SB	ULOF	4.5E-10	0.0	1.4E-6	99.7
20	I06-/SM RM-SB	ULOF	4.5E-10	0.0	1.4E-6	99.7

表6.2-4 システム別炉心損傷発生頻度 (設計ベース)

USC Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = $1.4E-6$ / Yr)

No.	USC Designation	Probability of USC (before recovery)	Probability of USC (after recovery)	Frequency of Core Melt (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)
1	D7	$3.3E-5$	$3.3E-5$	$5.5E-7$	38.5
2	D1	$6.5E-7$	$6.5E-7$	$3.2E-7$	22.3
3	A	$1.2E-4$	$1.2E-4$	$2.8E-7$	19.2
4	D4	$2.5E-6$	$2.5E-6$	$1.3E-7$	9.1
5	D8	$6.9E-7$	$6.9E-7$	$8.5E-8$	5.9
6	P	$3.0E-5$	$3.0E-5$	$4.8E-8$	3.3
7	SB	$1.7E-4$	$6.1E-6$	$9.3E-9$	0.6
8	SM	$1.5E-4$	$2.0E-5$	$8.1E-9$	0.6
9	D6	$5.7E-9$	$5.7E-9$	$6.6E-9$	0.5
10	G	$3.0E-6$	$3.0E-6$	$4.8E-9$	0.3
11	/SM RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$3.6E-9$	0.3
12	/SB RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$2.3E-9$	0.2
13	RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$4.1E-10$	0.0
14	RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$4.1E-10$	0.0
15	W	$1.4E-4$	$1.4E-4$	$3.2E-11$	0.0
16	D0	$1.8E-8$	$1.8E-8$	$1.3E-11$	0.0
17	T	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$6.0E-13$	0.0
18	C	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$9.2E-15$	0.0

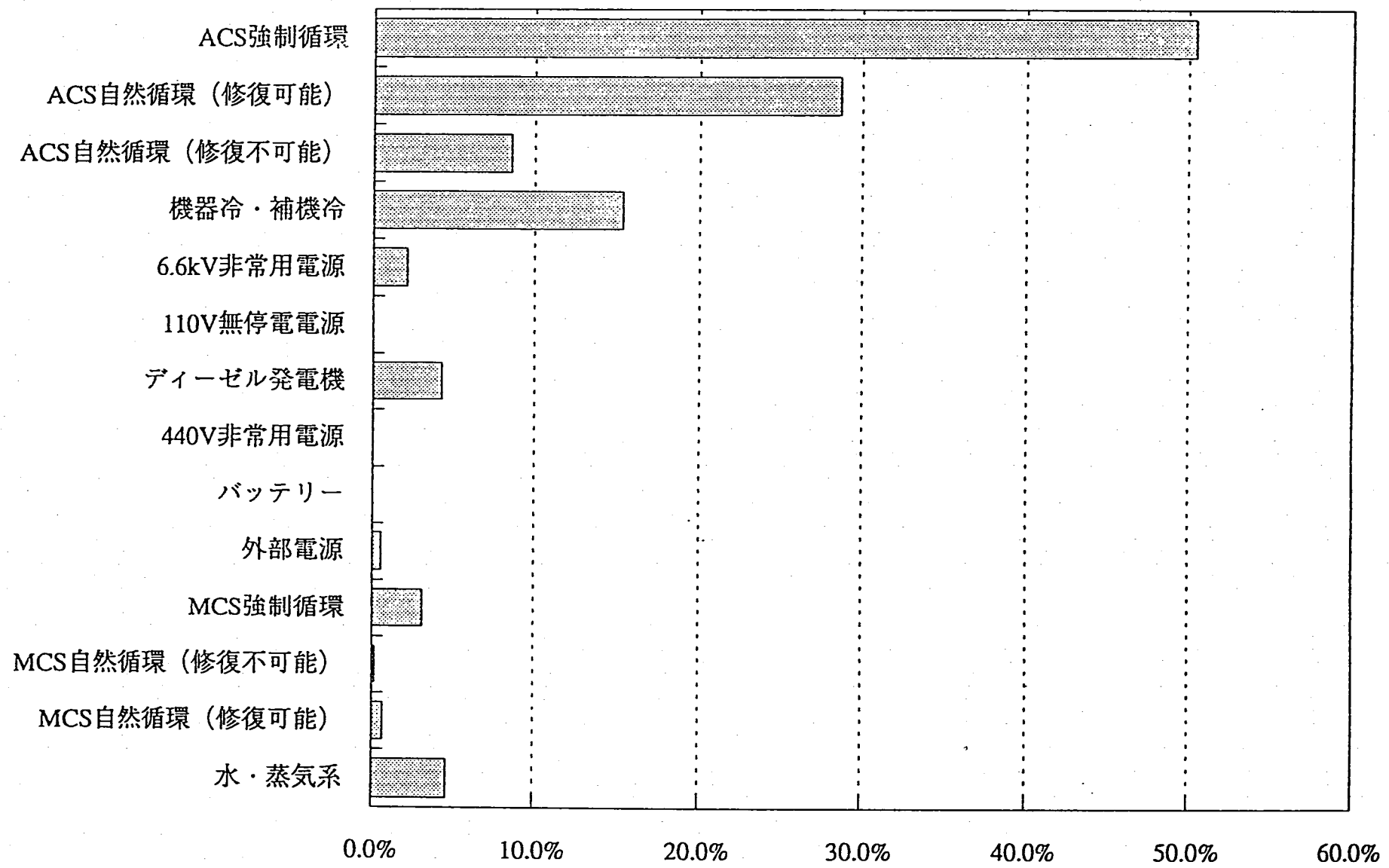


図6.2-1 PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (設計ベース)

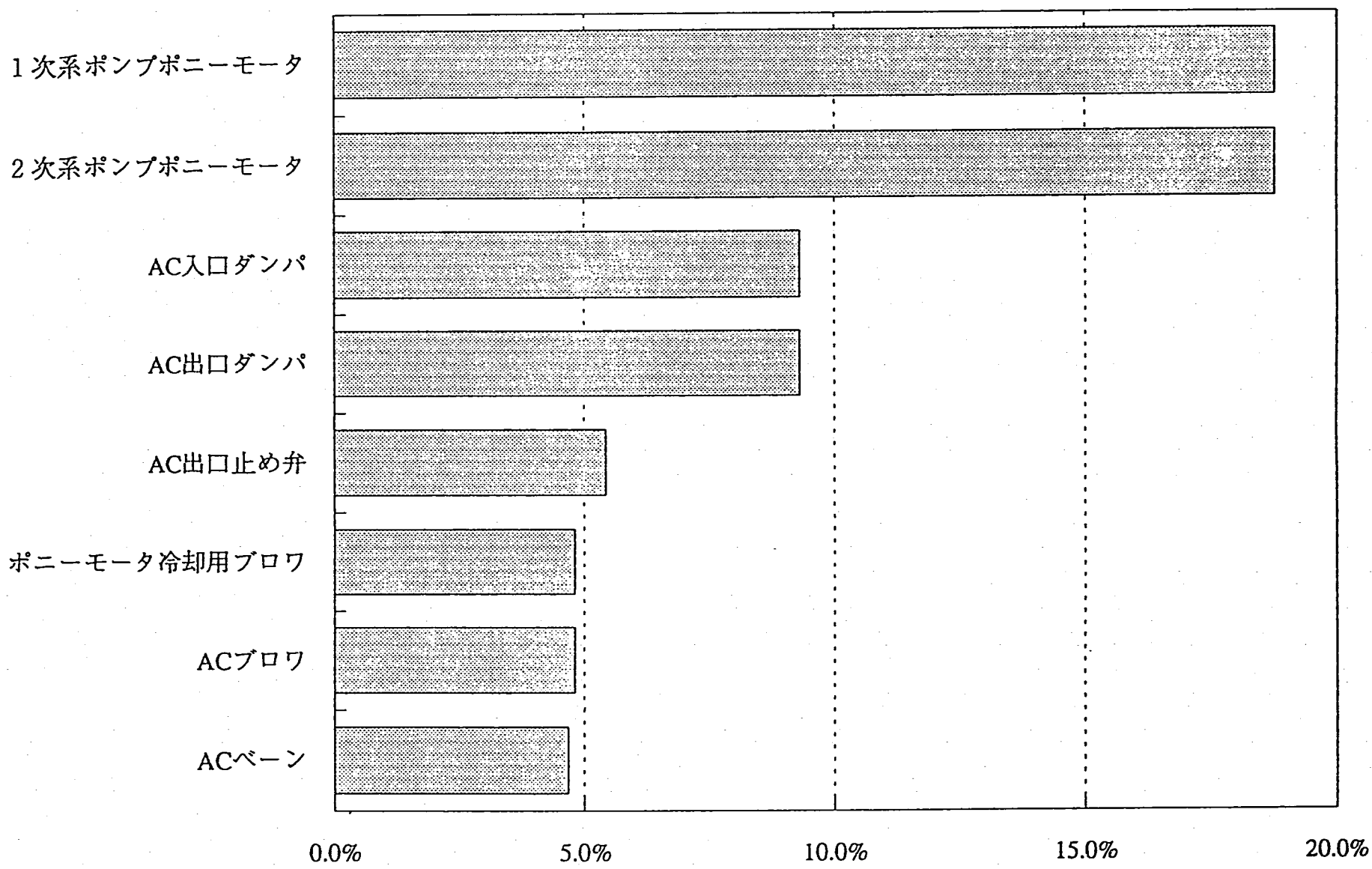


図6.2-2 PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (設計ベース)

7. 評価ベースの評価結果

先行炉の評価例から、熱流解析による最確値評価では成功基準は緩和され、冷却材バウンダリの判断基準によっては、炉停止直後から補助冷却設備（ACS）1ループの自然循環により崩壊熱が除去できる可能性があるという知見が得られている。そこで、この条件の評価ベースとして解析を行った

7.1 崩壊熱除去機能喪失確率評価

起因事象によって崩壊熱除去系として使用できるループ数並びに循環モードが異なるので、崩壊熱除去系の運転モードを、水・蒸気系が使用できない場合のD1からD5の5つのモードとこれらに対応して水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の合計10個のモードに分類した。表7.1-1と表7.1-2に各運転モードの失敗基準を示す。メンテナンス冷却系（MCS）が使用できるのは原子炉停止後24時間経過後、水・蒸気系単独で崩壊熱が除去できる時間を原子炉停止後24時間以内とした。

表7.1-1と表7.1-2に示す失敗基準に基づき計算した各運転モードの崩壊熱除去機能喪失確率を表7.1-3にまとめて示す。表7.1-3では、各々のモード毎の崩壊熱除去機能喪失確率（/demand）について、時刻0hrに対応するもの（即ち崩壊熱除去系の起動時失敗確率）と、累積故障確率（起動時失敗確率+運転継続失敗確率）とが示してある。なお、機能喪失確率の値はモンテカルロ法を用いたフェイズドミッション解析コードにより計算を行なったものであり、統計的処理に基づくバラツキを有している。このバラツキの程度を示す指標として、F.S.D.（Fractional Standard Deviation）の値を得られた結果と共に表7.1-3に示した。図7.1-1にはD1からD10までの10のモードの崩壊熱除去機能喪失確率を示す。また、図7.1-2及び図7.1-3には各運転モードの起動時失敗確率と運転継続失敗確率を示す。

水・蒸気系が使用できない場合の5つのモードのうち、D1、D3、D4、D5の原子炉停止直後の成功基準は全て等しくなる。これらの運転モードの機能喪失確率はいずれも約 1.0×10^{-7} であり、統計的処理に基づくバラツキの範囲内に収まっている。3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないD2の機能喪失確率はD1の約370倍の約 2.2×10^{-5} である。これは評価ベースでは原子炉停止直後からACS1ループの自然循環によって崩壊熱が除去できるという成功基準を採用しているためである。

水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の5つのモードをその機能喪失確率の小さい順に並べると、 $D8 < D6 < D10 < D9 < D7$ となる。外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので、D9の機能喪失確率はD4と同一となり、D8より大きい。D7は使命時間が長いアンリライアビリティが大きく、その機能喪失確率は約 6.1×10^{-6} である。

また、同じ起因事象に対応する運転モードを水・蒸気系使用の有無で比較すると（図7.1-1）、D6の機能喪失確率はD1の約71分の1であり、原子炉停止後24時間、水・蒸気系単独で崩壊熱を除去できることにより、約2桁の機能喪失確率低減効果があることがわかる。次にD2とD7を比較すると、D7の機能喪失確率はD2の約3.6分の1であり、水・蒸気系の効果が小さい。これは水・蒸気系で崩壊熱を除去するためには、3ループある主冷却系のうち少なくとも1ループが強制循環をしている必要があるが、この運転モードの起因事象は、ACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないためである。D8の機能喪失確率はD3の約140分の1である。D9とD4は、外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので条件が全く同じであり機能喪失確率も同じである。最後にD10はD5の約5.3分の1であり、水・蒸気系の効果が小さい。これはMCSが使用できないために、原子炉停止後24時間以上経過した後のアンリライアビリティの寄与が大きくなるためである。

崩壊熱除去系機能喪失確率に対する設備別及び機器別重要度

崩壊熱除去の各運転モードに対する設備別重要度を図7.1-4に、機器別重要度を図7.1-5に示す。

D1

本運転モードは、ACSは3ループとも使用可能であるが、起因事象により水・蒸気系が使用できない場合であるので、ACSの自然循環に係わる機器の重要度が大きい。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が99%である。

機器別重要度は、AC出入口ダンパ各33%、AC出口止め弁18%、ACペーン15%である。

D4

本運転モードは、起因事象が外部電源喪失であり、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用できない場合である。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が95%である。

機器別重要度は、AC出入口ダンパ各32%、AC出口止め弁17%、ACペーン15%である。

D6

D9を除くD6からD10までの4つのモードは、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用可能な場合である。

D6に対する設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が67%、WSSS（水・蒸気系）が51%、MCSFC（メンテナンス冷却系強制循環）が48%、FNNR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が33%である。

D6に対する機器別重要度は、起動用給水ポンプ41%、AC出入口ダンパ各22%、MCS電磁ポンプ冷却系の弁21%、AC伝熱管15%、中間交換器15%等である。

D7

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できない場合である。使命時間が720時間と長いためMCSの強制循環やACSの自然循環に係わる機器の故障が上位に出てくる。

設備別重要度は、MCSFC（メンテナンス冷却系強制循環）が87%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が65%、FNNR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が35%である。

機器別重要度は、電磁ポンプ冷却系の弁38%、AC出入口ダンパ各22%、AC伝熱管16%、中間交換器15%等である。

D8

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環に使用できない場合である。なお、自然循環は可能である。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が87%、WSSS（水・蒸気系）が81%である。

機器別重要度は、起動用給水ポンプ65%、AC出入口ダンパ各29%、AC出口止め弁16%、ACベーン13%である。

D10

本モードは起因事象によりMCSが崩壊熱除去系として使用できない場合である。MCSが使用できないので原子炉停止後24時間以上経過したのちは、ACSの自然循環で崩壊熱除去を行うことになるので、その重要度が大きくなる。

設備別重要度は、FNNR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））60%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））40%である。

機器別重要度は、AC伝熱管27%、中間交換器26%、AC出入口ダンパ各13%、AC出口止め弁7%、ACベーン6%である。

7.2 事故シーケンス評価

事故シーケンスの定量化は、イベントツリー解析で同定された事故シーケンスに、起因事象で求めた起因事象の発生頻度と、各設備の機能喪失確率をを適用して行う。

PLOHS発生頻度

定量結果を起因事象及び運転モード別にまとめた結果を表7.2-1に示す。その結果、PLOHSの発生頻度が約 1.4×10^{-7} /炉年と評価された。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約30%、11番「2次主冷却系漏洩」が約23%、8番「1次主冷却系逆止弁誤閉」が約14%、13番「給水流量喪失」が約14%を占めている。

これらの起回事象のうち8番、11番、15番は崩壊熱除去系の運転モードがいずれもD7の起回事象である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約75%、D1が約22%を占めている。D7は3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないモードであり、D7の機能喪失確率が他の運転モードに比べて相対的に大きいため上位を占めている。

PLOHS発生頻度に対する設備別及び機器別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度を図7.2-1に、機器別重要度を図7.2-2に示す。

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が73%、MCSFC（メンテナンス冷却系強制循環失敗）が65%、FNNR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が27%である。

その他の設備の重要度は5%未満である。

PLOHS発生頻度に対する機器別重要度

AC出入口ダンパが各22%、MCS電磁ポンプ冷却系の弁が22%、AC出口止め弁が15%、ACベーンが13%、AC伝熱管が12%、中間交換器が12%、MCSのACブロワが11%、MCS電磁ポンプ冷却系のブロワが10%等である。その他の機器の重要度は10%未満である。

評価ベースでは原子炉停止直後の成功基準がACS1ループの自然循環でよいとしているため、ACSの強制循環に係わる系統・機器は重要度が小さい。設備別ではACS自然循環やMCS強制循環の重要度が大きく、機器別でAC出入口ダンパやMCS電磁ポンプ冷却系の重要度が大きいことは、評価ベースではACSの強制循環への依存度が低下し、ACSの自然循環及びMCSの強制循環に依存する割合が高いことを示している。

炉心損傷発生頻度

平成4年度の評価によると、LORLの発生頻度は約 3.3×10^{-7} /炉年、ATWSは約 1.2×10^{-8} /炉年であるので、PLOHS発生頻度と合計すると炉心損傷発生頻度は約 4.8×10^{-7} /炉年となり、LORLが全体の約69%、PLOHSが全体の約29%、ATWSは約2%である。

起回事象別炉心損傷発生頻度

炉心損傷発生頻度を起回事象別に見ると、表7.2-2に示すように、3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が約53%、5番「1次MCS漏洩」が約18%、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約9%、11番「2次主冷却系漏洩」が約7%となっている。3番、15番、11番はいずれも3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できなくなる起回事象である。3番、5番はいずれも1次冷却材の漏洩であり、1次アルゴンガス系の隔離が必要となる起回事象である。

事故シーケンス別炉心損傷発生頻度

表7.2-3に炉心損傷発生頻度を事故シーケンスで整理した結果を示す。

最も発生頻度の大きい事故シーケンスは、起因事象3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」と5番「1次MCS漏洩」が発生したときに1次アルゴンガス系の隔離に失敗しLORLに至るシーケンスであり、それぞれ約40%、18%を占める。続いて、3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が発生した際に1次主冷却系循環ポンプトリップに失敗しLORLに至るシーケンスが約10%、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が発生した際に、崩壊熱除去系が機能を喪失しPLOHSに至るシーケンスが約9%を占める。

システム別炉心損傷発生頻度

表7.2-4に炉心損傷発生頻度をシステム別に整理した結果を示す。システム別では、A（1次アルゴンガス系隔離失敗）が約58%を占め最も大きく、D7（ACS1ループ強制循環・自然循環不能かつ水・蒸気系使用可能時崩壊熱除去失敗）、P（1次主冷却系循環ポンプトリップ）、D1（ACS全ループ健全時崩壊熱除去失敗）が上位を占める。

表7.1-1 評価ベースの失敗基準
水・蒸気系なし

D1 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D2 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS2ループ自然循環失敗
24~720	ACS2ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D3 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D4 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D5 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~168	ACS3ループ自然循環失敗

表7.1-2 評価ベースの失敗基準
(水・蒸気系24時間使用)

D6 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D7 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS2ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~720	ACS2ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D8 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D9 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗 かつ MCS強制循環失敗

D10 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗

表7.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率 (評価ベース)

除熱モード		崩壊熱 除去時間 [hr]	水・蒸気系を考慮していない場合		水・蒸気系を考慮した場合 (24時間)	
			崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)	崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)
D1(D6)	全ループ使用可能	0	5.2E-08	20.6	3.8E-10	41.6
		168	6.0E-08	17.8	8.4E-10	48.4
D2(D7)	補助冷却設備1ループについて強制循環、 自然循環ともに使用不可能	0	1.6E-05	7.3	1.1E-07	13.7
		720	2.2E-05	7.2	6.1E-06	49.1
D3(D8)	補助冷却設備1ループについて 強制循環のみ使用不可能	0	4.4E-08	19.9	2.5E-10	45.2
		168	5.2E-08	17.1	3.6E-10	32.2
D4	外部電源喪失	0	7.3E-08	49.4	—	—
		168	7.8E-08	46.4	—	—
D5(D10)	メンテナンス冷却系使用不可能	0	4.8E-08	19.2	3.0E-10	42.5
		168	6.3E-08	15.5	1.2E-08	47.0

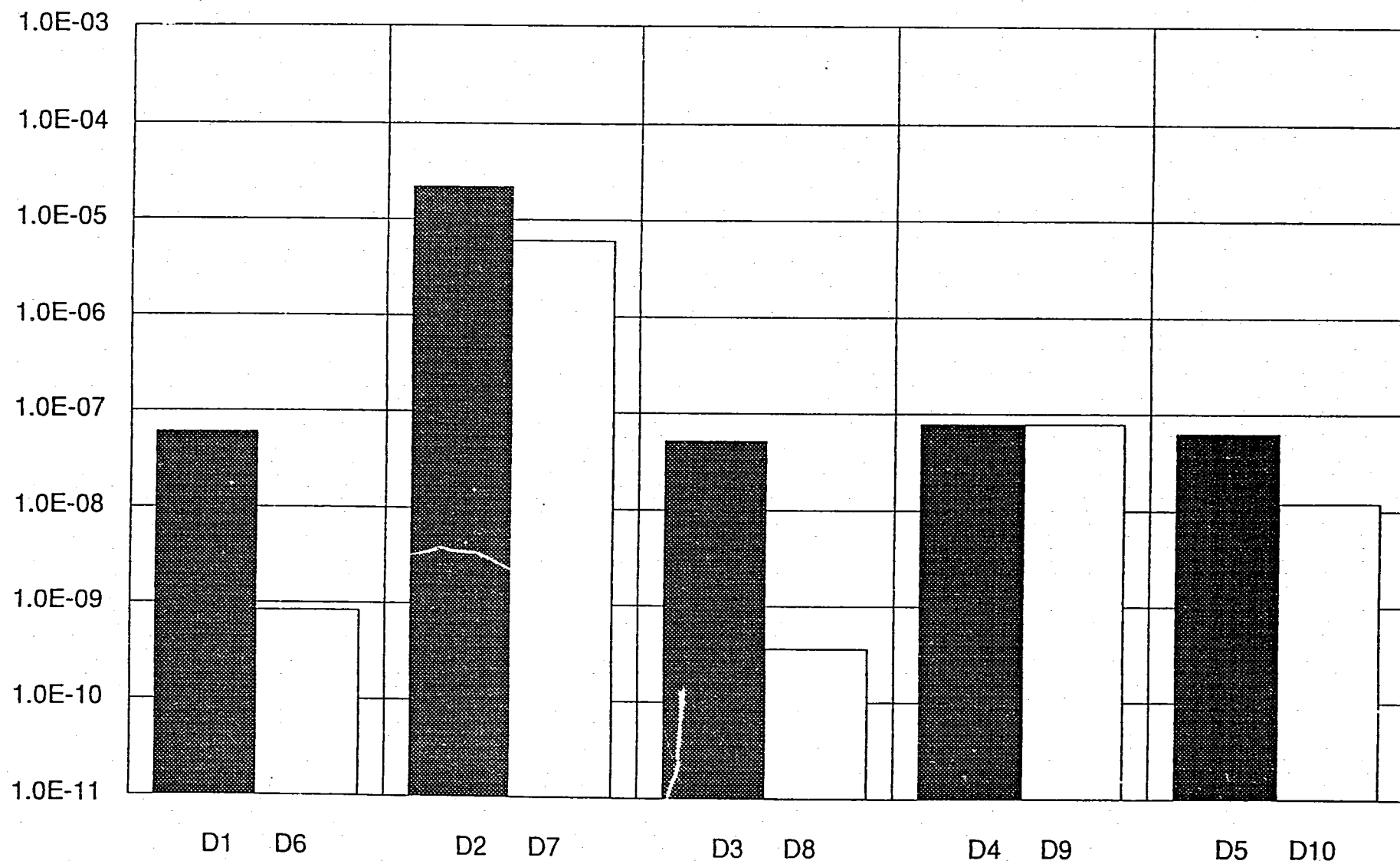
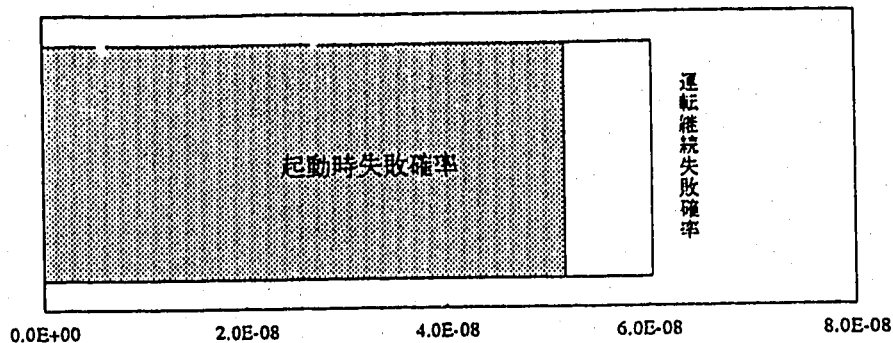
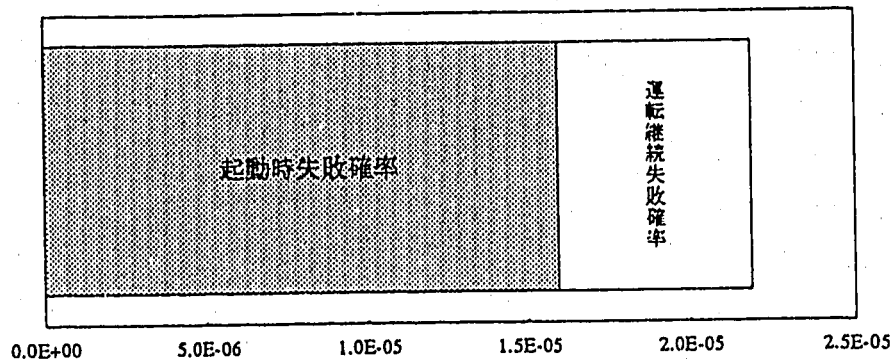


図7.1-1 各運転モードの機能喪失確率 (評価ベース)

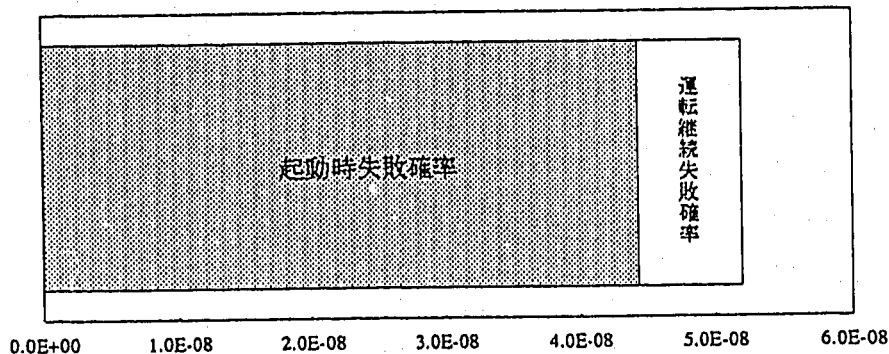
D1
全ループ使用可能



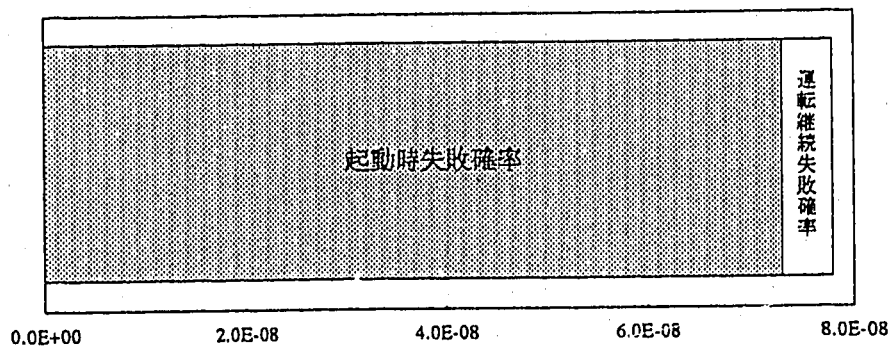
D2
補助冷却設備1ループ
について、強制循環
自然循環ともに
使用不可能



D3
補助冷却設備1ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D4
外部電源喪失



D5
メンテナンス冷却系
使用不可能

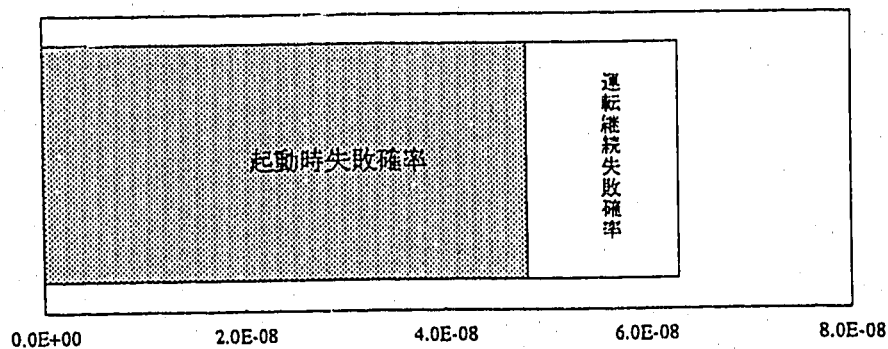
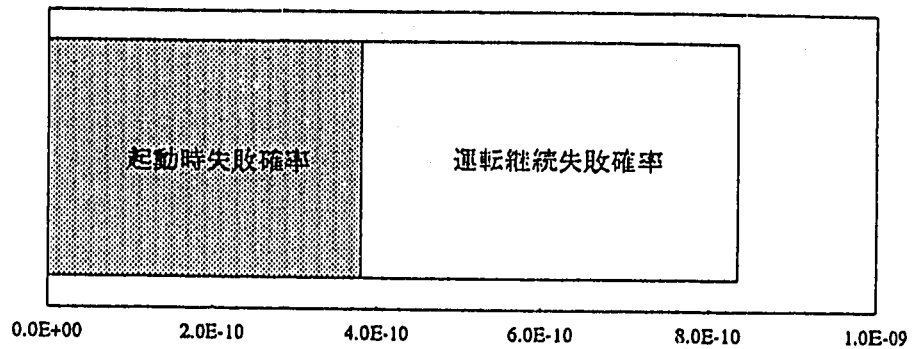


図7.1-2 崩壊熱除去機能喪失確率 (評価ベース)

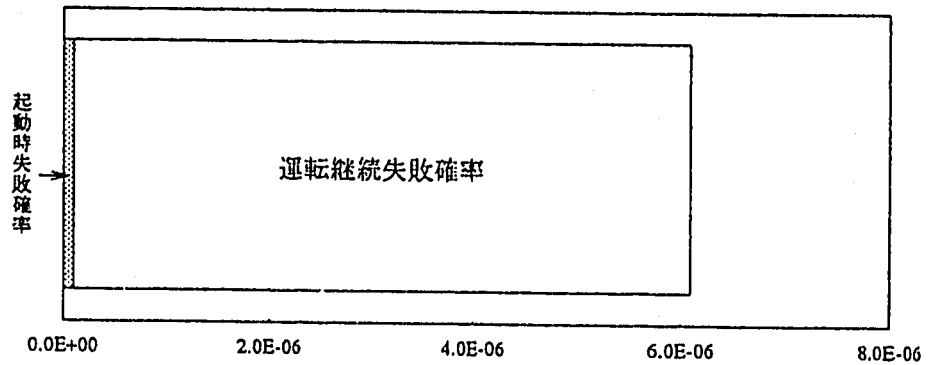
D6

全ループ使用可能



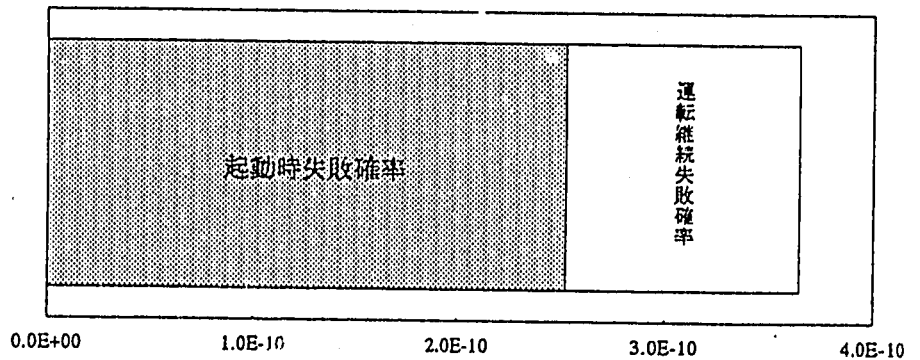
D7

補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環、
自然循環ともに
使用不可能



D8

補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D10

メンテナンス冷却系
使用不可能

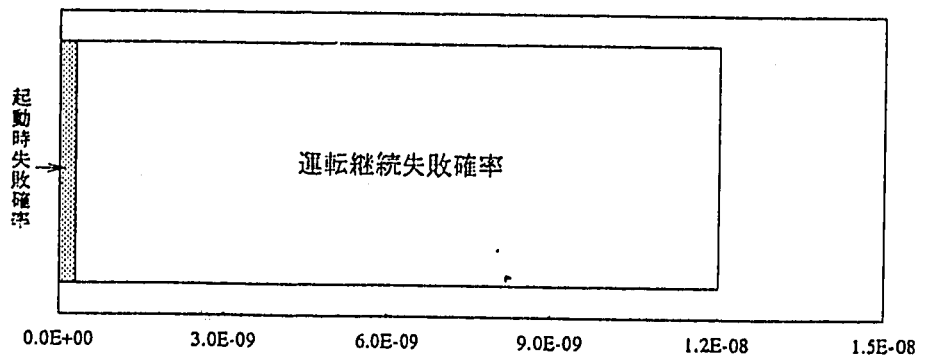


図7.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率 (評価ベース)
(水・蒸気系 24 時間利用可能な場合)

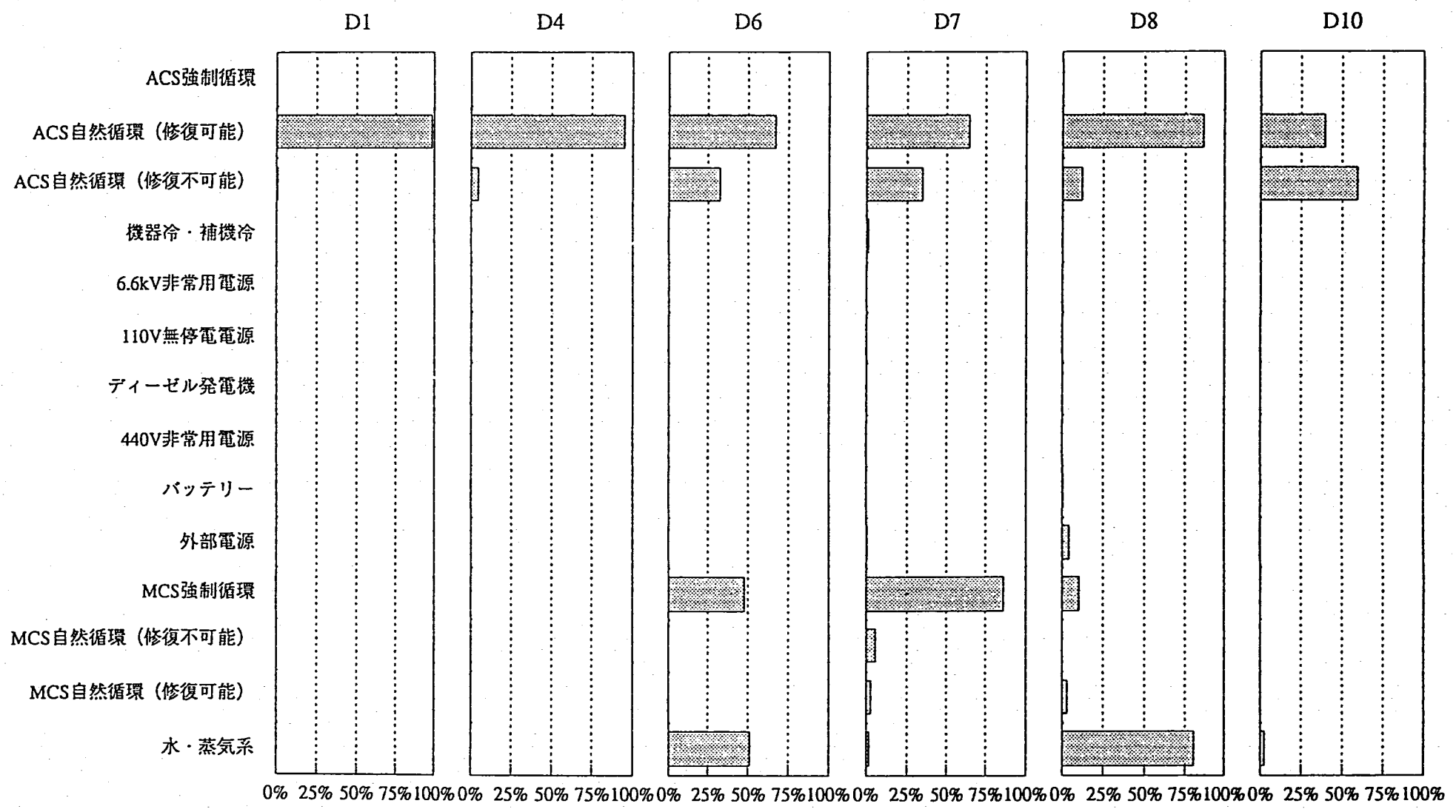


図7.1-4 崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別重要度 (評価ベース)

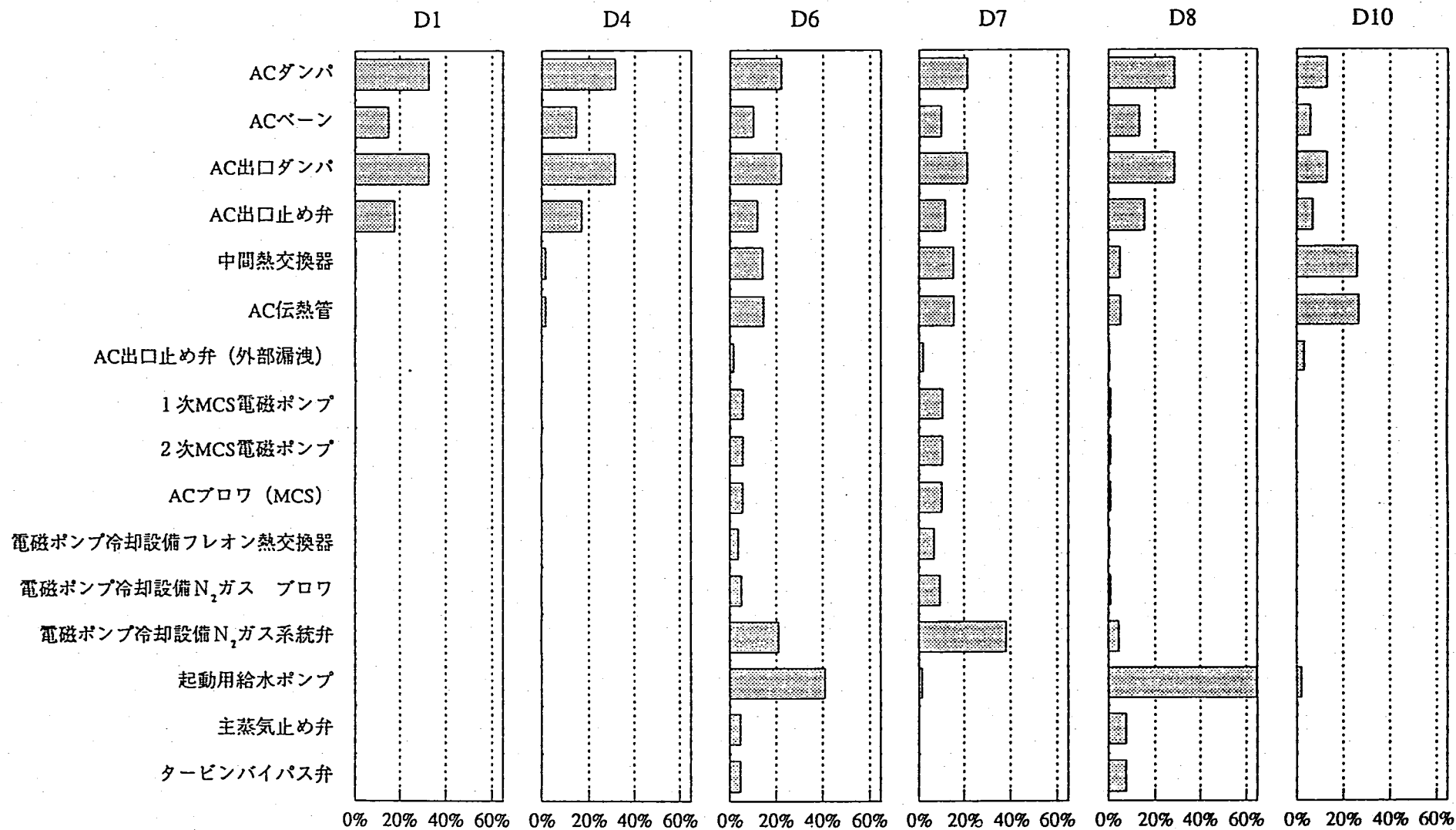


図7.1-5 崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (評価ベース)

表7.2-1 PLOHS発生頻度 (評価ベース)

絶対値

起因事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
番号	発生頻度	D1	D4	D6	D7	D8	D10	発生頻度
I01	2.8E-02	6.0E-08	7.8E-08	8.4E-10	6.1E-06	3.6E-10	1.2E-08	2.4E-11
I03	1.6E-03				9.8E-09			9.8E-09
I05	7.2E-04						8.6E-12	8.6E-12
I06	7.2E-02			6.0E-11				6.0E-11
I07	7.2E-02					2.6E-11		2.6E-11
I08	3.2E-03				2.0E-08			2.0E-08
I09	4.9E-01			4.1E-10				4.1E-10
I10	5.1E-02					1.8E-11		1.8E-11
I11	5.3E-03				3.2E-08			3.2E-08
I12	5.2E-02		4.1E-09					4.1E-09
I13	3.1E-01	1.9E-08						1.9E-08
I14	1.9E-01	1.1E-08						1.1E-08
I15	6.8E-03				4.1E-08			4.1E-08
I16	3.0E-04			2.5E-13				2.5E-13
I18	5.7E-01			4.8E-10				4.8E-10
合計	1.9E+00	3.0E-08	4.1E-09	9.7E-10	1.0E-07	4.4E-11	8.6E-12	1.4E-07

相対値

起因事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
番号	発生頻度	D1	D4	D6	D7	D8	D10	発生頻度
I01	2.8E-02	6.0E-08	7.8E-08	8.4E-10	6.1E-06	3.6E-10	1.2E-08	0.0%
I03	1.6E-03				7.1%			7.1%
I05	7.2E-04						0.0%	0.0%
I06	7.2E-02			0.0%				0.0%
I07	7.2E-02					0.0%		0.0%
I08	3.2E-03				14.1%			14.1%
I09	4.9E-01			0.3%				0.3%
I10	5.1E-02					0.0%		0.0%
I11	5.3E-03				23.4%			23.4%
I12	5.2E-02		2.9%					2.9%
I13	3.1E-01	13.5%						13.5%
I14	1.9E-01	8.3%						8.3%
I15	6.8E-03				30.0%			30.0%
I16	3.0E-04			0.0%				0.0%
I18	5.7E-01			0.3%				0.3%
合計	1.9E+00	21.7%	2.9%	0.7%	74.6%	0.0%	0.0%	100.0%

表7.2-2 起因事象別炉心損傷発生頻度 (評価ベース)

Event Tree Quantification Result

Init Event \ Accident Category	Accident Category								IE Total (/Yr)	%
	UTOP (/Yr)	UTOPULOF (/Yr)	PLOHS (/Yr)	ULOPI (/Yr)	LORL (/Yr)	ULOF (/Yr)	ULOHS (/Yr)	IE Total (/Yr)		
I01	4.3E-10	2.2E-10	2.4E-11	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7E-10	0.1	
I03	0.0	0.0	9.8E-9	4.7E-11	2.4E-7	0.0	0.0	2.5E-7	52.8	
I05	0.0	0.0	8.6E-12	1.4E-11	8.6E-8	5.9E-12	0.0	8.6E-8	18.0	
I06	0.0	0.0	6.0E-11	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	8.5E-10	0.2	
I07	0.0	0.0	2.6E-11	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	8.2E-10	0.2	
I08	0.0	0.0	2.0E-8	0.0	0.0	3.5E-11	0.0	2.0E-8	4.2	
I09	0.0	0.0	4.1E-10	0.0	0.0	6.6E-10	6.1E-11	1.1E-9	0.2	
I10	0.0	0.0	1.8E-11	0.0	0.0	6.9E-11	6.3E-12	9.3E-11	0.0	
I11	0.0	0.0	3.2E-8	0.0	0.0	7.2E-12	6.6E-13	3.2E-8	6.7	
I12	0.0	0.0	4.1E-9	0.0	0.0	7.5E-11	0.0	4.2E-9	0.9	
I13	0.0	0.0	1.9E-8	0.0	0.0	2.5E-9	5.4E-9	2.7E-8	5.6	
I14	0.0	0.0	1.1E-8	0.0	0.0	2.6E-10	2.4E-11	1.1E-8	2.4	
I15	0.0	0.0	4.1E-8	0.0	2.9E-13	5.5E-11	1.2E-10	4.1E-8	8.6	
I16	0.0	0.0	2.5E-13	0.0	0.0	2.3E-12	0.0	2.6E-12	0.0	
I18	0.0	0.0	4.8E-10	0.0	0.0	4.1E-10	0.0	8.9E-10	0.2	
Category Total (/Yr)	4.3E-10	2.2E-10	1.4E-7	6.1E-11	3.3E-7	5.7E-9	5.6E-9	4.8E-7		
Percentage (%)	0.1	0.0	28.8	0.0	68.7	1.2	1.2			

表7.2-3 事故シーケンス別炉心損傷発生頻度 (評価ベース)

Accident Sequence Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = $4.8E-7$ / Yr)

No.	Sequence Designation	Accident Category	Frequency (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)	Cumulative Frequency (/Yr)	Percentage of Cumulative Frequency (%)
1	I03-A	LORL	$1.9E-7$	39.7	$1.9E-7$	39.7
2	I05-A	LORL	$8.6E-8$	18.0	$2.8E-7$	57.6
3	I03-P	LORL	$4.8E-8$	10.0	$3.2E-7$	67.7
4	I15-D7	PLOHS	$4.1E-8$	8.6	$3.6E-7$	76.2
5	I11-D7	PLOHS	$3.2E-8$	6.7	$4.0E-7$	82.9
6	I08-D7	PLOHS	$2.0E-8$	4.2	$4.2E-7$	87.1
7	I13-D1	PLOHS	$1.9E-8$	4.0	$4.4E-7$	91.1
8	I14-D1	PLOHS	$1.1E-8$	2.3	$4.5E-7$	93.4
9	I03-D7	PLOHS	$9.8E-9$	2.0	$4.6E-7$	95.4
10	I13-SM-SB	ULOHS	$5.4E-9$	1.1	$4.6E-7$	96.5
11	I03-G	LORL	$4.8E-9$	1.0	$4.7E-7$	97.5
12	I12-D4	PLOHS	$4.1E-9$	0.9	$4.7E-7$	98.4
13	I13-/SM RM-SB	ULOF	$1.4E-9$	0.3	$4.7E-7$	98.7
14	I13-SM-/SB RB	ULOF	$8.7E-10$	0.2	$4.7E-7$	98.9
15	I18-D6	PLOHS	$4.8E-10$	0.1	$4.7E-7$	99.0
16	I06-/SM RM-SB	ULOF	$4.5E-10$	0.1	$4.7E-7$	99.1
17	I07-/SM RM-SB	ULOF	$4.5E-10$	0.1	$4.7E-7$	99.2
18	I01-SM-SB	UTOP	$4.3E-10$	0.1	$4.8E-7$	99.2
19	I18-RM-RB	ULOF	$4.1E-10$	0.1	$4.8E-7$	99.3
20	I09-D6	PLOHS	$4.1E-10$	0.1	$4.8E-7$	99.4

表7.2-4 システム別炉心損傷発生頻度 (評価ベース)

USC Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = $4.8E-7$ / Yr)

No.	USC Designation	Probability of USC (before recovery)	Probability of USC (after recovery)	Frequency of Core Melt (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)
1	A	$1.2E-4$	$1.2E-4$	$2.8E-7$	57.7
2	D7	$6.1E-6$	$6.1E-6$	$1.0E-7$	21.5
3	P	$3.0E-5$	$3.0E-5$	$4.8E-8$	10.0
4	D1	$6.0E-8$	$6.0E-8$	$3.0E-8$	6.3
5	SB	$1.7E-4$	$6.1E-6$	$9.3E-9$	1.9
6	SM	$1.5E-4$	$2.0E-5$	$8.0E-9$	1.7
7	G	$3.0E-6$	$3.0E-6$	$4.8E-9$	1.0
8	D4	$7.8E-8$	$7.8E-8$	$4.1E-9$	0.9
9	/SM RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$3.6E-9$	0.8
10	/SB RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$2.3E-9$	0.5
11	D6	$8.4E-10$	$8.4E-10$	$9.7E-10$	0.2
12	RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$4.1E-10$	0.1
13	RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$4.1E-10$	0.1
14	D8	$3.6E-10$	$3.6E-10$	$4.4E-11$	0.0
15	D0	$1.2E-8$	$1.2E-8$	$8.6E-12$	0.0
16	W	$1.4E-4$	$1.4E-4$	$6.2E-12$	0.0
17	T	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$3.5E-13$	0.0
18	C	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$9.2E-15$	0.0

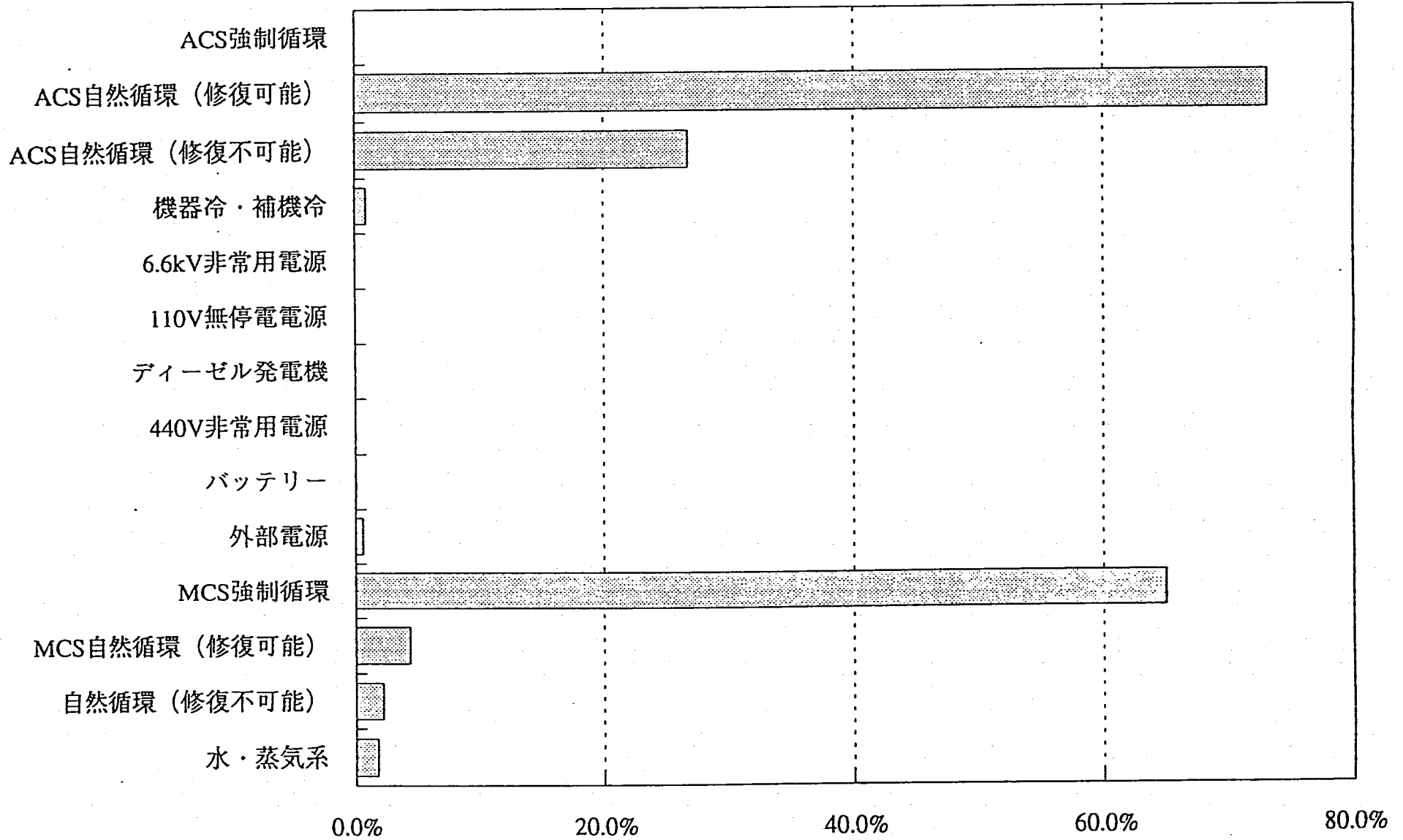


図7.2-1 PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (評価ベース)

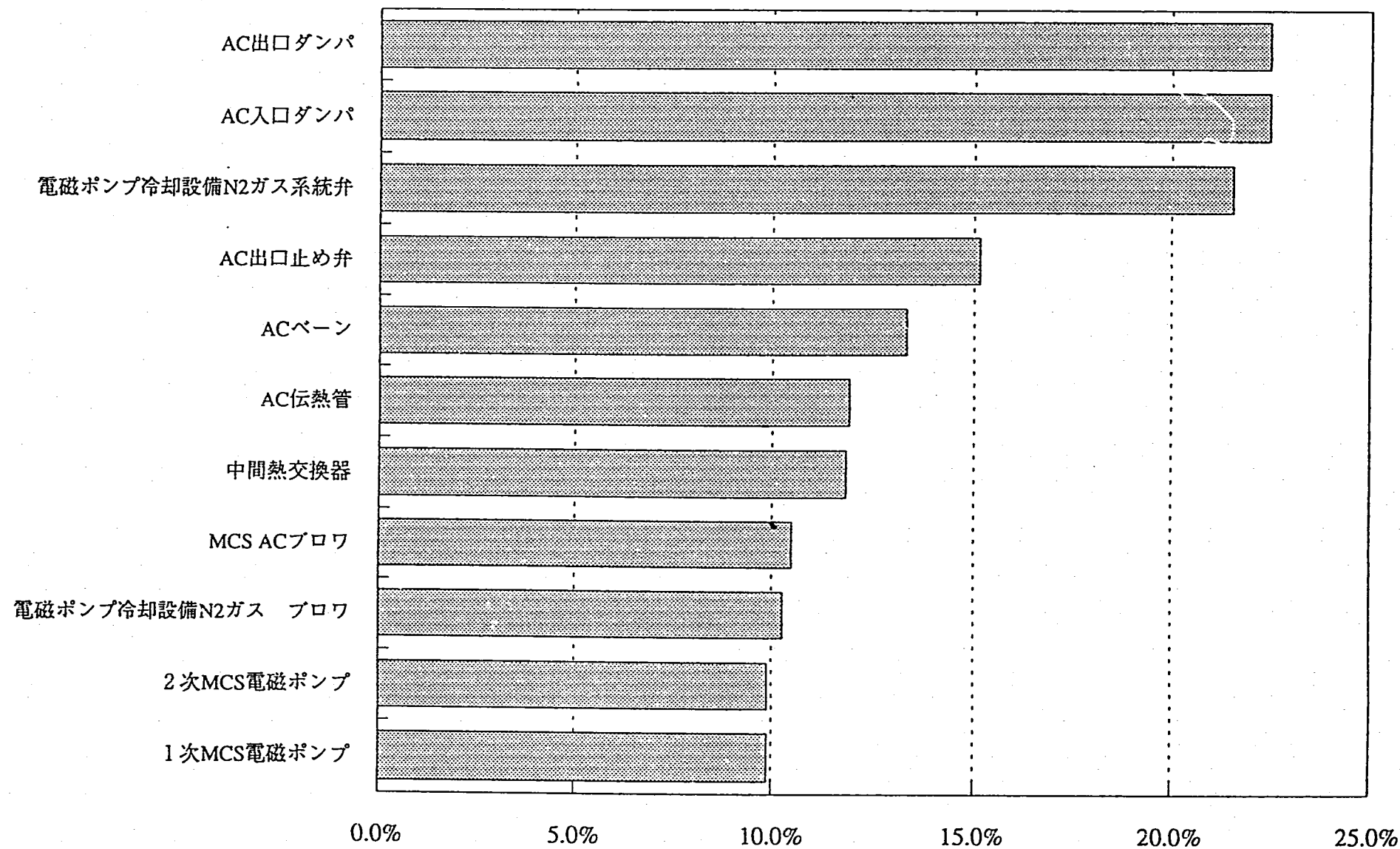


図7.2-2 PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (評価ベース)

8. 感度解析ケースの評価結果

設計ベースでは、メンテナンス冷却系（MCS）は炉停止24時間後から強制循環除熱モードにより単独で除熱可能となっている。ここでは、MCSが炉停止直後から利用可能であるとした場合を考える。MCSの除熱容量は、補助冷却設備（ACS）1系統の容量と等しいとし、強制循環除熱モードに加えて自然循環除熱も可能であると仮定した。なお、ACSの除熱容量は設計ベースと全く同じであるとした。

8.1 崩壊熱除去機能喪失確率評価

起因事象によって崩壊熱除去系として使用できるループ数並びに循環モードが異なるので、崩壊熱除去系の運転モードを、水・蒸気系が使用できない場合のD1からD5の5つのモードとこれらに対応して水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の合計10個のモードに分類した。表8.1-1と表8.1-2に各運転モードの失敗基準を示す。水・蒸気系単独で崩壊熱が除去できる時間を原子炉停止後24時間以内とした。

表8.1-1と表8.1-2に示す失敗基準に基づき計算した各運転モードの崩壊熱除去機能喪失確率を表8.1-3にまとめて示す。表8.1-3では、各々のモード毎の崩壊熱除去機能喪失確率（/demand）について、時刻0hrに対応するもの（即ち崩壊熱除去系の起動時失敗確率）と、累積故障確率（起動時失敗確率+運転継続失敗確率）とが示してある。なお、機能喪失確率の値はモンテカルロ法を用いたフェイズドミッション解析コードにより計算を行なったものであり、統計的処理に基づくバラツキを有している。このバラツキの程度を示す指標として、F.S.D.（Fractional Standard Deviation）の値を得られた結果と共に表8.1-3に示した。図8.1-1にはD1からD10までの10のモードの崩壊熱除去機能喪失確率を示す。また、図8.1-2及び図8.1-3には各運転モードの起動時失敗確率と運転継続失敗確率を示す。

水・蒸気系が使用できない場合のD1からD5の5つのモードを機能喪失確率の小さい順に並べると、 $D1 < D4 < D3 < D5 < D2$ となる。ACSの全ループとMCSが崩壊熱除去に使用できるD1の機能喪失確率は約 4.9×10^{-9} である。外部電源が喪失し、ディーゼル発電機が正常に起動しないと強制循環除熱ができないD4も、MCSに自然循環能力があるために機能喪失確率は約 1.6×10^{-8} と小さい。ACSの1ループが強制循環のみ使用できないD3の機能喪失確率は約 3.4×10^{-7} である。機能喪失確率が相対的に大きいのは、MCSが使用できないD5の約 6.3×10^{-7} とACS1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないD2の約 1.0×10^{-6} である。D2は使命時間を長く設定してあるので、アンリライアビリティの寄与が大きい。

水・蒸気系が使用できる場合のD6からD10の5つのモードをその機能喪失確率の小さい順に並べると、 $D6 < D8 < D10 < D9 < D7$ となる。ACS全ループとMCSに加えて水・蒸

気系も原子炉停止直後から崩壊熱除去に使用できるD6の機能喪失確率は約 8.4×10^{-11} と極めて小さくなった。ACS1ループが強制循環に使用できないD8でもその機能喪失確率は約 3.0×10^{-9} である。MCSが使用できないD10は原子炉停止後24時間以降のアンリライアビリティが大きく、機能喪失確率は約 1.3×10^{-8} である。外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので、D9の機能喪失確率はD4と同一である。D7の機能喪失確率は約 5.1×10^{-7} である。

また、同じ起因事象に対応する運転モードを水・蒸気系使用の有無で比較すると（図8.1-1）、D6の機能喪失確率はD1の約58分の1である。次にD2とD7を比較すると、D7の機能喪失確率はD2の約2分の1であり、水・蒸気系の効果が小さい。これは水・蒸気系で崩壊熱を除去するためには、3ループある主冷却系のうち少なくとも1ループが強制循環をしている必要があるが、この運転モードの起因事象は、ACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないためである。D8の機能喪失確率はD3の約110分の1である。D9とD4は、外部電源喪失の場合には水・蒸気系は使用できないとしたので条件が全く同じであり機能喪失確率も同じである。最後にD10はD5の約48分の1である。

崩壊熱除去系機能喪失確率に対する設備別及び機器別重要度

各運転モードに対する設備別重要度を図8.1-4に、機器別重要度を図8.1-5に示す。

D1

本運転モードは、ACSは3ループとも使用可能であるが、起因事象により水・蒸気系が使用できない場合である。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が63%、MCSFC（MCS強制循環機能喪失）及びMCSFNRC（MCS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が50%、FC（ACS強制循環機能喪失）が30%である。

機器別重要度は、である。

D4

本運転モードは、起因事象が外部電源喪失であり、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用できない場合である。電源が喪失してもACSの自然循環は可能であるが、強制循環を行うためにはDGが必要なのでDG関係の機器の需要度が大きくなる。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が54%、MCSFNRC（MCS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が51%、MCSFC（MCS強制循環機能喪失）が33%、DG（ディーゼル発電機）が32%、FC（ACS強制循環機能喪失）が17%である。

機器別重要度は、MCSのAC出入口ダンパ各21%、ACSのAC出入口ダンパ各18%、MCS電磁ポンプ冷却系の弁14%等である。

D6

D9を除くD6からD10までの4つのモードは、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用可能な場合である。

D6に対する設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が64%、MCSFNRR（MCS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が50%、WSSS（水・蒸気系）が38%等である。

D6に対する機器別重要度は、起動用給水ポンプ31%、MCSのAC出入口ダンパ各24%、ACSのAC出入口ダンパ各21%等である。

D7

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できない場合である。本モードのみ使命時間を720時間（他のモードは168時間）としているため、静的機器の故障の重要度も上位にでてきている。

設備別重要度は、MCSFNRR（MCS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が76%、FNRR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が48%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が33%、MCSFNRC（MCS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が22%である。

機器別重要度は、MCSのAC出入口ダンパ各36%、AC伝熱管22%、中間交換器21%である。

D8

本モードは起因事象によりACSの1ループが強制循環に使用できない場合である。なお、自然循環は可能である。

設備別重要度は、MCSFNRC（MCS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が80%、WSSS（水・蒸気系）が54%、FC（ACS強制循環機能喪失）が47%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が43%である。

機器別重要度は、起動用給水ポンプ44%、MCSのAC出入口ダンパ各33%、1次・2次ポニーモータ各17%等である。

D10

本モードは起因事象によりMCSが崩壊熱除去系として使用できない場合である。MCSが使用できないので原子炉停止後24時間以上経過したのちは、ACSの自然循環で崩壊熱除去を行うことになるので、その重要度が大きくなる。

設備別重要度は、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））40%、FNRR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））36%、WSSS（水・蒸気系）30%、FC（ACS強制循環機能喪失）24%である。

機器別重要度は、起動用給水ポンプ24%、AC伝熱管16%、中間交換器16%、AC出入口ダンパ各13%、1次・2次ポニーモータ各9%である。

8.2 事故シーケンス評価

事故シーケンスの定量化は、イベントツリー解析で同定された事故シーケンスに、起因事象で求めた起因事象の発生頻度と、各設備の機能喪失確率を適用して行う。

PLOHS発生頻度

定量結果を起因事象及び運転モード別にまとめた結果を表8.2-1に示す。その結果、PLOHSの発生頻度が約 1.2×10^{-8} /炉年と評価された。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約28%、11番「2次主冷却系漏洩」が約22%、8番「1次主冷却系逆止弁誤閉」が約13%、13番「給水流量喪失」が約12%を占めている。これらの起因事象のうち8番、11番、15番は崩壊熱除去系の運転モードがいずれもD7の起因事象である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約70%、D1が約20%を占めている。D7は3ループあるACSのうち1ループが強制循環にも自然循環にも使用できないモードであり、D7の機能喪失確率が他の運転モードに比べて相対的に大きいため上位を占めている。

PLOHS発生頻度に対する設備別及び機器別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度を図8.2-1に、機器別重要度を図8.2-2に示す。

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度

PLOHS発生頻度に対する設備別重要度は、MCSFNRR（MCS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が53%、FNRC（ACS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が41%、FNNR（ACS自然循環機能喪失（修復不可能な事象））が34%、MCSFNRC（MCS自然循環機能喪失（修復可能な事象））が31%等である。ACS、MCSの強制循環失敗がこれらに続く。

PLOHS発生頻度に対する機器別重要度

MCSのAC伝熱管25%、MCSの中間交換器25%、ACSのAC伝熱管15%、ACSの中間交換器15%、ACSのAC出入口ダンパが各13%、MCSのAC出入口ダンパが各12%等である。その他の機器の重要度は10%未満である。

感度解析ケースではMCSがACS1ループと同等の助熱能力を有しており、自然循環も可能としている。設備別重要度でACS及びMCSの自然循環失敗が上位にきており、強制循環失敗の重要度が相対的に小さく、依存度が低いことを示している。

炉心損傷発生頻度

平成4年度の評価によると、LORLの発生頻度は約 3.3×10^{-7} /炉年、ATWSは約 $1.2 \times$

10^8 /炉年であるので、PLOHS発生頻度と合計すると炉心損傷発生頻度は約 3.5×10^7 /炉年となり、LORLが全体の約93%、PLOHSが約4%、ATWSが約3%となる。

起因事象別炉心損傷発生頻度

起因事象別に見ると、表8.2-2に示すように、3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が約69%、5番「1次MCS漏洩」が約24%となっている。3番、5番はいずれも1次冷却材の漏洩であり、1次アルゴンガス系の隔離が必要となる起因事象である。

事故シーケンス別炉心損傷発生頻度

表8.2-3に炉心損傷発生頻度を事故シーケンスで整理した結果を示す。

最も発生頻度の大きい事故シーケンスは、起因事象3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」と5番「1次MCS漏洩」が発生したときに1次アルゴンガス系の隔離に失敗しLORLに至るシーケンスであり、それぞれ約54%、24%を占める。続いて大きいのは、3番「1次主冷却系漏洩（ガードベッセル内）」が発生した時にP（1次主冷却系循環ポンプトリップ）に失敗するシーケンスで約14%である。これらはいずれもLORLに至るシーケンスであり、この3つで全体の約93%を占める。

システム別炉心損傷発生頻度

表8.2-4に炉心損傷発生頻度をシステム別に整理した結果を示す。システム別では、A（1次アルゴンガス系隔離失敗）が約78%、P（1次主冷却系循環ポンプトリップ）が約14%でこの2つで全体の約92%を占める。

表8.1-1 感度解析ケースの失敗基準
水・蒸気系なし

D1 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS3ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗
1~168	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D2 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS2ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS1ループまたはMCS)自然循環失敗
1~720	(ACS2ループ+MCS)自然循環失敗

D3 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS2ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗
1~168	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D4 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS3ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗
1~168	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D5 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗
1~168	ACS3ループ自然循環失敗

表8.1-2 感度解析ケースの失敗基準
(水・蒸気系24時間使用)

D6 全ループ使用可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS3ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D7 1ループについて強制循環、自然循環両方とも利用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS2ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS1ループまたはMCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	(ACS2ループ+MCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~720	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D8 1ループについて強制循環のみ使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS2ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	(ACS2ループ+MCS)自然循環失敗

D9 外部電源喪失事象

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	(ACS3ループ+MCS)強制循環失敗 かつ (ACS2ループまたはACS1ループ+MCS)自然循環失敗
1~168	(ACS3ループ+MCS)自然循環失敗

D10 MCS使用不可能

炉停止後時間 (hr)	失敗基準
0~1	ACS3ループ強制循環失敗 かつ ACS1ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
1~24	ACS3ループ自然循環失敗 かつ 水・蒸気系失敗
24~168	ACS3ループ自然循環失敗

表8.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率（感度解析ケース）

除熱モード		崩壊熱 除去時間 [hr]	水・蒸気系を考慮していない場合		水・蒸気系を考慮した場合（24時間）	
			崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)	崩壊熱除去機能喪失確率 [/demand]	FSD (%)
D1(D6)	全ループ使用可能	0	4.3E-09	9.6	3.5E-11	17.9
		168	4.9E-09	8.7	8.4E-11	45.2
D2(D7)	補助冷却設備1ループについて強制循環、 自然循環ともに使用不可能	0	7.2E-07	4.8	9.6E-08	19.0
		720	1.0E-06	9.1	5.1E-07	47.2
D3(D8)	補助冷却設備1ループについて 強制循環のみ使用不可能	0	3.2E-07	7.1	2.6E-09	11.2
		168	3.4E-07	6.8	3.0E-09	10.3
D4	外部電源喪失	0	1.5E-08	12.5	—	—
		168	1.6E-08	12.0	—	—
D5(D10)	メンテナンス冷却系使用不可能	0	5.6E-07	4.2	5.1E-09	7.1
		168	6.3E-07	4.0	1.3E-08	17.2

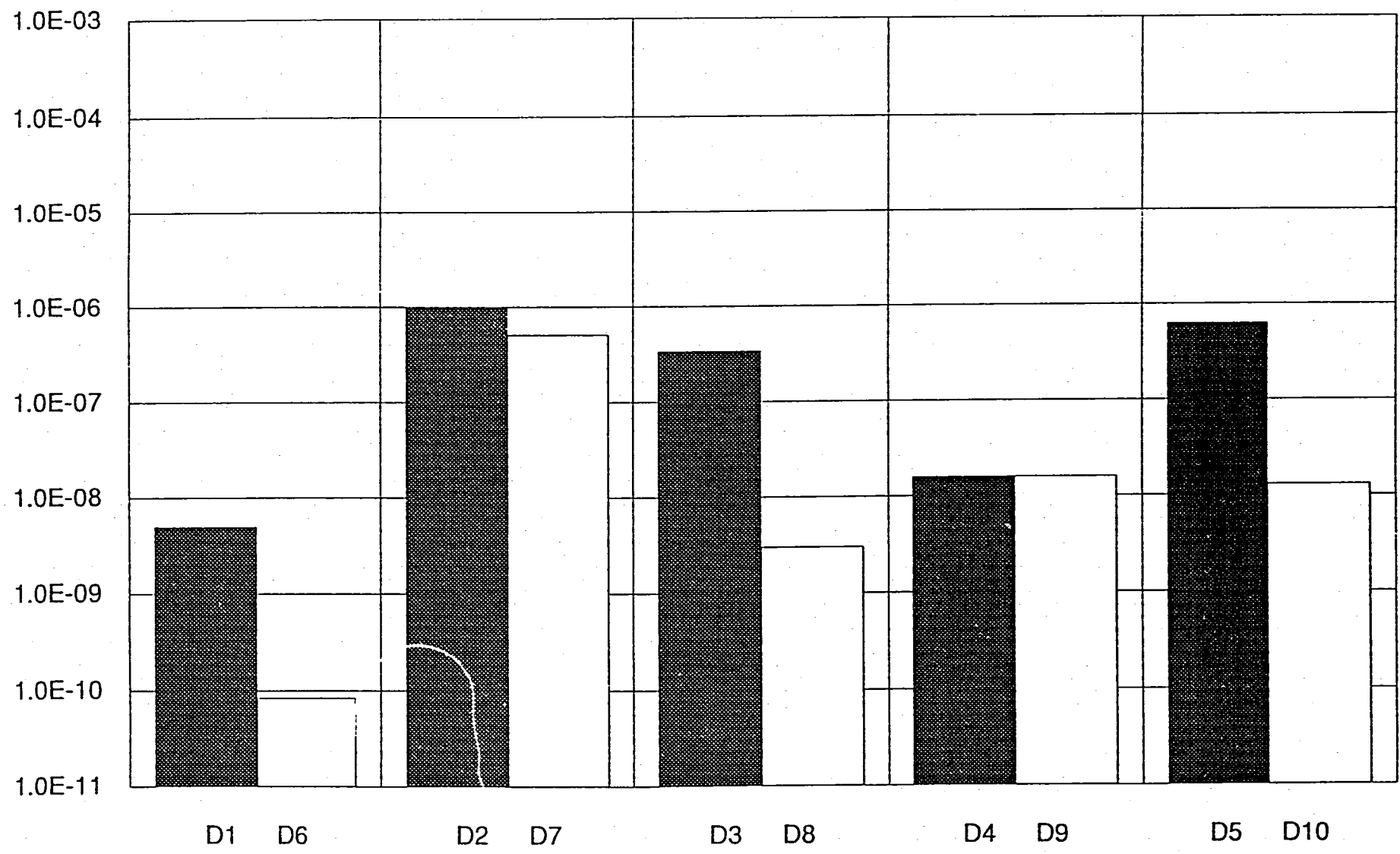
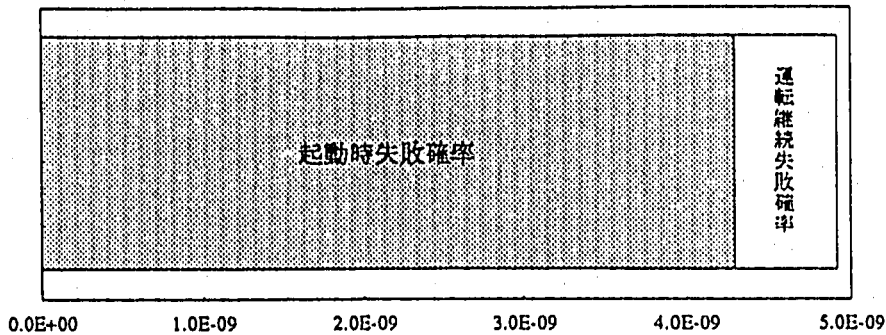
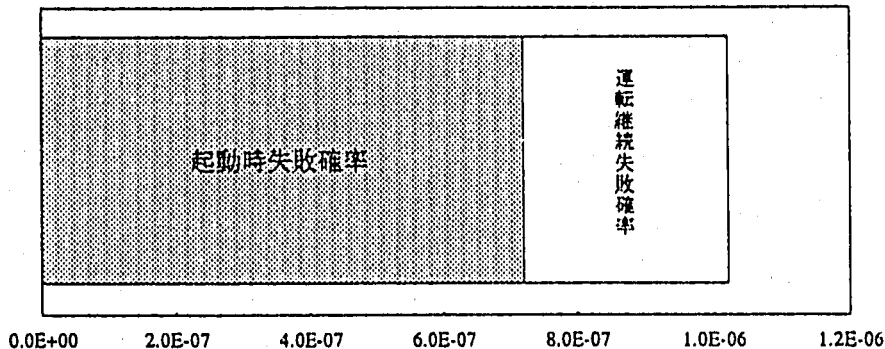


図8.1-1 各運転モードの機能喪失確率（感度解析ケース）

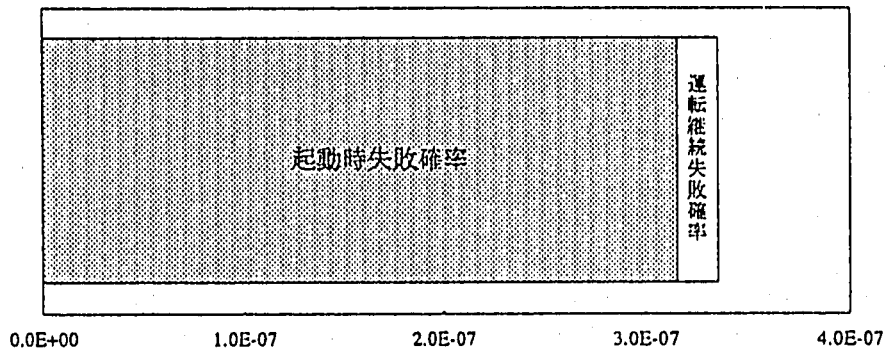
D1
全ループ使用可能



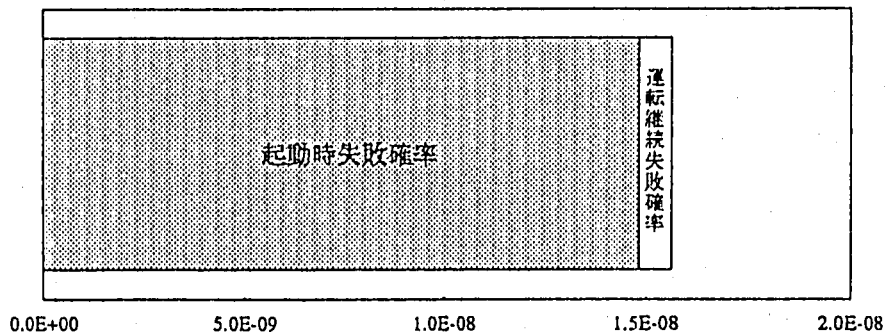
D2
補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環
自然循環ともに
使用不可能



D3
補助冷却設備 1 ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D4
外部電源喪失



D5
メンテナンス冷却系
使用不可能

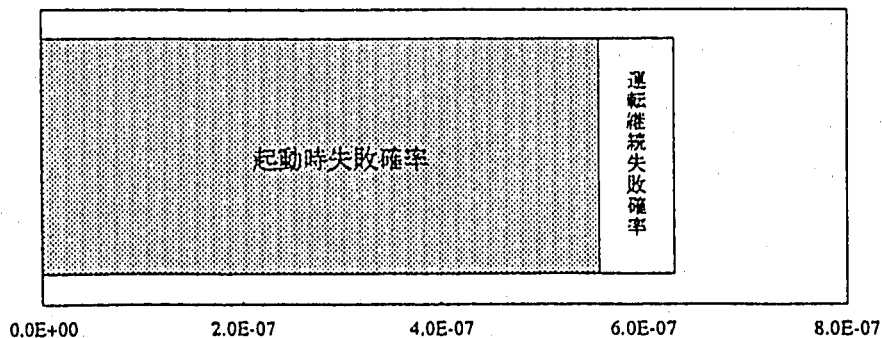
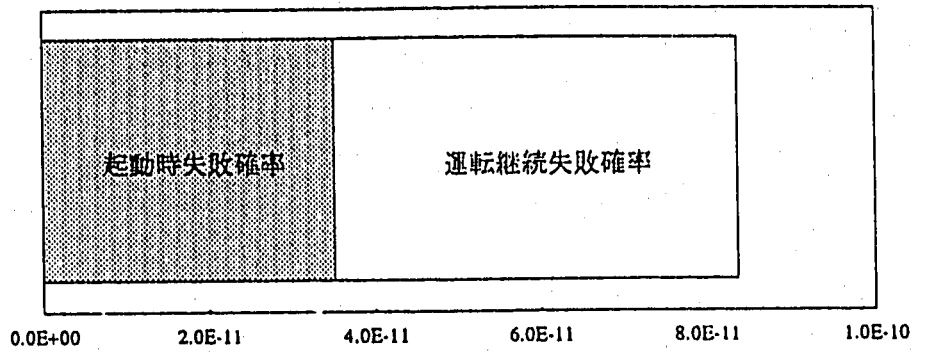
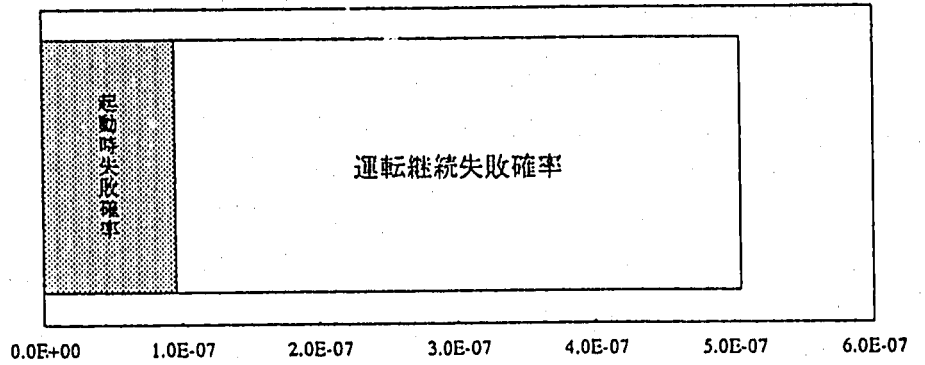


図8.1-2 崩壊熱除去機能喪失確率 (感度解析ケース)

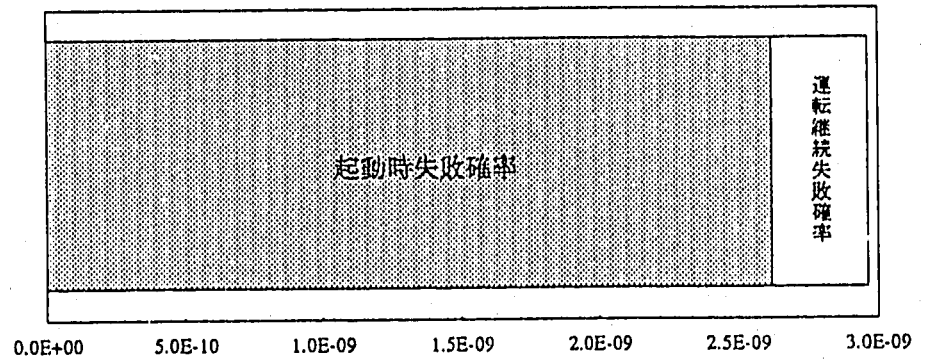
D6
全ループ使用可能



D7
補助冷却設備1ループ
について、強制循環、
自然循環ともに
使用不可能



D8
補助冷却設備1ループ
について、強制循環
のみ使用不可能



D10
メンテナンス冷却系
使用不可能

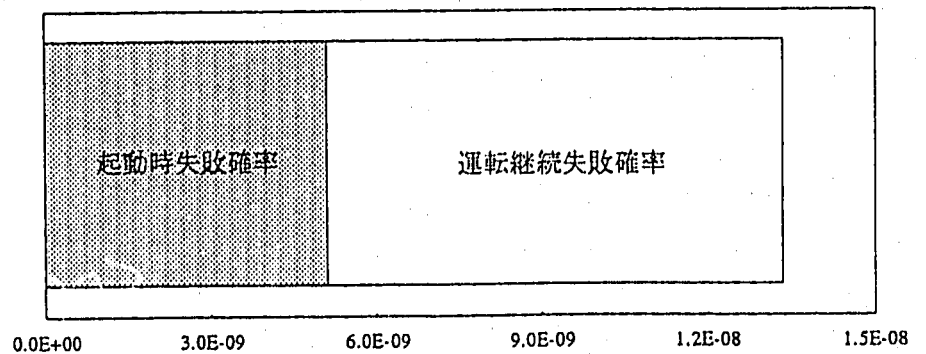


図8.1-3 崩壊熱除去機能喪失確率 (感度解析ケース)
(水・蒸気系24時間利用可能な場合)

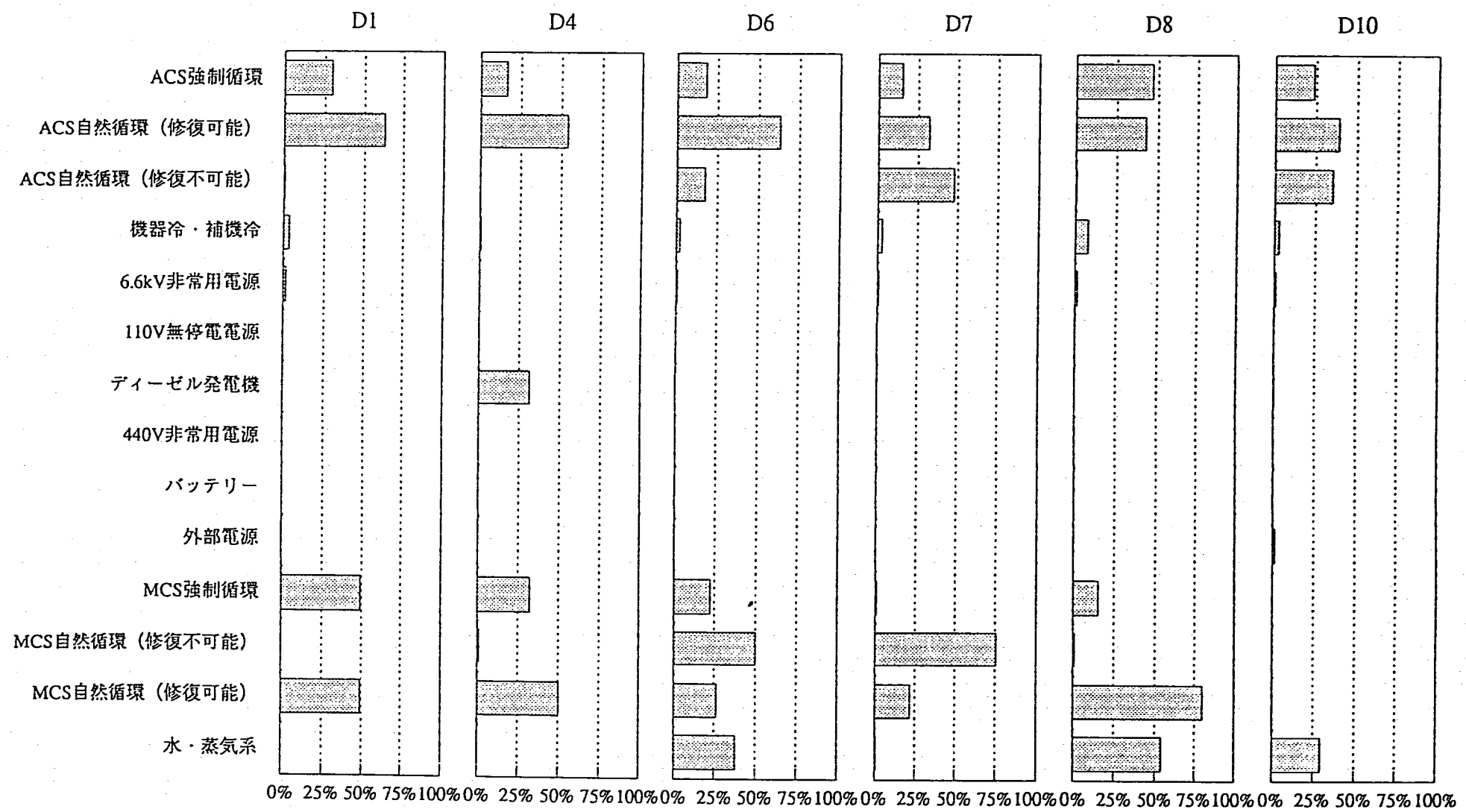


図8.1-4 崩壊熱除去機能喪失確率に対する設備別別重要度 (感度解析ケース)

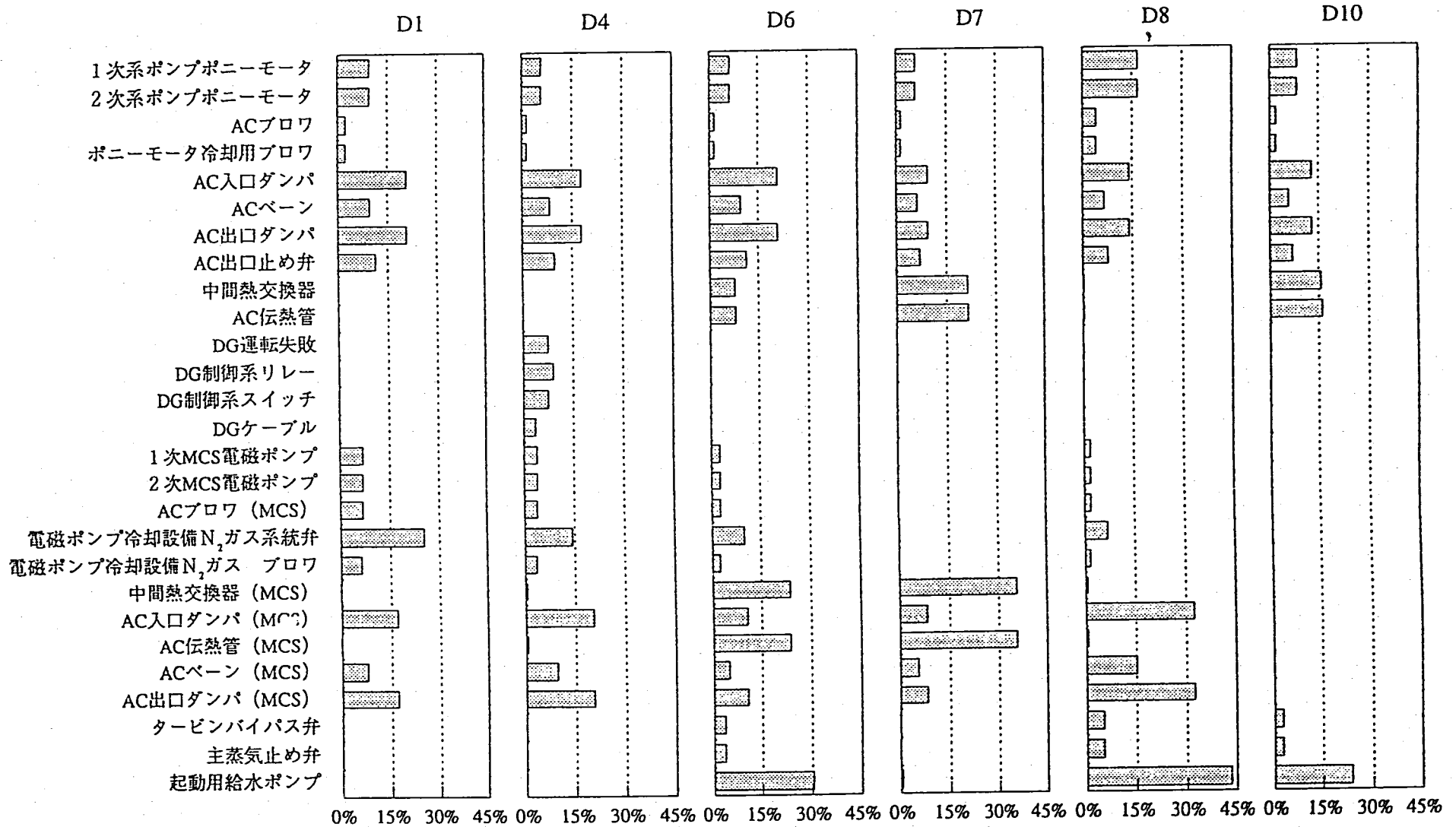


図8.1-5 崩壊熱除去機能喪失確率に対する機器別重要度 (感度解析ケース)

表8.2-1 PLOHS発生頻度（感度解析ケース）

絶対値

起回事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
番号	発生頻度	D1	D4	D6	D7	D8	D10	発生頻度
I01	2.8E-02	4.9E-09	1.6E-08	8.4E-11	5.1E-07	3.0E-09	1.3E-08	2.4E-12
I03	1.6E-03				8.2E-10			8.2E-10
I05	7.2E-04						9.4E-12	9.4E-12
I06	7.2E-02			6.0E-12				6.0E-12
I07	7.2E-02					2.2E-10		2.2E-10
I08	3.2E-03				1.6E-09			1.6E-09
I09	4.9E-01			4.1E-11				4.1E-11
I10	5.1E-02					1.5E-10		1.5E-10
I11	5.3E-03				2.7E-09			2.7E-09
I12	5.2E-02		8.3E-10					8.3E-10
I13	3.1E-01	1.5E-09						1.5E-09
I14	1.9E-01	9.3E-10						9.3E-10
I15	6.8E-03				3.5E-09			3.5E-09
I16	3.0E-04			2.5E-14				2.5E-14
I18	5.7E-01			4.8E-11				4.8E-11
合計	1.9E+00	2.5E-09	8.3E-10	9.7E-11	8.6E-09	3.7E-10	9.4E-12	1.2E-08

相対値

起回事象		崩壊熱除去系運転モード						PLOHS
番号	発生頻度	D1	D4	D6	D7	D8	D10	発生頻度
I01	2.8E-02			0.0%				0.0%
I03	1.6E-03				6.6%			6.6%
I05	7.2E-04						0.1%	0.1%
I06	7.2E-02			0.0%				0.0%
I07	7.2E-02					1.7%		1.7%
I08	3.2E-03				13.2%			13.2%
I09	4.9E-01			0.3%				0.3%
I10	5.1E-02					1.2%		1.2%
I11	5.3E-03				21.8%			21.8%
I12	5.2E-02		6.7%					6.7%
I13	3.1E-01	12.3%						12.3%
I14	1.9E-01	7.5%						7.5%
I15	6.8E-03				28.0%			28.0%
I16	3.0E-04			0.0%				0.0%
I18	5.7E-01			0.4%				0.4%
合計	1.9E+00	19.8%	6.7%	0.8%	69.6%	3.0%	0.1%	100.0%

表8.2-2 起回事象別炉心損傷発生頻度 (感度解析ケース)

Event Tree Quantification Result

Init Event \ Accident Category	Accident Category								IE Total (/Yr)	%
	UTOP (/Yr)	UTOPULOF (/Yr)	PLOHS (/Yr)	ULOPI (/Yr)	LORL (/Yr)	ULOF (/Yr)	ULOHS (/Yr)	IE Total (/Yr)		
I01	4.3E-10	2.2E-10	2.4E-12	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5E-10	0.2	
I03	0.0	0.0	8.2E-10	4.7E-11	2.4E-7	0.0	0.0	2.4E-7	69.0	
I05	0.0	0.0	9.4E-12	1.4E-11	8.6E-8	5.9E-12	0.0	8.6E-8	24.4	
I06	0.0	0.0	6.0E-12	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	8.0E-10	0.2	
I07	0.0	0.0	2.2E-10	0.0	0.0	7.9E-10	0.0	1.0E-9	0.3	
I08	0.0	0.0	1.6E-9	0.0	0.0	3.5E-11	0.0	1.6E-9	0.5	
I09	0.0	0.0	4.1E-11	0.0	0.0	6.6E-10	6.1E-11	7.6E-10	0.2	
I10	0.0	0.0	1.5E-10	0.0	0.0	6.9E-11	6.3E-12	2.3E-10	0.1	
I11	0.0	0.0	2.7E-9	0.0	0.0	7.2E-12	6.6E-13	2.7E-9	0.8	
I12	0.0	0.0	8.3E-10	0.0	0.0	7.5E-11	0.0	9.1E-10	0.3	
I13	0.0	0.0	1.5E-9	0.0	0.0	2.5E-9	5.4E-9	9.4E-9	2.7	
I14	0.0	0.0	9.3E-10	0.0	0.0	2.5E-10	2.4E-11	1.2E-9	0.3	
I15	0.0	0.0	3.5E-9	0.0	2.9E-13	5.5E-11	1.2E-10	3.7E-9	1.0	
I16	0.0	0.0	2.5E-14	0.0	0.0	2.3E-12	0.0	2.4E-12	0.0	
I18	0.0	0.0	4.8E-11	0.0	0.0	4.1E-10	0.0	4.6E-10	0.1	
Category Total (/Yr)	4.3E-10	2.2E-10	1.2E-8	6.1E-11	3.3E-7	5.7E-9	5.6E-9	3.5E-7		
Percentage (%)	0.1	0.1	3.5	0.0	93.1	1.6	1.6			

表8.2-3 事故シーケンス別炉心損傷発生頻度 (感度解析ケース)

Accident Sequence Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = $3.5E-7$ / Yr)

No.	Sequence Designation	Accident Category	Frequency (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)	Cumulative Frequency (/Yr)	Percentage of Cumulative Frequency (%)
1	I03-A	LORL	$1.9E-7$	53.8	$1.9E-7$	53.8
2	I05-A	LORL	$8.6E-8$	24.3	$2.8E-7$	78.1
3	I03-P	LORL	$4.8E-8$	13.6	$3.2E-7$	91.7
4	I13-SM-SB	ULOHS	$5.4E-9$	1.5	$3.3E-7$	93.3
5	I03-G	LORL	$4.8E-9$	1.4	$3.3E-7$	94.6
6	I15-D7	PLOHS	$3.5E-9$	1.0	$3.4E-7$	95.6
7	I11-D7	PLOHS	$2.7E-9$	0.8	$3.4E-7$	96.4
8	I08-D7	PLOHS	$1.6E-9$	0.5	$3.4E-7$	96.8
9	I13-D1	PLOHS	$1.5E-9$	0.4	$3.4E-7$	97.3
10	I13-/SM RM-SB	ULOF	$1.4E-9$	0.4	$3.4E-7$	97.7
11	I14-D1	PLOHS	$9.3E-10$	0.3	$3.5E-7$	97.9
12	I13-SM-/SB RB	ULOF	$8.7E-10$	0.2	$3.5E-7$	98.2
13	I12-D4	PLOHS	$8.3E-10$	0.2	$3.5E-7$	98.4
14	I03-D7	PLOHS	$8.2E-10$	0.2	$3.5E-7$	98.6
15	I07-/SM RM-SB	ULOF	$4.5E-10$	0.1	$3.5E-7$	98.8
16	I06-/SM RM-SB	ULOF	$4.5E-10$	0.1	$3.5E-7$	98.9
17	I01-SM-SB	UTOP	$4.3E-10$	0.1	$3.5E-7$	99.0
18	I18-RM-RB	ULOF	$4.1E-10$	0.1	$3.5E-7$	99.1
19	I09-/SM RM-/SB RB	ULOF	$3.5E-10$	0.1	$3.5E-7$	99.2
20	I07-SM-SB	ULOF	$2.6E-10$	0.1	$3.5E-7$	99.3

表8.2-4 システム別炉心損傷発生頻度 (感度解析ケース)

USC Ranking Table. (Total Core Melt Frequency = $3.5E-7$ / Yr)

No.	USC Designation	Probability of USC (before recovery)	Probability of USC (after recovery)	Frequency of Core Melt (/Yr)	Percentage of Total Core Melt Frequency (%)
1	A	$1.2E-4$	$1.2E-4$	$2.8E-7$	78.2
2	P	$3.0E-5$	$3.0E-5$	$4.8E-8$	13.6
3	SB	$1.7E-4$	$6.1E-6$	$9.3E-9$	2.6
4	D7	$5.1E-7$	$5.1E-7$	$8.6E-9$	2.4
5	SM	$1.5E-4$	$2.0E-5$	$8.0E-9$	2.3
6	G	$3.0E-6$	$3.0E-6$	$4.8E-9$	1.4
7	/SM RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$3.6E-9$	1.0
8	D1	$4.9E-9$	$4.9E-9$	$2.4E-9$	0.7
9	/SB RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$2.3E-9$	0.6
10	D4	$1.6E-8$	$1.6E-8$	$8.3E-10$	0.2
11	RM	$3.6E-5$	$3.6E-5$	$4.1E-10$	0.1
12	RB	$2.0E-5$	$2.0E-5$	$4.1E-10$	0.1
13	D8	$3.0E-9$	$3.0E-9$	$3.7E-10$	0.1
14	D6	$8.4E-11$	$8.4E-11$	$9.7E-11$	0.0
15	D0	$1.3E-8$	$1.3E-8$	$9.4E-12$	0.0
16	W	$1.4E-4$	$1.4E-4$	$8.1E-13$	0.0
17	T	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$3.0E-13$	0.0
18	C	$1.0E-2$	$1.0E-2$	$9.2E-15$	0.0

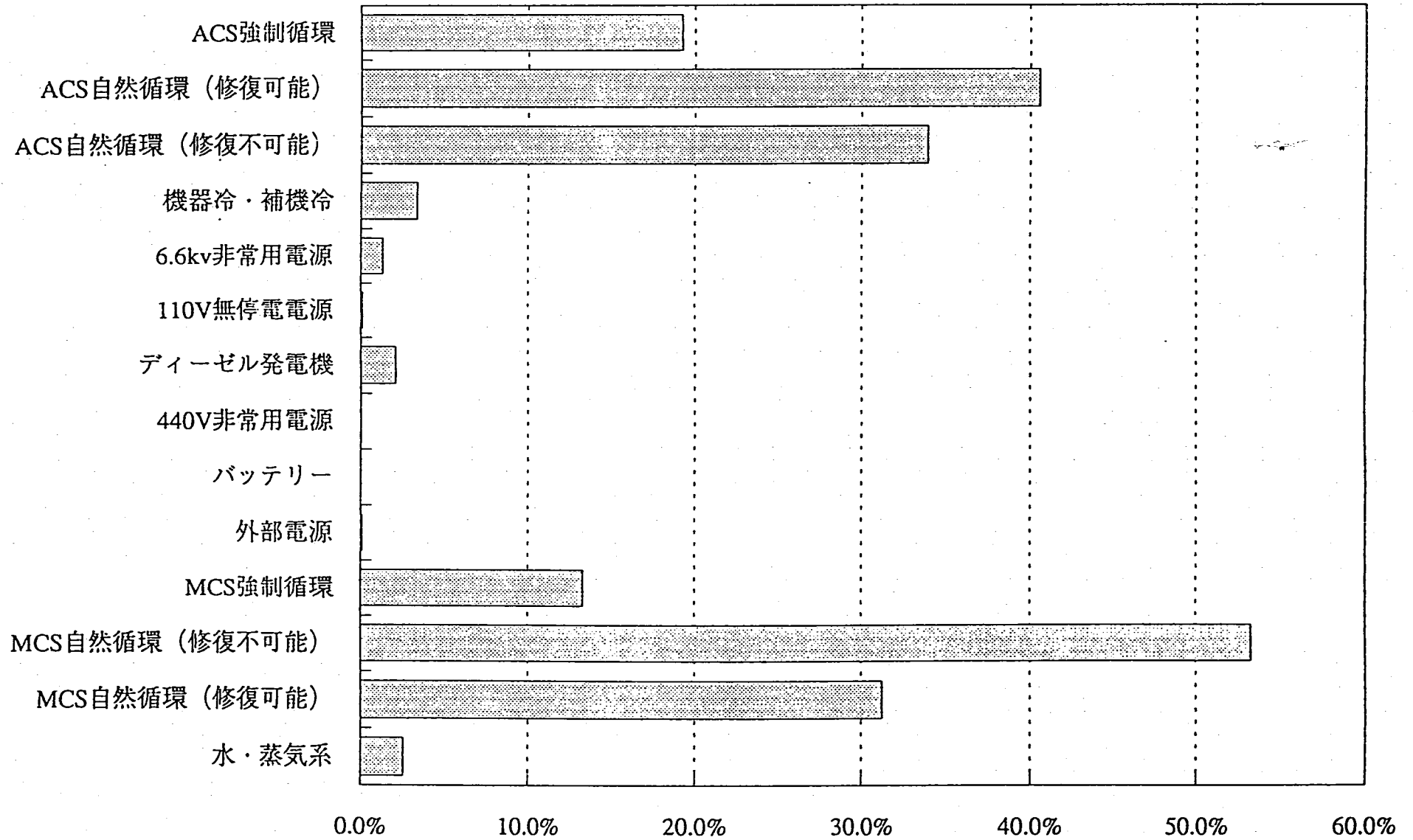


図8.2-1 PLOHS発生頻度に対する設備別重要度 (感度解析ケース)

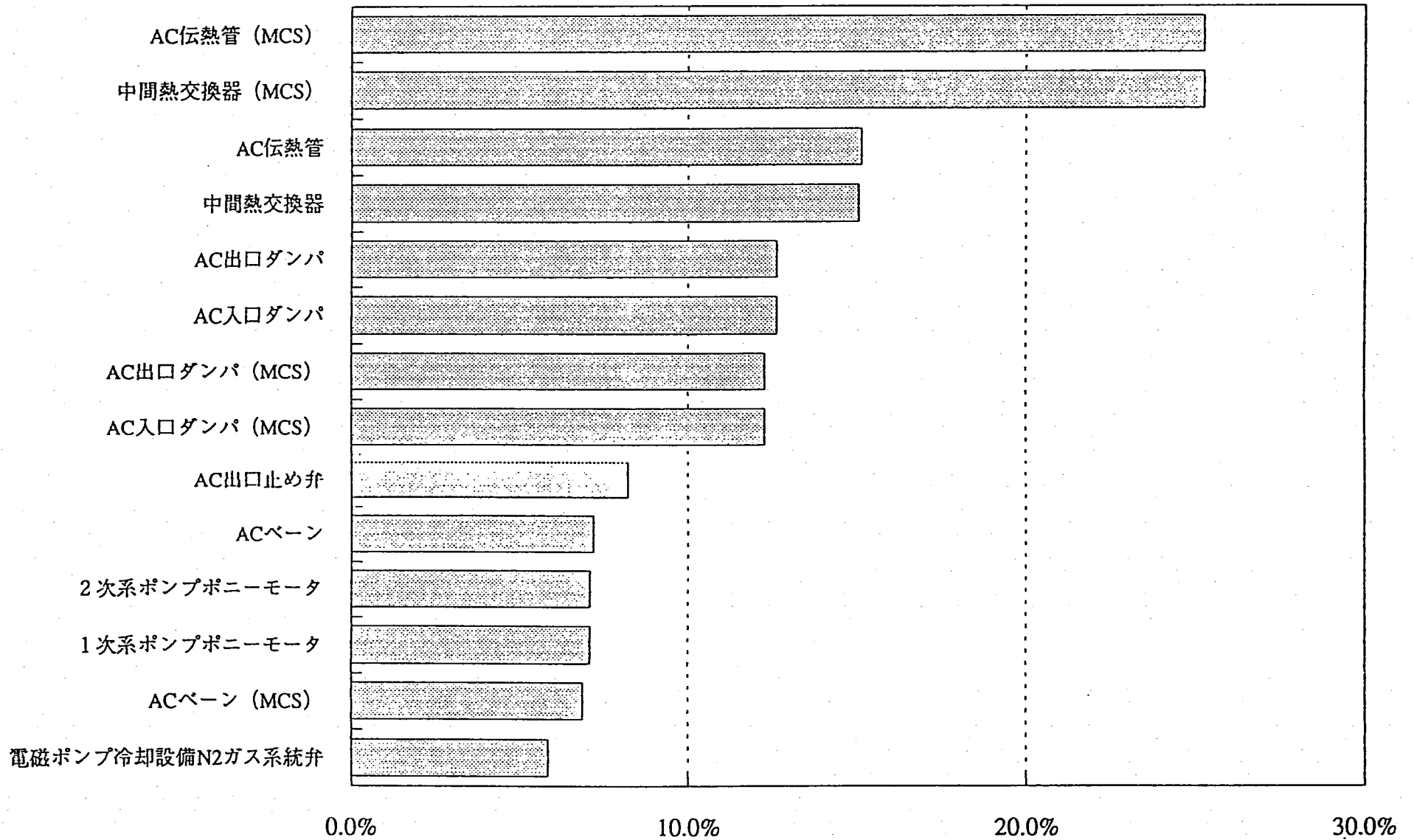


図8.2-2 PLOHS発生頻度に対する機器別重要度 (感度解析ケース)

9. 考察

評価結果のまとめ

水・蒸気系が崩壊熱除去に使用できないとすると、炉停止直後の崩壊熱除去系の成功基準としては、補助冷却設備（ACS）の1ループが強制循環に成功するか、もしくは3ループとも自然循環に成功することが必要となる。この条件で評価すると、PLOHSの発生頻度は約 2.3×10^{-4} /炉年となり、炉心損傷発生頻度はPLOHSによって支配され、崩壊熱除去機能喪失確率は、ACS空気冷却器のダンパ、ベーン、ナトリウム止め弁の共通要因故障によって支配される。すなわち、崩壊熱除去系として、ACSだけでは多重性・多様性の観点からは十分とは言えず、 10^{-6} /炉年レベルの信頼度を得ることは困難である。

原子炉停止後24時間以内は、水・蒸気系単独でも崩壊熱が除去できるとして評価すると、崩壊熱除去系の機能喪失確率は約2桁程度低減される。これは、ACSに水・蒸気系が加わることにより多様性が生じてACS空気冷却器まわりの機器の共通要因故障の影響が緩和され、また、崩壊熱が高く成功基準が最も厳しい原子炉停止直後の崩壊熱除去系の多重性が増すためである。しかし、起因事象が12番「外部電源喪失」、13番「給水流量喪失」、14番「タービントリップ」の場合は、水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用できないので、崩壊熱除去系はACSのみとなり、その機能喪失確率は空気冷却器まわりの機器の共通要因故障によって支配され、約 1.2×10^{-4} である。よって、PLOHS発生頻度は水・蒸気系が崩壊熱除去系として使用できないとした場合の約3.5分の1の約 6.7×10^{-5} /炉年に低減されるに過ぎない。すなわち、何らかの方法により共通要因故障を排除しない限り、いかに崩壊熱除去系を増強したり、成功基準を緩和したりしても、PLOHS発生頻度を効果的に低減することはできない。したがって、詳細設計においては、ACS空気冷却器まわりの機器を多様化し、共通要因故障を排除することが最優先である。

上で述べたように、共通要因故障が存在するかぎり、崩壊熱除去系の系統構成や成功基準を変更して感度解析を行っても、結果がほとんど変化せず感度がなく、解析の意義がないので、本評価では、共通要因故障がすでに排除されているものとして評価を行った。その上で、(1)概念設計の成功基準（原子炉停止直後はACS1ループの強制循環または3ループの自然循環が必要）に基づいた評価、(2)最確ベースの成功基準（原子炉停止直後からACS1ループの自然循環で除熱可能）に基づいた評価、(3)高所配置になっているメンテナンス冷却系（MCS）にも自然循環能力を期待し、ACS1ループと同等の除熱能力を有していると仮定した評価の3種類の評価を行った。(1)を設計ベース、(2)を評価ベース、(3)を感度解析ケース呼ぶ。

(1)設計ベース

原子炉停止後24時間以内は、水・蒸気系単独でも崩壊熱が除去できるとして設計ベースで評価すると、PLOHSの発生頻度は約 1.1×10^{-6} /炉年となり、水・蒸気系による

崩壊熱除去ができないとした場合の約9分の1となる（図9-1）。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約20%、13番「給水流量喪失」が約18%、11番「2次主冷却系漏洩」が約15%、12番「外部電源喪失」が約12%、14番「タービントリップ」が約11%を占めている。これらの起因事象のうち12番、13番、14番は水・蒸気系が使用できない起因事象である。11番と15番は、3ループあるACSのうちの1ループが強制循環にも自然循環にも使用できなくなる起因事象であり、崩壊熱除去系の運転モードはD7である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約51%、D1が約29%を占めている。D7、D1は起因事象により、それぞれACS1ループ、水・蒸気系が使用できなくなる場合の運転モードである。

(2) 評価ベース

設計ベースの成功基準は、原子炉停止後1時間経過して初めて、ACS1ループの自然循環により崩壊熱が除去できるというものであるが、先行炉の評価例から、熱流力解析による最確値評価では成功基準は緩和され、冷却材バウンダリの判断基準によっては、原子炉停止直後からACS1ループの自然循環により崩壊熱が除去できる可能性があるという知見が得られている。そこで、この条件の評価ベースで解析を行った結果、PLOHSの発生頻度は約 1.4×10^7 /炉年と評価された。これは、水・蒸気系による崩壊熱除去ができないとした場合の約3.5分の1であり、(1)設計ベースの約8分の1である（図9-1）。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約30%、11番「2次主冷却系漏洩」が約23%、8番「1次主冷却系逆止弁誤閉」が約14%、13番「給水流量喪失」が約14%を占めている。これらの起因事象のうち8番、11番、15番は崩壊熱除去系の運転モードがいずれもD7の起因事象である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約75%、D1が約22%を占めている。

(3) 感度解析ケース

設計ベースの成功基準ではMCSは原子炉停止後24時間経過した後、強制循環モードでのみ崩壊熱が除去できることになっているが、高所配置になっているMCSについても自然循環能力が期待できると考えられることから、ACSの除熱容量は設計ベースと全く同じであるとしたまま、MCSがACS1ループと同等の除熱能力を有していると仮定して評価すると、PLOHSの発生頻度は約 1.2×10^8 /炉年となることが示された。これは、水・蒸気系による崩壊熱除去ができないとした場合の約5.5分の1であり、(1)設計ベースより約2桁低い値である（図9-1）。仮にMCSが原子炉停止直後から使用できるものの、自然循環除熱はできないとすると、PLOHS発生頻度はこれより約1桁大きくなるので、MCSが原子炉停止直後から使用できることにより約1桁、MCSが自然循環により崩壊熱を除去できることによりさらに約1桁PLOHS発生頻度を低減する効果があることがわかる。PLOHS発生頻度を起因事象別に見ると、15番「蒸気発生器伝熱管破損」が約28%、11番「2次主冷却系漏洩」が約22%、8番「1次主冷却系逆止弁誤閉」が約13%、13番「給水流量喪失」が約12%を占めている。これらの起因事象のうち8

番、11番、15番は崩壊熱除去系の運転モードがいずれもD7の起因事象である。PLOHS発生頻度を崩壊熱除去系の運転モード別に見ると、D7が約70%、D1が約20%を占めている。

崩壊熱除去系の機能喪失確率を各運転モード毎に、各評価ケース間で比較した結果を図9-2に示す。D3、D5、D8、D10以外の運転モードでは機能喪失確率は、成功基準が緩和されるにつれて、設計ベース>評価ベース>感度解析ケースとなっている。D3、D5、D8、D10では、設計ベース>感度解析ケース>評価ベースの順となっている。D3は3ループあるACSのうち1ループが強制循環のみ不能な場合であるので、原子炉停止直後にACSの強制循環が必要ないとした評価ベースのとき、最も機能喪失確率が小さくなるためである。D5はメンテナンス冷却系が起因事象によって使用できなくなっている場合であるので、原子炉停止直後の第1フェイズの成功基準が設計ベースと等しくなるため、やはり評価ベースのとき最も機能喪失確率が小さくなる。

これらの結果から、崩壊熱除去系に関して、以下のように考察される。

- (1) 崩壊熱除去系として、ACSのみでは多様性、多重性が不十分であり、十分な信頼度が得られない。その機能喪失確率は共通要因故障によって支配される。
- (2) ACSに加えて、水・蒸気系も崩壊熱除去系として使用できるとすると、崩壊熱除去系の機能喪失確率は約2桁低減するが、PLOHS発生頻度は外部電源喪失などの水・蒸気系が使用できなくなる起因事象に支配され、水・蒸気系で崩壊熱を除去できないとした場合の約3.5分の1に低減するに過ぎない。
- (3) 原子炉停止後1時間以内はACS1ループの強制循環または3ループの自然循環を必要とする成功基準では、原子炉停止直後の崩壊熱除去系の機能喪失確率が、PLOHS発生頻度に対して支配的となる。
- (4) 先行炉の評価例から、熱流力解析による最確値評価では成功基準は緩和され、冷却材バウンダリの判断基準によっては、原子炉停止直後からACS1ループの自然循環により崩壊熱が除去できる可能性があるという知見が得られている。この条件で評価すると、PLOHS発生頻度は約 10^7 /炉年という十分に低いレベルに低減できる。
- (5) LORLの発生頻度が約 10^7 /炉年であるので、PLOHSの発生頻度のみを低減しても炉心損傷発生頻度の合計値は効果的には低減できないが、MCSに自然循環能力を持たせて原子炉停止直後から使用できるようにすれば、PLOHS発生頻度はさらに約1桁低減し、 10^8 /炉年レベルになる。
- (6) 水・蒸気系で崩壊熱を除去するためには、1次・2次主冷却系が強制循環を行う必要

があるが、水・蒸気系単独の機能喪失確率は、使命時間が24時間の場合、約 3.7×10^{-3} であり、これは起動用給水ポンプの起動失敗確率によって支配されている。

- (7) PLOHS発生頻度に対して重要度の大きい起因事象の発生頻度は「蒸気発生器伝熱管破損」が約 6.8×10^{-3} /炉年、「給水流量喪失」が約 3.1×10^{-1} /炉年、「2次主冷却系漏洩」が約 5.3×10^{-3} /炉年、「外部電源喪失」が約 5.2×10^{-2} /炉年、「タービントリップ」が約 1.9×10^{-1} /炉年として評価した。もんじゅの運転実績が蓄積され、これらの起因事象の発生頻度が低減されれば、PLOHS発生頻度評価値も低減する。

設計への提言

- (1) 炉心損傷発生頻度を低減するためには、PLOHS発生頻度を低減することが効果的である。そのためには、ACSの空気冷却器出口ナトリウム止め弁、空気冷却器出入口ダンパ、空気冷却器入り口ベーンを多様化し、共通要因故障を排除することが最も効果的である。その方策としては例えば、3ループの各々に異なる設計の機器を設けるか、各ループに異なるタイプの機器を2台ずつ設置するなどのオプションが考えられる。
- (2) さらにPLOHS発生頻度を低減するためには、崩壊熱除去系に対する成功基準が最も厳しい原子炉停止直後の崩壊熱除去系の多重性を増すことが有効であり、そのためには、MCSを原子炉停止直後から使用できるようにするのが効果的である。MCSに自然循環能力を持たせる設計とすればなお効果は大きい。
- (3) 水・蒸気系の信頼度を向上するには起動用給水ポンプを100%容量×1台ではなく、100%容量×2台または50%容量×3台などとして、冗長性を増すことが効果的である。また給水ポンプの試験間隔を短縮することが効果的である。

なお、本評価では解析の前提条件として、(1)猶予時間を5時間一定としている、(2)テストアウトージ・メンテナンスアウトージを無視している、(3)インターロック信号をモデル化していない。(1)は保守的な仮定である。(2)及び(3)は楽観的な仮定であるが、(2)のテストアウトージについては、test override function（試験中でも要求があれば作動できる機能）を設けることにより、またメンテナンスアウトージについては運転要領等によりアウトージを制限することにより、その影響は十分に低く抑えられる。(3)のインターロックについては、多重系統間の独立性を確保することにより、やはりその影響は十分に低く抑えられ、評価結果を左右するものではない。

炉心損傷発生頻度を今後、より現実的に評価するためには、今回の評価ではスコープ外とした外的事象の評価や、原子炉停止時のリスク評価をも行っていく必要がある。

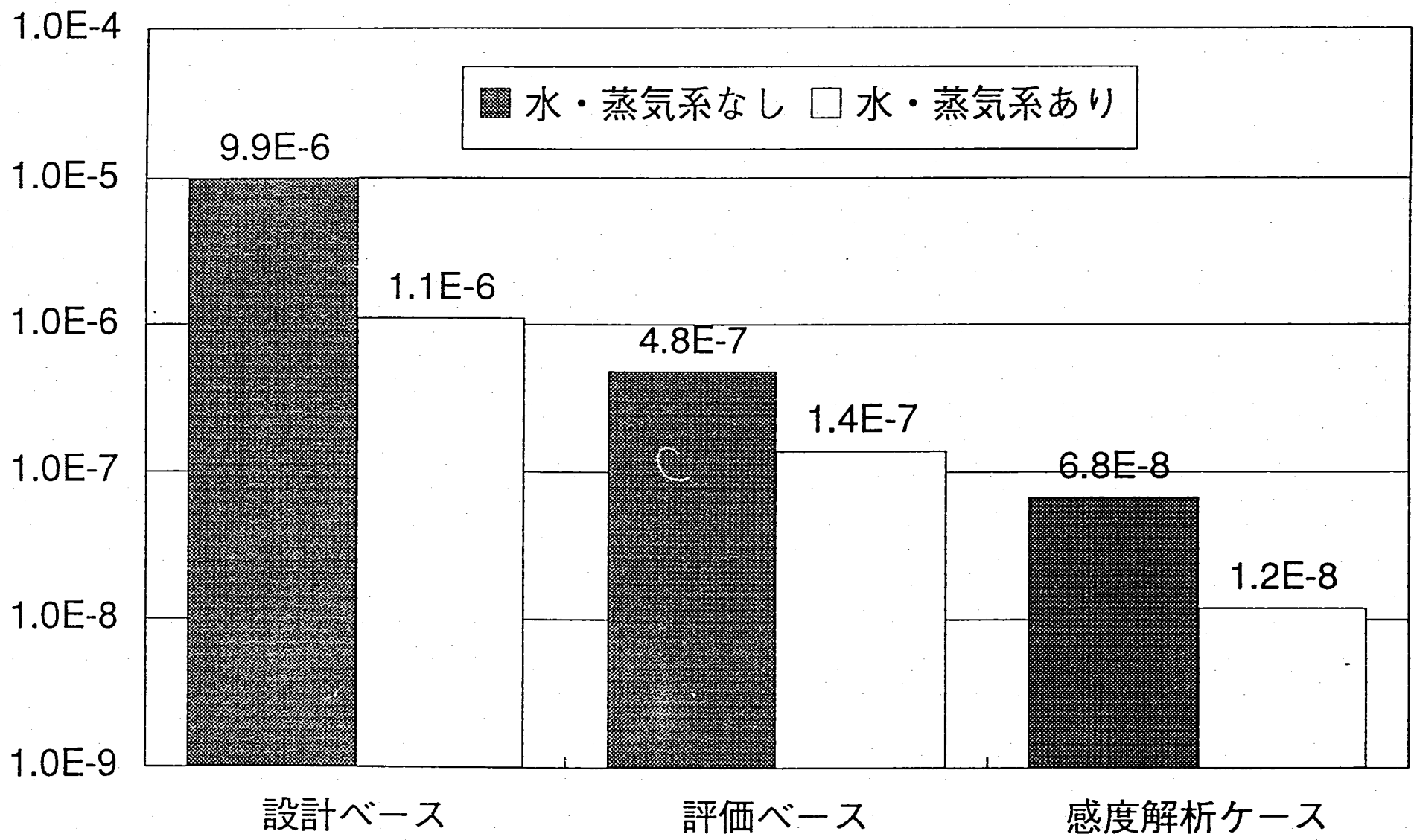


図9-1 PLOHS発生頻度（/炉年）の比較

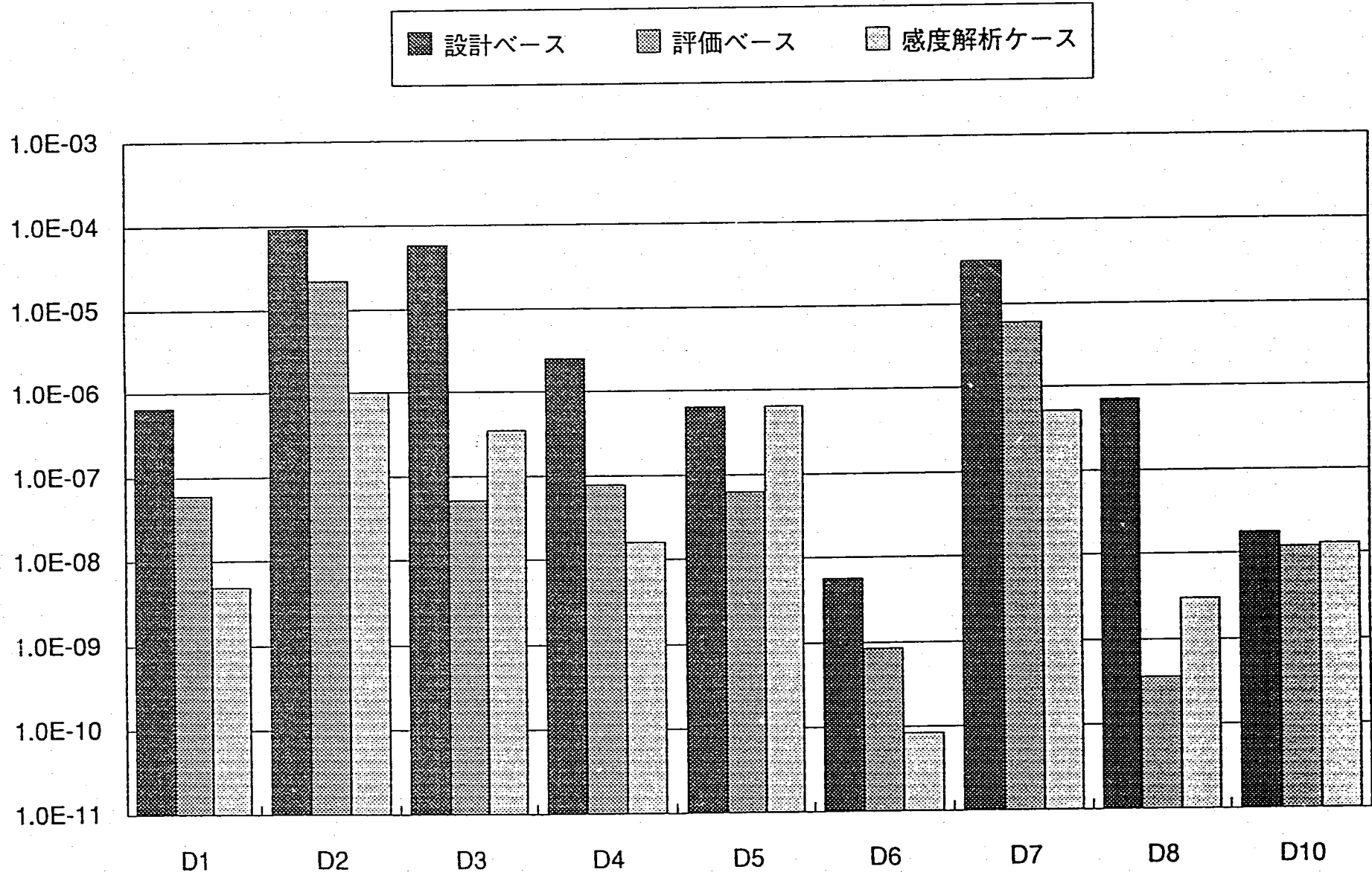


図9-2 各運転モードの機能喪失確率の比較

10. 結論

大型高速炉プラントを対象に、概念設計情報を基にイベントツリー及びフォールトツリーによるシステム解析モデルを作成し、内的事象に起因して炉心損傷に至る事故シーケンスの同定及びその発生確率の定量化を実施した（レベル1-PSA）。

評価結果に基づいて、安全確保上重要な系統・機器、支配的事故シーケンス等の抽出・整理を行い系統的な分析を加えることにより、プラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見をまとめた。

本評価で得られた主要な知見は以下の通りである。

- (1) 補助冷却設備（ACS）、メンテナンス冷却系（MCS）に加えて水・蒸気系単独でも崩壊熱が除去できるとすると、崩壊熱除去系の機能喪失確率は水・蒸気系に期待しない場合より約2桁低減される。
- (2) 起因事象により水・蒸気系が崩壊熱除去に使用できない場合の、崩壊熱除去系の機能喪失確率は、ACSの空気冷却器周辺の機器（ダンパ、ベーン、電動弁）の共通要因故障によって支配される。よって、水・蒸気系で崩壊熱が除去できるとしても、PLOHS発生頻度は水・蒸気系に期待しない場合（約 2.3×10^4 ／炉年）の約3.5分の1の約 6.7×10^5 ／炉年に低減するに過ぎない。
- (3) ACSの空気冷却器周辺の機器が多様化され、共通要因故障が排除されたとすると、水・蒸気系が加わることにより、成功基準が最も厳しい原子炉停止直後の崩壊熱除去系の多重度が増すため、PLOHS発生頻度は水・蒸気系に期待しない場合（約 9.9×10^{-6} ／炉年）の約9分の1の約 1.1×10^6 ／炉年に低減するが、 10^7 ／炉年レベルの信頼度は達成できない。これを設計ベースとする。
- (4) 熱流力解析による最確値評価では、原子炉停止直後のACSによる崩壊熱除去の成功基準は、設計ベースの「1ループの強制循環または3ループの自然循環」から、「1ループの自然循環」へと緩和される可能性がある。この条件で評価すると、PLOHS発生頻度は設計ベース（約 1.1×10^6 ／炉年）の約8分の1の約 1.4×10^7 ／炉年という十分に低いレベルになる。
- (5) 設計ベースではMCSは原子炉停止後24時間経過後から強制循環モードでのみ崩壊熱を除去できることになっているが、MCSは高所配置になっており自然循環能力が期待できる。感度解析として、MCSにACS 1ループと同等の除熱能力を持たせる設計として崩壊熱除去系の多重度を増して評価すると、PLOHS発生頻度は設計ベースの約90分の1の約 1.2×10^8 ／炉年に減少する。

- (6) 水・蒸気系で崩壊熱を除去するためには、1次・2次主冷却系が強制循環を行う必要があるが、水・蒸気系単独の機能喪失確率は、使命時間が24時間の場合、約 3.7×10^{-3} であり、これは起動用給水ポンプの起動失敗確率によって支配されている。

なお、前年度の評価でLORL及びATWSに関しては下記のことがわかっている。

- (7) LORL発生頻度は約 3×10^{-7} /炉年である。1次アルゴンガス系の格納容器内外の2個の隔離弁の種類を異なるものとして、共通要因故障を排除すると、LORL発生頻度は約 9×10^{-8} /炉年に低減する。
- (8) 原子炉停止系は、主炉停止系と後備炉停止系とも3トレイン構成になっていることや、主炉停止系と後備炉停止系が完全に分離されていること、また主炉停止系は2 out of 3 論理回路と遮断器を、後備炉停止系はOR 論理回路と継電器を用いるなど、多重性、独立性、多様性が図られており信頼度が高く、ATWSの発生頻度は約 1×10^{-8} と低い。

以上のような評価作業を実施することにより、プラントの信頼性・安全性の向上に有効な知見を提供し、基本設計への反映に役立てる見通しを得た。

11. 謝辞

本研究の実施にあたっては、株式会社CSKの長久保宜克氏に、フェイズドミッション解析プログラム等を用いた各種の解析作業、並びに報告書の図表作成を支援して頂きました。また、システム解析室員の皆さんからは適切なコメントを頂きました。以上の方々に感謝致します。

12. 参考文献

- (1) PNC ZN9410 91-381 「高速増殖炉原型炉レベル1-PSA」 1991年11月
- (2) PNC ZN9410 93-134 「大型高速炉のレベル-1 PSA概括評価」 1993年5月
- (3) PNC ZN9410 92-137 「大型高速炉設計研究成果報告書-60万kWe級プラントの設計研究-」 1992年5月
- (4) PNC PJ9222 91-003 「フェイズド・ミッション解析プログラムの開発 (III)」 三菱総合研究所 1992年3月