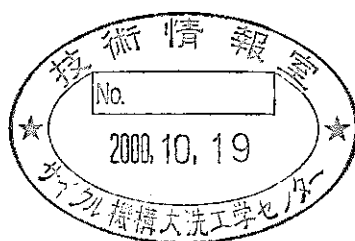


安全系局限化に関する検討：
Na冷却FBR候補概念の崩壊熱除去系に関する信頼度評価
(研究報告書)

2000年7月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000



安全系局限化に関する検討：
Na 冷却 FBR 候補概念の崩壊熱除去系に関する信頼度評価
(研究報告)

梅津陽一郎*1

要 旨

高速増殖炉の実用化のためには、軽水炉やその他発電システムと競合できる経済性を獲得することが必要である。そのためには、安全系に対しては物量を削減し、なおかつ必要十分な信頼度を確保することが重要である。本研究では、実用化戦略調査研究において検討されている、ループ数及びサポート系統数の削減が図られた大型ナトリウム冷却高速炉 3 概念について、それぞれシステムモデルを作成し、フォールトツリー手法によって PLOHS (Protected Loss Of Heat Sink) シーケンスの発生頻度を算出した。この評価では、国内軽水炉の運転経験を基に作成された機器故障率データを活用することで、より現実的な評価を行うこととした。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 本研究で取り上げた 3 種類の候補概念は、共通要因故障が排除されているという条件下で、内の事象に起因する PLOHS シーケンスの発生頻度は、設計ベースの評価で 10^{-6} /炉年未満を達成する見通しを得た。また、支配的な事象重ね合わせの整理を行い、系統的な分析を加えることにより、信頼度向上に有効な知見をまとめた。
- ・ 設計マージンを見込む案として、自然循環除熱の評価値を $100/3\% \times 3$ ループから $50\% \times 3$ ループ又は $25\% \times 4$ ループから $100/3\% \times 4$ ループへと増加させて崩壊熱除去に成功する条件を緩和した場合の信頼度評価を実施した。その結果、PLOHS シーケンス発生頻度が設計ベースの評価と比較して 1 桁程度小さくなることを確認した。

本研究は、実用化戦略調査研究フェーズ 1 の一環として実施したものである。

*1 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

WBS 番号 1-1-F-①

Consideration on rationalization of reactor safety systems:
Reliability assessment of decay heat removal systems
in commercialized sodium cooled FBR concepts

Yoichiro Umetsu^{*1}

Abstract

For commercialization of FBR (Fast Breeder Reactor), the reactor safety systems are needed not only to have necessary and enough reliability but also to decrease the amount of materials in order that the FBR has economical competitiveness against LWR (Light Water Reactor) and another electrical power supply systems. In this study, reliability assessment, which calculates the occurrence frequencies of PLOHS (Protected Loss Of Heat Sink) sequences, was performed for three kinds of large size sodium cooled fast reactors with decreased number of loops and of support systems examined in the Feasibility Studies on Commercialized FBR System. The realistic evaluation was performed using the failure rate data of components based on the domestic LWR operating experience. The result is:

- All of the three kinds of commercialized FBR concepts are expected to achieve the frequencies of PLOHS sequences caused by internal events of the plant under 10^{-6} /ry, assuming that common-mode-failure is excluded. In addition, the dominating cause of the coincidence of the incidents and the information that improves reliability of decay heat removal systems are summarized for each concept.
- In order to evaluate design margin, the reliability assessment was performed in the case that the capacity of natural circulation cooling was reinforced from 100%/3 × 3 loops to 50% × 3 loops or from 25% × 4 loops to 100%/3 × 4 loops easing to succeed decay heat removal. In that case, it is confirmed that the frequencies of PLOHS sequences decrease by about one order of magnitude.

*1 FBR System Engineering Group, System Engineering and Technology Division, OEC, JNC

目次

1. はじめに.....	1
2. 評価手法.....	2
3. プラント概念情報.....	4
3.1 ループ型（1次系機器合体・ループ数削減）.....	4
3.2 タンク型（2次系機器合体・ループ数削減）.....	4
3.3 タンク型（機器合体・集中配置）.....	5
4. 起因事象評価.....	12
4.1 起因事象と崩壊熱除去モードについて.....	12
4.2 起因事象の定量化.....	15
5. 評価モデルの設定.....	18
5.1 評価対象概念の崩壊熱除去系に対する失敗基準の設定.....	18
5.2 サポートシステムの機能従属関係の設定.....	21
5.3 フロントラインシステムの機能従属関係の作成.....	22
5.4 定量値データの設定.....	23
6. 崩壊熱除去機能喪失確率と PLOHS シーケンス発生頻度の評価.....	51
6.1 解析条件.....	51
6.2 解析結果及び考察.....	51
6.3 自然循環除熱容量を増強した場合の信頼度評価.....	54
7. まとめ.....	69
略語一覧.....	70
謝辞.....	71
参考文献.....	72

図表目次

図 3.1	ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) 概念図	6
図 3.2	タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) 崩壊熱除去系概念図	8
図 3.3	タンク型 (機器合体・集中配置) 崩壊熱除去系概念図	10
図 5.1	崩壊熱除去系機能従属関係(1)	29
図 5.2	崩壊熱除去系機能従属関係(2)	30
図 5.3	崩壊熱除去系機能従属関係(3)	31
図 6.1	信頼度評価結果	58
表 3.1	ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) 基本仕様	7
表 3.2	タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) 基本仕様	9
表 3.3	タンク型 (機器合体・集中配置) 基本仕様	11
表 4.1	評価対象概念の起因事象発生頻度概算値	16
表 4.2	参考 大型炉起因事象発生頻度 (参考文献[3]表 4.1.2-2)	17
表 5.1	ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) のマクロイベント説明	26
表 5.2	タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) のマクロイベント説明	27
表 5.3	タンク型 (機器合体・集中配置) のマクロイベント説明	28
表 5.4	崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(1)	32
表 5.5	崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(2)	33
表 5.6	崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(3)	34
表 5.7	フロントラインシステムマクロイベントの構成機器と故障率データ	36
表 5.8	サポートシステムマクロイベントの構成機器と故障率データ	44
表 5.9	ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) マクロイベント発生確率	48
表 5.10	タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) マクロイベント発生確率	49
表 5.11	タンク型 (機器合体・集中配置) マクロイベント発生確率	50
表 6.1	信頼度評価結果	57
表 6.2	支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(1)	59
表 6.3	支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(2)	63
表 6.4	支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(3)	65
表 6.5	自然循環能力を增強した場合の失敗基準に対応するブール代数式	68

1. はじめに

高速増殖炉（以下、FBR という）の実用化を目指す上で、軽水炉やその他発電システムと競合できる経済性を身につけることは避けることのできない重要な課題である。核燃料サイクル開発機構（以下、機構という）で進めている FBR 実用化戦略調査研究においては、魅力ある FBR 像を目指し、コスト低減方策の一環として、大型化によるスケールメリットの獲得及び物量削減が検討されている。特に物量削減のための具体案として、冷却ループ数の削減、補機冷却系及び電源系など冷却ループをサポートするシステムの系統構成の合理化等、安全系にかかわる系統設備の合理化検討が進められている。一方で、安全目標として「炉心損傷発生頻度 $10^{-6}/\text{ry}$ 未満」が要求されており、物量削減を指向した安全系の設備設計との両立を図る必要がある。

したがって、プラント概念設計の初期段階から概括的なレベル1の確率論的安全評価（以下、PSA という）を実施して炉心損傷発生頻度に対する安全目標達成に向けての見通しを得るとともに、合理的な安全設計方針にかかわる知見を抽出し、設計にフィードバックしていくことが重要である。

本報告書は、概括的な PSA の一環として、検討が最も進んでいると考えられる3種類の大型ナトリウム冷却炉プラント3概念について、崩壊熱除去機能喪失に至る炉心損傷シーケンス（以下、PLOHS シーケンスという）の発生頻度を概略的に評価し、設計への提言等をまとめたものである。

2. 評価手法

本報告書で実施した作業は、PLOHS シーケンス発生頻度の評価である。評価手法の概略を以下に述べる。

(1) 評価対象概念の設計情報収集

評価対象概念について、PLOHS シーケンス発生頻度評価に必要な、崩壊熱除去系概念設計についての情報を収集・整理する。

(2) 起因事象評価

まず、崩壊熱除去が必要となる起因事象を同定する。次に、起因事象が崩壊熱除去系の機能に及ぼす影響すなわち起因事象に対する崩壊熱除去系の従属故障を適切に考慮することが重要なので、同定した起因事象を、作動が期待される崩壊熱除去ループと除熱モード（強制循環除熱（以下、FC という）モードと自然循環除熱（以下、NC という）モード）によって表される崩壊熱除去系の状態（以下、崩壊熱除去系の運転モードと言う）によって分類する。そして、最後に起因事象発生頻度の定量化を行う。

(3) 評価モデルの設定

まず、(1)において収集・整理した情報を基に、崩壊熱除去機能の達成に必要な系統・機器を抽出し、それらを用いて起因事象に対する崩壊熱除去系の運転モード別に崩壊熱除去機能の失敗基準を表す。そして、抽出した系統・機器間における機能についての相互依存関係（これを機能従属関係と呼ぶ）を整理する。このとき、系統・機器故障の「崩壊熱除去失敗」に対する影響の観点から、同一の影響である系統・機器の単一故障や運転員による単一の誤操作をひとまとまりとしてモデル化する。このまとまりをマクロイベントと呼ぶ。

次に、マクロイベントを構成要素とするブール代数式で崩壊熱除去機能の喪失を表現する。なお、評価対象は概念設計段階であることから、崩壊熱除去系を構成する動的機器の作動に必要な電源系統や機器冷却系統について設計が定まっていない。このため、(1)で得た情報だけでは特定できない系統構成に関する解析条件をFBRについての先行PSAを参考に設定する。

最後に、機器信頼性データを基に系統を構成する機器の故障確率を定量化した後、マクロイベントを構成する機器故障確率を基にマクロイベントの発生確率を定量化する。今回の解析では、ナトリウム系以外の機器に対して国内軽水炉の運転経験を基にした機器故障率データ^[1]を使用することにより不確定幅を小さくし、より現実的な評価を目指した。

(4) 崩壊熱除去機能喪失確率と PLOHS シーケンス発生頻度の評価

崩壊熱除去機能喪失を表すブール代数式を展開した後、マクロイベントの発生確

率を代入することによって、崩壊熱除去機能喪失確率を計算する。崩壊熱除去系の運転モード別に得られる崩壊熱除去機能喪失確率に起因事象発生頻度を乗じて、総和をとることにより PLOHS シーケンスの発生頻度を求める。次に、個々の評価対象概念について、PLOHS シーケンス発生頻度に対して支配的な系統・機器の故障を分析することによって、設計の改善案を検討する。最後に、今回の検討が設計ベースの評価であることから、実機の性能ベースの評価を行うことにより崩壊熱除去系の除熱容量が増加することが予想されるが、失敗基準を緩和したモデルによりその影響を確認する。

3. プラント概念情報

ここでは、本報告書の評価対象となっている、大型ナトリウム冷却炉の3つの炉型概念について概要を述べる^[2]。なお、各概念ともに現在も検討が進められており、基本仕様は暫定的なものである。

各概念の崩壊熱除去系の項目は本研究で重要な部分である。なぜなら崩壊熱除去ループの数、1ループの除熱容量及び1ループの機器構成等がそのループ全体の故障率に深くかかわっているからである。

3.1 ループ型（1次系機器合体・ループ数削減）

① 基本概念

- ・ 非均質炉（回字型炉心）及び高性能遮へい体の採用により炉心を小型化し、炉容器径をリング鍛造の製作限界以下に抑えている。
- ・ 熱膨張が小さく高温強度に優れた 12Cr 系鋼の広範囲にわたる採用、水平免震の採用等により、機器のコンパクト化、配管短縮化を図っている。
- ・ 炉心の低圧損化を行い、ループ数を削減して2ループ化する。
- ・ 崩壊熱除去系は、2次系の蒸気発生器内に挿入された伝熱管を介して崩壊熱を除去する原子炉補助冷却系（以下、IRACS という）が2系統、原子炉容器内に挿入された伝熱管を介して崩壊熱を除去する原子炉補助冷却系（以下、DRACS という）が1系統の合計3系統から構成される。
- ・ 1次系ポンプ（機械式ポンプ）と中間熱交換器を合体し、ループ数削減と合わせて主冷却系統を簡素化する。
- ・ 使用済燃料を直接取り出し、高発熱燃料を水プールで貯蔵する簡素化燃料取扱設備の採用により、EVST 系を削除する。
- ・ ツインプラント化により、設備の共用化、設備容量の削減を図る。

② 基本仕様

図 3.1 及び表 3.1 に示す。

3.2 タンク型（2次系機器合体・ループ数削減）

① 基本概念

- ・ 燃料物量及び反応度等の時間変化が少なく空間分布が一様な炉心（ K_{∞} 一定炉心）を採用するとともに、制御棒本数を削減し炉心を小型化している。
- ・ 熱膨張が小さく高温強度に優れた 12Cr 系鋼の広範囲にわたる採用、原子炉建屋への3次元免震の採用により、各機器をコンパクト化し、原子炉容器径を縮小し容器板厚を薄肉化（25mm）している。
- ・ 2次系ポンプ（電磁ポンプ）と蒸気発生器を合体し、物量削減を図っている。
- ・ 炉心の低圧損化により必要最小限のループ数（3ループ化）としている。
- ・ 崩壊熱除去系は、1次系の中間熱交換器内に挿入された伝熱管を介して崩壊熱を除去する原子炉補助冷却系（以下、PRACS という）を採用している。

- ・ 使用済燃料を直接取り出し、高発熱燃料を水プールで貯蔵する簡素化燃料取扱設備の採用により、EVST系を削除する。
- ・ ツインプラント化により、設備の共用化、設備容量の削減を図る。

② 基本仕様

図 3.2 及び表 3.2 に示す。

3.3 タンク型（機器合体・集中配置）

① 基本概念

- ・ 低圧損炉心として1次系ポンプの吐出圧を低減している。
- ・ 高性能遮へい体を採用し、炉心を小型化している。
- ・ 1次系ポンプ（電磁ポンプ）と中間熱交換器を合体し、主冷却系を簡素化している。
- ・ 2次系ポンプ（電磁ポンプ）と蒸気発生器を合体し、2次主冷却系を簡素化している。
- ・ 主冷却系は4ループ構成（IHX+ポンプが8基、SGが4基）である。
- ・ 崩壊熱除去系は、DRACSが2系統、2次系配管から分岐した冷却ラインによって崩壊熱を除去する原子炉補助冷却系（以下、これもIRACSと言う）が4系統の合計6系統から構成される。
- ・ 伝熱管への12Cr鋼採用等による機器コンパクト化（IHX、SG）を行っている。
- ・ 原子炉出口温度に追従する温度反応度効果を利用した原子炉出力制御系（PLAM：Plant Control Module）による出力制御系の簡素化を行っている。
- ・ 建屋3次元免震を採用している。

② 基本仕様

図 3.3 及び表 3.3 に示す。

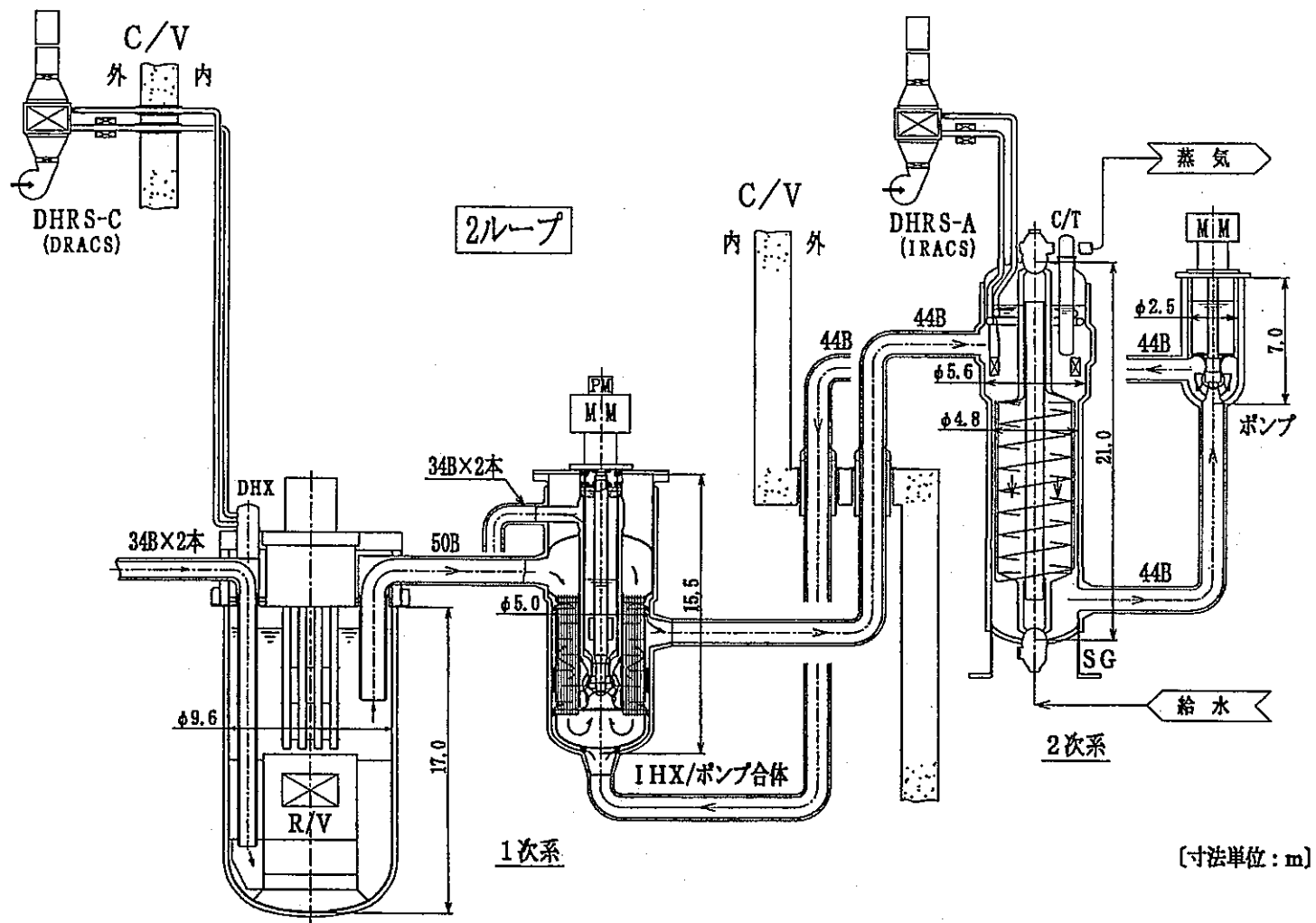


図 3.1 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) 概念図

表 3.1 ループ型 (1 次系機器合体・ループ数削減) 基本仕様

No	項 目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉
2	電気出力 (発電端)	1500MWe
3	熱出力	3570MWt
4	ループ数	2 ループ
5	1 次系 Na 温度	550°C/395°C
6	2 次系 Na 温度	520°C/335°C
7	1 次系流量	3.27×10 ⁴ t/h/ループ
8	2 次系流量	2.73×10 ⁴ t/h/ループ
9	主蒸気温度/圧力	495°C/16.9MPa
10	給水温度/流量	240°C/2.90×10 ³ t/h
11	タービン発電機	発電効率 42%以上
12	プラント稼働率	91%以上 (プラント運転サイクル 16 ヶ月の場合)
13	炉心・燃料	非均質炉心 (回字型炉心)、混合酸化物燃料
14	遮蔽体外接円径	炉心槽内径: 約 6500mm
15	燃焼度	約 15 万 MWd/t (取出平均)
16	増殖比	約 1.09 (燃焼度約 11 万 MWd/t の場合、約 1.15)
17	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系 (制御棒 44 本)
18	炉心安全性	①受動的炉停止方策: SASS 設置、②再臨界回避方策: ボイド反応度を 5~6%に制限+軸方向ブランケット一部削除
19	炉心支持方式	下部支持方式
20	炉壁保護構造	炉壁冷却なし
21	炉心上部機構	コラム型 UIS
22	1 次系配管方式	上部流出入方式
23	中間熱交換器	縦置無液面ジグザグ流式直管型 (1 次主循環ポンプ合体)
24	1 次主循環ポンプ	機械式ポンプ
25	蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル有液面型
26	2 次主循環ポンプ	機械式ポンプ
27	崩壊熱除去方式	IRACS 2 系統+DRACS 1 系統
28	Na 漏えい対策	容器: ガードベッセル、配管: エンクロージャ
29	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
30	プラント運転サイクル	約 16 ヶ月、4 バッチ方式
31	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵 (IVS 及び EVST での減衰なし)
32	②炉内燃料交換	単回転プラグ+コラム型 UIS+パンタグラフ式燃料交換機
33	③炉内/外燃料移送	炉内中継装置+燃料出入機 (台車式)
34	免震	2 次元 (水平) 免震
35	プラント寿命	40 年
36	原子炉建屋	原子炉建屋容積約 11.5 万 m ³ /プラント (ツインプラント)

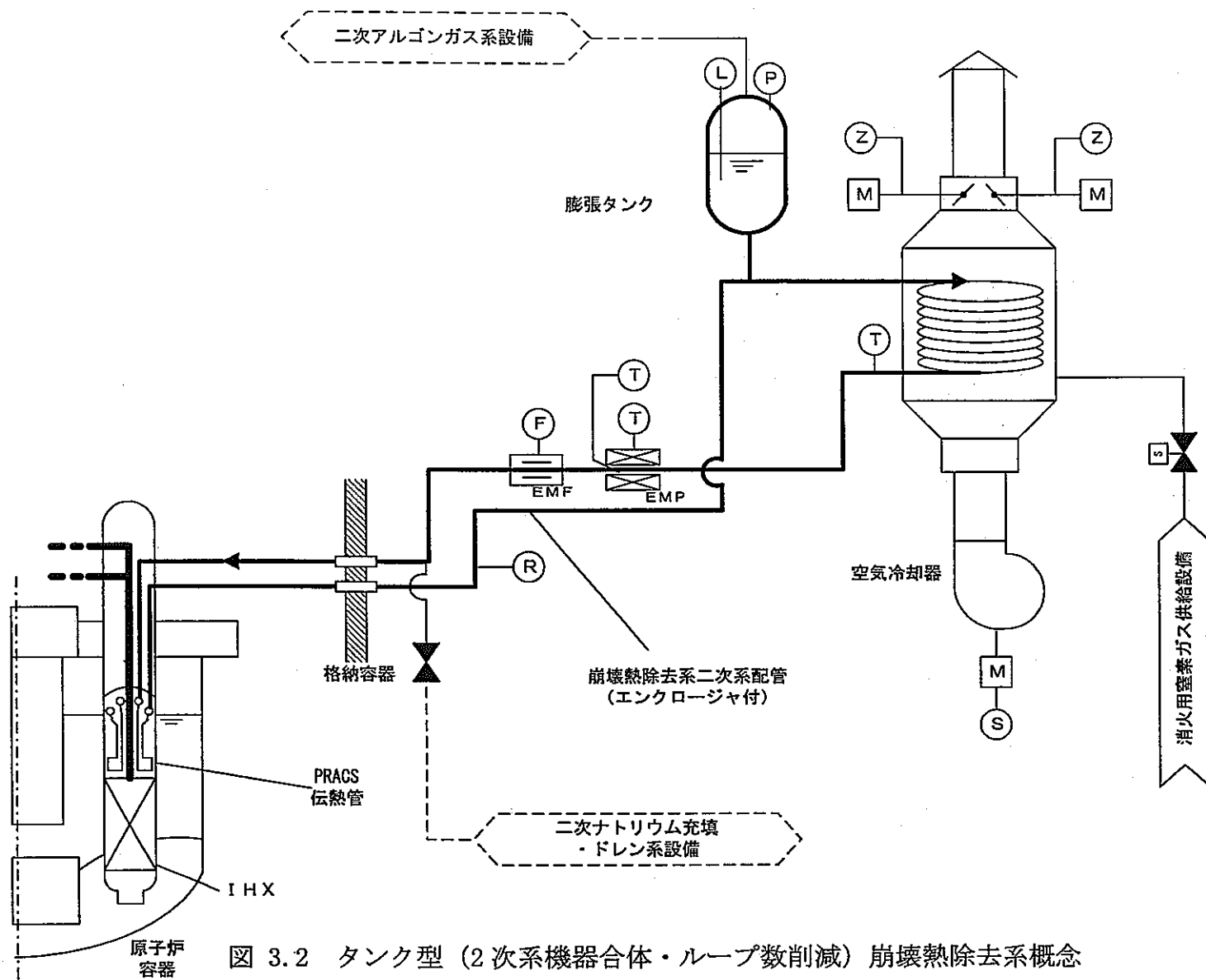


図 3.2 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) 崩壊熱除去系概念

表 3.2 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) 基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却タンク型炉
2	電気出力 (発電端)	1500MWe
3	熱出力	3660MWt
4	ループ数	3ループ
5	1次系Na温度	550°C/395°C
6	2次系Na温度	520°C/335°C
7	1次系流量	2.24×10 ⁴ t/h/ループ
8	2次系流量	1.86×10 ⁴ t/h/ループ
9	主蒸気温度/圧力	485°C/15.4MPa
10	給水温度/流量	240°C/1.98×10 ⁶ kg/h/基
11	プラント熱効率	41%以上
12	プラント稼働率	90%以上
13	炉心・燃料	均質炉心 (k _∞ 一定炉心)、混合酸化物燃料 (ダクトレス)
14	遮蔽体外接円径	6100mm
15	燃焼度	130GWD/t (取出平均)
16	増殖比	リファレンス炉心: 約1.06、増殖炉心: 約1.15
17	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系 (制御棒27本)
18	炉心安全性	(1) 受動的炉停止方策: SASS及び炉内GEM設置 (2) 再臨界回避方策: Naプレナム付き炉心、炉心下部に再臨界緩和材を装荷、熔融燃料排出チャンネル設置
19	炉心支持方式	下置き方式
20	炉壁保護構造	—
21	炉心上部機構	切り込み型UIS
22	1次系配管方式	1次系配管なし
23	中間熱交換器	完全浸漬型管内1次方式
24	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
25	蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル有液面型
26	2次主循環ポンプ	電磁ポンプ
27	崩壊熱除去方式	PRACS 3系統
28	Na漏えい対策	容器: ガードベッセル、配管: エンクロージャ
29	原子炉格納施設	ガードベッセル+上部ドーム式格納境界
30	プラント運転サイクル	プラント運転サイクル18ヶ月、4バッチ方式
31	①燃料減衰待貯蔵	水プール貯蔵 (IVS及びEVSTでの減衰なし)
32	②炉内燃料交換	単回転プラグ+切り込み型UIS+マニピュレータ式燃料交換機
33	③炉内/外燃料移送	炉内中継槽+台車式燃料出入機
34	免震	3次元免震
35	プラント寿命	40年
36	原子炉建屋	ツインプラント、原子炉建屋容積約14.8万m ³ (補助建物含む)

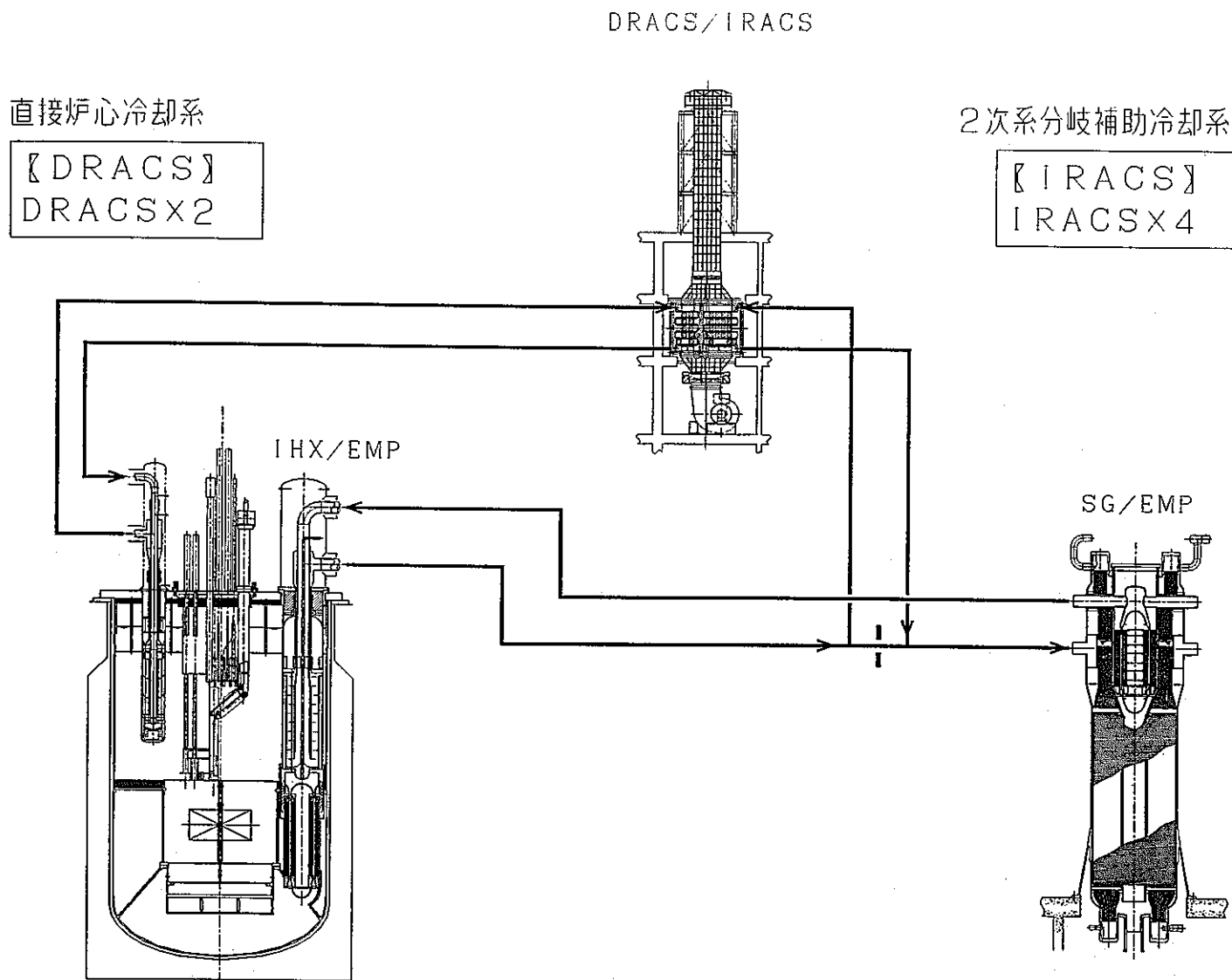


図 3.3 タンク型（機器合体・集中配置）崩壊熱除去系概念図

表 3.3 タンク型（機器合体・集中配置）基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	原子炉1次系一体型（原子炉容器内IHX-EMP合体機器設置） +2次系機器合体
2	電気出力（発電端）	1600MWe
3	熱出力	3800MWt
4	ループ数	4ループ
5	1次系Na温度	550/495°C
6	2次系Na温度	335/520°C
7	1次系流量	69,670 ton/h
8	2次系流量	14535 ton/h/ループ
9	主蒸気温度/圧力	495°C/約18MPa
10	給水温度/流量	240°C/約6,500 ton/h
11	プラント熱効率	約42%
12	プラント稼働率	90%程度
13	炉心・燃料	均質炉心・混合酸化物燃料 (炉心；456体、B/A；174体、ピッチ195mm、被覆管；フェライト鋼)
14	遮蔽体外接円径	5800mm（炉心パレル径：6000mm）（ZrH+Hf2層）
15	燃焼度	15万MWd/t（炉心取出平均）以上
16	増殖比	約1.06～1.2
17	原子炉停止系	主：43体、後：12体
18	炉心安全性	SASS+PLAM（2%濃縮Hf吸収材）
19	炉心支持方式	円錐1枚板下部支持
20	炉壁保護構造	保護ライナ構造
21	炉心上部機構	本体胴削除部分昇降式炉心上部機構
22	1次系配管方式	なし
23	中間熱交換器	電磁ポンプ合体型：457MW/基、(φ2.12m、 ^L 5.0m)×8基
24	1次主循環ポンプ	電磁ポンプ：約170m ³ /min(40mNa)×8基
25	蒸気発生器	電磁ポンプ合体ヘリカル：950MW/基(φ4.5m、 ^L 9.0m)×4基
26	2次主循環ポンプ	電磁ポンプ：約280m ³ /min(40mNa)×4基
27	崩壊熱除去方式	4 IRACS (24MW)+2 DRACS (12MW)
28	Na漏えい対策	容器；ガードベッセル、配管；エンクロージャ
29	原子炉格納施設	鋼製格納容器（φ13.5m、 ^H 30m）：炉上部ドーム+ガードベッセル
30	プラント運転サイクル	プラント運転サイクル18ヶ月、5バッチ方式
31	①燃料減衰待貯蔵	炉内燃料貯蔵(IVS)方式
32	②炉内燃料交換	部分昇降式UIS+アーム式マニプレータFHM
33	③炉内/外燃料移送	炉内中継装置+燃料移送機
34	免震	3次元免震
35	プラント寿命	標準60年（80年目標）
37	原子炉建屋	54.8m×41m× ^H 55m、約12万m ³ （ツインプラント）

4. 起因事象評価

起因事象とはそれが発生したときにその影響を緩和する安全設備の機能がすべて喪失すると炉心損傷に至り、さらに格納機能が損なわれた場合には放射性物質の放出に至る可能性のある事象である。ここでは、崩壊熱除去系が必要となる起因事象を崩壊熱除去系の運転モードにより分類した後、それぞれの発生頻度を定量化する。

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している。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ている。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 起因事象と崩壊熱除去モードについて

以下に崩壊熱除去系の起動を要求する起因事象と起因事象発生時の崩壊熱除去系の運転モードについて説明する。

① 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生する事象である。冷却系統には異常がないので崩壊熱除去にはすべての冷却ループが使用できる。

② 1次主冷却系漏えい

1次主冷却系機器・配管から冷却材が漏えいする事象である。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生し、原子炉トリップ信号が発生する事象である。漏えいの発生した当該ループは崩壊熱除去にはFC、NC両モードとも使用できないものとした。ただし、本検討で取り上げた概念はすべて二重管化等の漏えい対策が採用されており、今後運用について検討することにより「全ループ使用可能」に区分される可能性がある。

③ DRACS 漏えい (DRACS 採用ループのみ)

DRACS のみで使用している機器・配管から冷却材が漏えいする事象である。漏えいの発生した DRACS は崩壊熱除去にはFC、NC両モードとも使用できないものとした。

④ 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又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生する事象である。1次主冷却系循環ポンプが回転式ポンプである場合は、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

ためにすべての冷却ループが使用可能である。電磁ポンプの場合でも、定格運転流量が確保できないものの崩壊熱除去運転には使用可能である場合がこの事象に相当する。この場合でも同様にすべての冷却ループが使用可能である。

⑤ 1次主冷却系強制循環能力喪失

回転式ポンプの軸固着事故等により1次主冷却系循環ポンプが機能喪失し、1次主冷却系の流量が低下してトリップ信号を発生する事象である。当該ループではNCモードのみ可能である。

⑥ 2次主冷却系流量減少

2次主冷却系循環ポンプの主モータが故障又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生する事象である。④と同様の理由ですべての冷却ループが使用可能である。

⑦ 2次主冷却系強制循環能力喪失

2次主冷却系循環ポンプの機能喪失や蒸気発生器水漏えい誤信号等によって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生する事象である。IRACSの場合は当該ループのNCモードのみ可能である。PRACSの場合は2次主冷却系と独立しているのでFCモードも可能である。

⑧ 2次主冷却系漏えい

2次主冷却系機器・配管からの冷却材漏えい、及び2次冷却系誤ドレン事象が含まれる。IRACSの場合は漏えいの発生した当該ループはFC、NC両モードとも使用できないが、PRACSの場合は2次主冷却系と独立しているので両モードとも使用できる。ただし、本検討で取り上げた概念はすべて二重管化等の漏えい対策が採用されており、今後運用について検討することにより、IRACSを採用している概念であっても部分的に(2次冷却系誤ドレン事象等は除いて)「全ループ使用可能」に区分される可能性がある。

⑨ 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生し、原子炉トリップ信号が発生する。ここでディーゼル発電機の起動に失敗すると、失敗したディーゼル発電機にサポートされる冷却ループでFCモードが不能となる。ディーゼル発電機による非常用電源が起動すればすべての冷却ループが使用できる。

⑩ 給水流量喪失

給水の漏えい、各種止め弁の誤閉、各種蒸気逃がし弁の誤開、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を発生する。崩壊熱除去にはすべての冷却ループが使用できる。

⑪ タービントリップ

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生する事象である。崩壊熱除去にはすべての冷却ループが使用できる。

⑫ 蒸気発生器伝熱管破損

この事象が発生すると、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。ナトリウム水反応の抑制方法が一律でないこと、及び、ナトリウム水反応の進展を抑制できない場合は1次主冷却系にも影響を及ぼす可能性があることから、保守的な評価となるように蒸気発生器伝熱管破損が発生したループはFC、NC両モードとも使用できないものとした。なお、PRACSについては2次系と分離されているシステムであることから、運用を検討することにより「全ループ使用可能」に区分される可能性がある。

⑬ 局所燃料破損

燃料の過出力や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。崩壊熱除去にはすべての冷却ループが使用できる。

⑭ 原子炉トリップ

誤信号、運転員の誤操作による手動原子炉トリップ又は直接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。崩壊熱除去にはすべての冷却ループが使用できる。

⑮ PRACS 漏えい (PRACS 採用ループのみ)

PRACS のみで使用している機器・配管から冷却材が漏えいする事象である。漏えいの発生した PRACS は崩壊熱除去には使用できない。

以上の 15 種類の起因事象が発生したときの崩壊熱除去系の運転モードを整理すると、つぎの 5 種類になる。

D1 全ループ使用可能

D2 IRACS (又は PRACS) 1ループの FC モードのみ使用不可能

D3 IRACS (又は PRACS) 1ループの FC、NC 両モード使用不可能

D4 DRACS 1ループの FC、NC 両モード使用不可能

D5 外部電源喪失事象

そして、評価対象概念別に起回事象と上記5種類の崩壊熱除去系の運転モードとの対応関係をまとめたものを表4.1に示す。

4.2 起回事象の定量化

前項の起回事象に対する1炉年当たりの発生頻度を定量化する。定量化にあたり、今回は概略評価の位置付けであるため、大型Na冷却FBRプラントに対する先行評価例である参考文献[3]を基にした。参考文献[3]では定量化の手法として、第1に機器故障率データとプラント概念の機器数、配管長さ、稼働率等から発生頻度を算出する方法（これを「一般的な方法」とする）、第2に国内原子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（これを「グローバル法」とする）がある。今回の評価では、上記の評価のうち第2のものを優先的に使用し、第2の評価法を適用できない場合に第1の評価法を用いている。「DRACS漏えい」と「PRACS漏えい」のデータは表4.2（参考文献[3]表4.1.2-2）の「1次メンテナンス冷却系漏えい」のデータを使用した。また、「1次主冷却系配管漏えい」、「2次主冷却系配管漏えい」、「1次主冷却系ポンプ故障/トリップ」、「2次主冷却系ポンプ故障/トリップ」、「1次主冷却系強制循環能力喪失」、「2次主冷却系強制循環能力喪失」、「2次主冷却系流量減少」、「DRACS漏えい」及び「PRACS漏えい」による起回事象の発生頻度は、崩壊熱除去系のループ数に比例していることを考慮した。表4.1にこれらのまとめとして、各起回事象を崩壊熱除去系の運転モードによって5つに分類し、発生頻度とともにまとめたものを示す。

表 4.1 評価対象概念の起因事象発生頻度概算値

ループ型(1次系機器合体・ループ数削減)

	崩壊熱除去系の運転モード	起因事象名	発生頻度(/炉年)	モード別計(/炉年)
D1	全ループ使用可能	正の反応度投入	2.8E-2	1.5E+0
		1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	4.8E-2	
		2次主冷却系流量減少	3.3E-1	
		給水流量喪失	3.1E-1	
		タービントリップ	1.9E-1	
		局所的燃料破損	3.0E-4	
		原子炉トリップ	5.7E-1	
D2	IRACS 1ループ FCモード不能	1次主冷却系強制循環能力喪失	4.8E-2	8.2E-2
		2次主冷却系強制循環能力喪失	3.4E-2	
D3	IRACS 1ループ FC、NC両モード不能	1次主冷却系漏えい	1.1E-3	9.1E-3
		2次主冷却系漏えい	3.5E-3	
		蒸気発生器伝熱管破損	4.5E-3	
D4	DRACS1ループ不能	DRACS漏えい	7.2E-4	7.2E-4
D5	外部電源喪失	外部電源喪失	5.2E-2	5.2E-2

タンク型(2次系機器合体・ループ数削減)

	崩壊熱除去系の運転モード	起因事象名	発生頻度(/炉年)	モード別計(/炉年)
D1	全ループ使用可能	正の反応度投入	2.8E-2	1.7E+0
		1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	7.2E-2	
		2次主冷却系流量減少	4.9E-1	
		給水流量喪失	3.1E-1	
		タービントリップ	1.9E-1	
		局所的燃料破損	3.0E-4	
		原子炉トリップ	5.7E-1	
		2次主冷却系強制循環能力喪失	5.1E-2	
		2次主冷却系漏えい	5.3E-3	
D2	PRACS 1ループ FCモード不能	1次主冷却系強制循環能力喪失	7.2E-2	7.2E-2
D3	PRACS 1ループFC、 NC両モード不能	1次主冷却系漏えい	1.6E-3	9.1E-3
		蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-3	
		PRACS漏えい	7.2E-4	
D5	外部電源喪失	外部電源喪失	5.2E-2	5.2E-2

タンク型(機器合体・集中配置)

	崩壊熱除去系の運転モード	起因事象名	発生頻度(/炉年)	モード別計(/炉年)
D1	全ループ使用可能	正の反応度投入	2.8E-2	1.8E+0
		1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	9.6E-2	
		2次主冷却系流量減少	6.5E-1	
		給水流量喪失	3.1E-1	
		タービントリップ	1.9E-1	
		局所的燃料破損	3.0E-4	
		原子炉トリップ	5.7E-1	
D2	IRACS 1ループ FCモード不能	1次主冷却系強制循環能力喪失	9.6E-2	1.6E-1
		2次主冷却系強制循環能力喪失	6.8E-2	
D3	IRACS 1ループ FC、NC両モード不能	1次主冷却系漏えい	2.1E-3	1.8E-2
		2次主冷却系漏えい	7.1E-3	
		蒸気発生器伝熱管破損	9.1E-3	
D4	DRACS1ループ不能	DRACS漏えい	1.4E-3	1.4E-3
D5	外部電源喪失	外部電源喪失	5.2E-2	5.2E-2

表 4.2 参考 大型炉起因事象発生頻度 (参考文献[3]表 4.1.2-2)

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
正の反応度挿入	2.8E-02		2.8E-02
1次主冷却系漏えい	1.6E-03		1.6E-03
1次メンテナンス冷却系漏えい	7.2E-04		7.2E-04
1次主冷却系循環ポンプ故障/トリップ	6.7E-01	7.2E-02	7.2E-02
1次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ)	1.8E-01	7.2E-02	7.2E-02
1次主冷却系逆止弁閉 (1ループ)	3.2E-03		3.2E-03
2次主冷却系流量減少	2.7E+00	4.9E-01	4.9E-01
2次主冷却系強制循環能力喪失 (1ループ)	5.1E-02		5.1E-02
2次主冷却系漏えい	5.3E-03		5.3E-03
外部電源喪失	1.1E-01	5.2E-02	5.2E-02
給水流量喪失	4.7E+00	3.1E-01	3.1E-01
タービントリップ	2.0E+00	1.9E-01	1.9E-01
蒸気発生器伝熱管破損	6.8E-03		6.8E-03
局所的燃料破損	3.0E-04		3.0E-04
原子炉トリップ	3.5E+00	5.7E-01	5.7E-01
合計	1.4E+01	1.8E+00	1.9E+00

5. 評価モデルの設定

ここでは、2. で述べたように、評価対象概念の設計情報をもとにして崩壊熱除去機能喪失確率を算出できるように崩壊熱除去系の構成をモデル化する。具体的には、複数機器を役割で分類してその役割の喪失事象確率をマクロイベント発生確率として整理し、マクロイベントの従属関係を評価対象概念の崩壊熱除去にかかわる系統についてモデル化し、崩壊熱除去に失敗する確率を計算コードにより算出できるようにデータを作成する。

5.1 評価対象概念の崩壊熱除去系に対する失敗基準の設定

原子炉プラントにおいて、炉停止後の崩壊熱は時間の経過とともに変化するため、崩壊熱除去系の失敗基準もそれに伴い変化するのが一般的である。しかし本研究では、評価対象の設計が概念レベルの段階であることを考慮し、崩壊熱除去能力を最大に要求する時、すなわち炉停止直後における失敗基準を設定し、その基準による信頼度評価を行うものとした。

前項で述べた各評価対象概念の崩壊熱除去系に関する暫定的な設計情報を基に、崩壊熱除去系の失敗基準を定める。失敗基準は除熱ループの除熱容量を足し合わせても 100%に満たないこととして表される。そして、具体的な失敗基準は、表 4.1 に示した起因事象に対応付けられた崩壊熱除去系の運転モードごとに定められる。

- D1 全ループ使用可能
- D2 IRACS (又は PRACS) 1 ループの FC モードのみ使用不可能
- D3 IRACS (又は PRACS) 1 ループの FC、NC 両モード使用不可能
- D4 DRACS 1 ループの FC、NC 両モード使用不可能
- D5 外部電源喪失事象

以下に失敗基準を定めた結果を記す。なお、「5.1.3 タンク型 (機器合体・集中配置)」は強制循環冷却と自然循環冷却のループ数の組合せ数が他の評価対象プラントよりも多いため、失敗基準はより複雑になる。

また、過去の経験から、設計マージンがあるため、実機の崩壊熱除去系の除熱容量が設計値を上回ることが確実である。このような実機の性能ベースの評価ではここで定めた失敗基準が緩和され、より少ないループ数で除熱成功となることが予想できる。

5.1.1 ループ型 (1 次系機器合体・ループ数削減)

(1) 崩壊熱除去系の冷却方式構成

IRACS 2 基 (FC : 100%、NC : 100/3%) A、B ループ

DRACS 1 基 (FC : 100%、NC : 100/3%) D ループ

(括弧内は 1 基が具備する除熱能力を必要除熱量の百分率で表した数値である。)

また、FCは強制循環除熱を、NCは自然循環除熱を意味する。）

(2) 運転モードごとの失敗基準

- D1 冷却ループ3ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D2 冷却ループ2ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D3 冷却ループ2ループのFC失敗
- D4 IRACS2ループのFC失敗
- D5 冷却ループ3ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗

(3) その他

DRACSのFCモード運転には、2基ある1次系主循環ポンプのポニーモータによる1次冷却材の強制循環を必要とし、2基のポニーモータの機能喪失によりDRACSのFCモードも不能になると仮定した。

5.1.2 タンク型（2次系機器合体・ループ数削減）

(1) 崩壊熱除去系の冷却方式構成

PRACS 3基 (FC:100%、NC:100/3%) A~Cループ

(2) 運転モードごとの失敗基準

- D1 PRACS 3ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D2 PRACS 2ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D3 PRACS 2ループのFC失敗
- D4 (DRACSなしのため対象となる運転モード自体が存在しない)
- D5 PRACS 3ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗

5.1.3 タンク型（機器合体・集中配置）

(1) 崩壊熱除去系の冷却方式構成

IRACS 4基 (FC:50%、NC:25%) A~Dループ

DRACS 2基 (FC:25%) E、Fループ

DRACSのNCモードは、今回のような最大除熱能力による評価では信頼度向上に寄与しないのが特徴。実際は時間経過により必要除熱容量が低下するため、炉停止後の時間経過も考慮することで有用性が確認されることもありうる。

(2) 運転モードごとの失敗基準

D1 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 25%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D11	4 失敗	3 失敗以上	
D12	4 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D13	4 失敗	1 失敗	2 失敗
D14	3 失敗	3 失敗	1 失敗以上
D15	3 失敗	2 失敗	2 失敗

D2 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×3 ループ	IRACS NC モード 25%×FC 失敗ループ+1	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D21	3 失敗	3 失敗以上	
D22	3 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D23	3 失敗	1 失敗	2 失敗
D24	2 失敗	2 失敗	2 失敗
D25	2 失敗	3 失敗	1 失敗以上

D3 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×3 ループ	IRACS NC モード 25%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D31	3 失敗	2 失敗以上	
D32	3 失敗	1 失敗	1 失敗以上
D33	3 失敗		2 失敗
D34	2 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D35	2 失敗	1 失敗	2 失敗

D4 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 25%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×1 ループ
D41	4 失敗	2 失敗以上	
D42	4 失敗	1 失敗	1 失敗
D43	3 失敗	3 失敗	
D44	3 失敗	2 失敗	1 失敗

D5 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 25%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D51	4 失敗	3 失敗以上	
D52	4 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D53	4 失敗	1 失敗	2 失敗
D54	3 失敗	3 失敗	1 失敗以上
D55	3 失敗	2 失敗	2 失敗

(3) その他

DRACS の FC モード運転には 1 次系主循環ポンプのポニーモータによる 1 次冷却材の強制循環を必要とする。DRACS E ループは A 及び C ループの、DRACS F ループは B 及び D ループのポニーモータ失敗により DRACS の FC モードも不能になると仮定した。

5.2 サポートシステムの機能従属関係の設定

ここでは、崩壊熱除去系の電源や機器冷却系等のサポートシステムについて機能従属関係を設定する。

現段階の対象概念ではサポートシステムの系統構成がほとんど検討されていないことから、信頼度評価のためにこれらの系統構成を適切に設定することが必要である。そこで、非常用のサポートシステムについては、実証炉設計に倣って 2 系統構成とした。そして、詳細な機器構成については既存の研究（参考文献[3]）を参考に設定した。

崩壊熱除去系のサポートシステムとして以下を仮定した。

非常用電源系（ポニーモータ、ブロワ等 FC モードに関する駆動電源）

無停電電源系（ダンパ、ベーン等 NC モードに関する駆動電源）

補機冷却系（ポニーモータ、電磁ポンプ等 FC モードに関する機器冷却）

上記の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ように設定した。

非常用電源系は、外部電源又は非常用ディーゼル発電機のいずれか一方を必要とする。

無停電電源系は非常用電源系又はバッテリー電源のいずれか一方を必要とする。

補機冷却系は非常用電源系と補機冷却水系の両者を必要とする。

補機冷却水系は非常用電源系と補機冷却海水系の両者を必要とする。

補機冷却海水系は非常用電源系を必要とする。

非常用ディーゼル発電機は補機冷却海水系を必要とする。

以下、評価対象概念ごとに仮定したサポートシステムに関する特徴をまとめる。なお、これらのサポートシステム従属関係は後述するフロントラインシステムと併せて評価対象概念ごとに図 5.1～図 5.3 に図示する。これらの図は、2. で述べたように、マクロイベントを単位としてフォールトツリーの様式で機能従属関係を示している。すなわち、図中の英数字で表した記号（その中で下線を引いた記号はマクロイベントである）は、系統・機器の機能喪失を表している。あるマクロイベントが発生したときには、矢印の方向に沿って従属故障イベントが発生することになる。表 5.1～表 5.3 に従属関係図で使用されているマクロイベント名の説明を示す。

5.2.1 ループ型（1次系機器合体・ループ数削減）（図 5.1）

サポートシステムは2つの独立な補機冷却系（A、B）と2つの独立な非常用電源系（A、B）及び無停電電源系（A、B）で構成される。補機冷却系、非常用電源系及び無停電電源系はそれぞれ1ループのIRACSとDRACSをサポートする。DRACSは両方の補機冷却系、非常用電源系及び無停電電源系からサポートを受けることができる。

5.2.2 タンク型（2次系機器合体・ループ数削減）（図 5.2）

サポートシステムは2つの独立な補機冷却系（A、B）と2つの独立な非常用電源系（A、B）及び無停電電源系（A、B）で構成される。補機冷却系、非常用電源系及び無停電電源系はそれぞれ1ループのPRACS（A又はB）とPRACS（C）をサポートする。PRACS（C）は両方の補機冷却系、非常用電源系及び無停電電源系からサポートを受けることができる。

5.2.3 タンク型（機器合体・集中配置）（図 5.3）

2つの独立なサポートシステム（A、B）があり、それぞれが2ループのIRACSと1ループのDRACSをサポートする。

5.3 フロントラインシステムの機能従属関係の作成

崩壊熱除去に直接かかわる機器類をサポートシステムに対してフロントラインシステムと呼ぶ。フロントラインシステムの機能喪失は、除熱モードの観点から、(1)FCモードのみを阻害する事象、(2)NCモードのみを阻害する事象、そして(3)FC、NC両モードを阻害する事象に分けられる。

- (1) FCモードのみを阻害する事象は、冷却ループのポニーモータやブロワ等、動的機器の機能喪失により発生する。また、サポートシステムである補機冷却系統の機能喪失又は非常用電源系統の機能喪失によっても発生する。
- (2) NCモードのみを阻害する事象は、FCモードからNCモードに移行するための信号系が機能喪失したときに発生する。
- (3) FC、NC両モードを阻害する事象は、冷却材流路の形成に必要な機能の喪失

である。具体的には、冷却ループのベーン、ダンパ等の開不能、バウンダリ破損等、静的機器の機能喪失により発生する。また、ベーン、ダンパへ電力を供給する無停電電源系統の機能喪失でも発生する。

これらを基に、フロントラインシステムの機能従属関係を作成した。以下に各評価対象プラントのフロントラインシステムの特徴をまとめる。

また、各評価対象プラントの冷却ループ失敗を表すブール代数式も併せて示す(表 5.4～表 5.6)。これらのブール代数式は機能従属関係からブール代数式表現にしたものである。

5.3.1 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) (図 5.1)

設計情報によると、DRACS の FC モードは 1 次系ポニーモータの起動を要求する。このため IRACS の FC モードを阻害する事象のうち、DRACS の FC モードに関係がある事象 (1 次系ポニーモータ起動失敗等) を分離してマクロイベントを定義した。そして、このマクロイベントが 2 ループ同時に生じたときに、DRACS の FC モードも阻害されるという関係を明確にモデル化した。

5.3.2 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) (図 5.2)

3 ループの PRACS (A～C) は、フロントラインシステムの機能についてループ間における従属関係は存在せず、完全に独立であると想定した。

5.3.3 タンク型 (機器合体・集中配置) (図 5.3)

4 ループの IRACS (A～D) のうち、2 ループは DRACS (E、F) と空気冷却器の一部を共用している。共用しているループを A と E、そして B と F に設定した。共用部分はブロワ、ベーン、ダンパであり、伝熱管は共用していない。

DRACS の FC モードは 1 次系ポンプ運転を要求すると仮定し、DRACS E は IRACS A、C の 1 次系ポンプのどちらか一方が起動していること、DRACS F は IRACS B、D の 1 次系ポンプのどちらか一方が起動していることを要求するものとした。

5.4 定量値データの設定

5.4.1 機器の故障率データ

各機器の故障率データは、基本的には原子力安全研究協会が国内軽水炉の実績を詳細に調査分析しながら整備を進めた「評価済み PSA 用機器故障率データベース」^[1] (以下、「原安協データ」) を基に設定した。ただし、ナトリウム機器の故障率データの設定に当たっては参考文献[4][5]を参考にした。

起動時故障確率については、待機時故障率 λ_0 が得られている場合、試験間隔又は故障通報時間 T_0 を仮定し、次式により起動時故障率 Q_d を求めた。

$$Q_d = \frac{1}{2} \lambda_s T_d$$

T_d は基本的に次のように定めた。

- ・ 原子炉の運転時に運転中の機器は、故障通報時間を1時間とする。ただし定期パトロールにより発見されるものについては8時間とする。
- ・ 原子炉の運転時に待機中の機器は、試験間隔を720時間(1ヶ月)とする。ただし定期パトロールにより発見されるものについては8時間とする。

各機器の故障モード及び定量値データをマクロイベントごとにまとめ、表 5.7 及び表 5.8 に示す。なおこれらの表には、比較用に参考文献[3]で使用されたデータ(以下、「大型FBR評価データ」)も同時に掲載した。また、評価対象プラントによって崩壊熱除去系の詳細設計仕様に差が生じることが予想されるので、マクロイベントを構成する機器及び事象はプラントによって異なると考えられるが、ここでは同じ種類の機器故障率には同一の値を設定した。

5.4.2 マクロイベントに対する発生確率

マクロイベントは、起動時の故障と起動後の運転時における故障に分けられる。このとき、前者の発生確率(Q_d)と後者の発生率(λ)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。さらに、マクロイベントの発生確率は、使命時間 T を用いて、 $Q_d + \lambda T$ と表される。使命時間は、24時間、168時間(1週間)及び720時間(1ヶ月)の3種類で算出した。異なる使命時間で評価した値に大きな差が無ければそのマクロイベントは起動時故障が支配的であり、ほぼ時間に比例して故障率が変化していれば運転時故障が支配的であると言える。評価対象概念ごとのマクロイベントの発生確率を表 5.9～表 5.11 に示す。

現実的には、崩壊熱除去が最大限要求される厳しい時間は炉停止後数時間と考えられ、それ以降の崩壊熱除去に成功する条件は緩和される。そのため使命時間を1週間以上に設定することは安全上保守側の評価と言える。

5.4.3 定量値データに関する注意点

(1) 外部電源

外部電源の喪失はマクロイベントOSPでモデル化されているが、その中で定義されている機器「送電線」の故障率については、対応するデータが原安協データに見られなかったため、大型FBR評価データと同じものを使用した。

(2) 伝熱管閉塞とベーン・ダンパの誤作動について

一般に、ポンプやファンなど可動部を持つ動的機器は、配管や熱交換器などの可動部のない静的機器よりも故障率が大きいと言われている。このために、FC、NC両モードを阻害する事象としては、配管からの漏えいや閉塞よりもベーン・ダ

ンパの誤動作が支配的な故障であるとの認識が一般的である。しかし本評価においては、静的機器の故障で最も確率の大きい伝熱管閉塞（時間故障率 $1.5 \times 10^{-7}/\text{hr}$ ）と、動的機器の故障であるベーン・ダンパの誤動作（時間故障率 $3.6 \times 10^{-9}/\text{hr}$ ）とを比較してみると、伝熱管閉塞の確率が大きくなっている。ただしこれはどちらも 0 件故障のデータが基となっており、確率の違いは母集団の大きさの違いと認識すべきである。

(3) ケーブル、配管等の扱い

原安協データでは、機器間の 1 セクションあたりの故障率として整理しており、大型 FBR 評価データの 1 フィートあたりの故障率とは異なっている。現段階ではケーブル及び配管の詳細仕様が決定されていないことから、本評価では保守的の評価となるように、機器間のセクション数として次の値を定めた。

電源系統のケーブル	30
その他	10

表 5.7 及び表 5.8 で該当する数値は、上記の値で原安協データを整数倍したものである。

(4) 冷凍機の取扱い

冷凍機は補機冷却系統 CCWS (A、B) でモデル化されているが、原安協データには「冷凍機」のデータは掲載されていない。冷凍機を構成する機器の故障率から考えると、故障モードとして支配的と推定されるのは圧縮機の故障と伝熱管の閉塞である。圧縮機は電動ポンプのデータを、伝熱管閉塞は熱交換器のデータを使用し、両者の和を表中の値とした。

(5) タンク型（機器合体・集中配置）の FNNR (A-D) 中の電動弁について

本電動弁の役割は、崩壊熱除去運転時には閉動作を要求される機器と推定し、故障モードには閉塞を考慮しなかった。

(6) マクロイベント「CV」「BRKUPS」「BRKE1」

表記マクロイベントは 2 つあるサポートシステムの両方からサポートを受けることができる機器について、その切換機能の役割を持たせているものである。これらの機器の試験間隔は他の機器と比較して非常に長期間になると考えられることから、 T_d を 1 年に相当する 8760 時間と定めた。

表 5.1 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) のマクロイベント説明

サポートシステム	
OSP	外部電源の喪失
DG(A, B)	非常用ディーゼル発電機 (A, B) の機能喪失
E(A, B)1	非常用電源系 (A, B) の電源母線、遮断器等の機能喪失
BAT(A, B)	無停電電源系 (A, B) (バッテリー) の機能喪失
CSSS(A, B)	補機冷却海水系 (A, B) の機能喪失
CCWS(A, B)	補機冷却水系 (A, B) の機能喪失
HVAC(A-F)	補機冷却系、換気空調系等 (A-F) の機能喪失
CV	補機冷却水系の切換機能喪失
BRK(E1, UPS)	電源系の切換機能喪失
フロントラインシステム	
FC1(A, B, D)	崩壊熱除去系当該ループ (A, B, D) の FC モードを阻害する事象で、他のループに影響を与えないもの (例: プロワ、2次系ポニーモータ、空気冷却器 Na ポンプ等の故障)
FC2(A, B)	崩壊熱除去系当該ループ (A, B) の FC モードを阻害する事象で、DRACS の FC モードに影響を与えるもの (例: 1次系ポニーモータ等の故障)
FNNR(A, B, D)	崩壊熱除去系当該ループ (A, B, D) の FC、NC 両モードを阻害する事象で、修復を考慮できないもの (例: バウンダリ破損、管閉塞等)
FNR(A, B, D)	崩壊熱除去系当該ループ (A, B, D) の FC、NC 両モードを阻害する事象で、修復を考慮できるもの (例: ベーン、ダンパ等の故障)
NC(A, B, D)	崩壊熱除去系当該ループ (A, B, D) の NC モードのみ阻害する事象 (例: NC モード起動信号失敗等)

表 5.2 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) のマクロイベント説明

サポートシステム	
OSP	外部電源の喪失
DG(A、B)	非常用ディーゼル発電機(A、B)の機能喪失
E(A、B)1	非常用電源系(A、B)の電源母線、遮断器等の機能喪失
BAT(A、B)	無停電電源系(A、B)(バッテリー)の機能喪失
CSSS(A、B)	補機冷却海水系(A、B)の機能喪失
CCWS(A、B)	補機冷却水系(A、B)の機能喪失
HVAC(A-C)	補機冷却系、換気空調系等(A-C)の機能喪失
CV	補機冷却水系の切換機能喪失
BRK(E1、UPS)	電源系(非常用電源系、無停電電源系)の切換機能喪失
フロントラインシステム	
FCI(A-C)	崩壊熱除去系当該ループ(A-C)のFCモードを阻害する事象(例:プロワ、ポニーモータ、空気冷却器Naポンプ等の故障)
FNNR(A-C)	崩壊熱除去系当該ループ(A-C)のFC、NC両モードを阻害する事象で、修復を考慮できないもの(例:バウンダリ破損、管閉塞等)
FNR(A-C)	崩壊熱除去系当該ループ(A-C)のFC、NC両モードを阻害する事象で、修復を考慮できるもの(例:ベーン、ダンパ等の故障)
NC(A-C)	崩壊熱除去系当該ループ(A-C)のNCモードのみ阻害する事象(例:NCモード起動信号失敗等)

表 5.3 タンク型（機器合体・集中配置）のマクロイベント説明

サポートシステム	
OSP	外部電源の喪失
DG (A, B)	非常用ディーゼル発電機 (A, B) の機能喪失
E (A, B) 1	非常用電源系 (A, B) の電源母線、遮断器等の機能喪失
BAT (A, B)	無停電電源系 (A, B) (バッテリー) の機能喪失
CSSS (A, B)	補機冷却海水系 (A, B) の機能喪失
CCWS (A, B)	補機冷却水系 (A, B) の機能喪失
HVAC (A-F)	補機冷却系、換気空調系等 (A-C) の機能喪失
フロントラインシステム	
FC1 (A-F)	崩壊熱除去系当該ループ (A-F) の FC モードを阻害する事象で、他のループに影響を与えないもの (例: 2 次系ポニーモータ、空気冷却器 Na ポンプ等の故障)
FC2 (A-D)	崩壊熱除去系当該ループ (A-D) の FC モードを阻害する事象で、DRACS の FC モードに影響を与えるもの (例: 1 次系ポニーモータ等の故障)
FC3 (A-D)	崩壊熱除去系当該ループ (A-D) の FC モードを阻害する事象で、DRACS の FC モードも阻害する事象又はそれと同等の構成機器の機能喪失事象 (例: 空気冷却器ブロワ等の故障)
FNNR (A-F)	崩壊熱除去系当該ループ (A-F) の FC、NC 両モードを阻害する事象で、修復を考慮できないもの (例: バウンダリ破損、管閉塞等)
FNR (A-D)	崩壊熱除去系当該ループ (A-D) の FC、NC 両モードを阻害する事象で、修復を考慮できるもの (例: ベーン、ダンパ等の故障)
NC (A-F)	崩壊熱除去系当該ループ (A-F) の NC モードのみ阻害する事象 (例: NC モード起動信号失敗等)

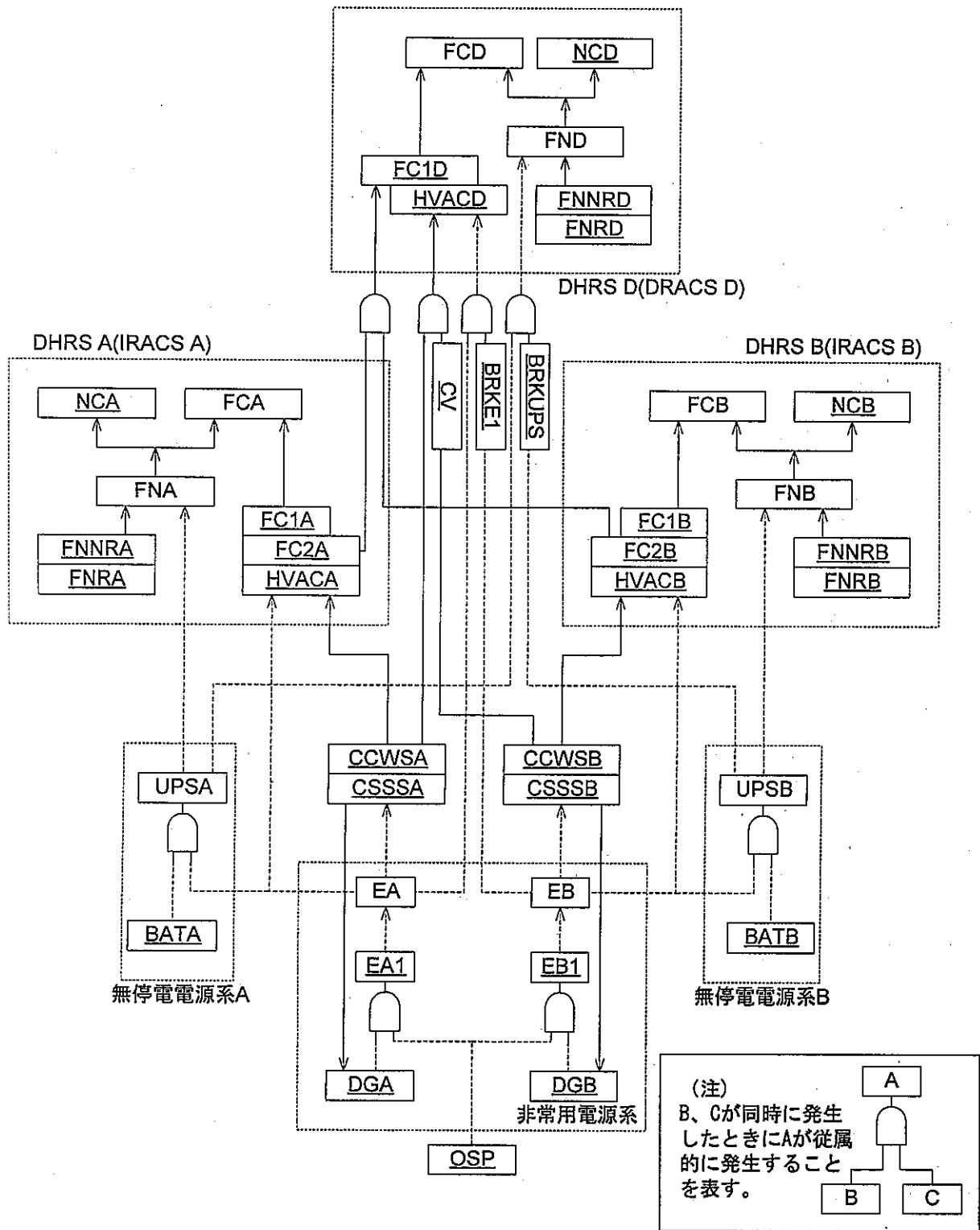


図 5.1 崩壊熱除去系機能従属関係(1)
 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

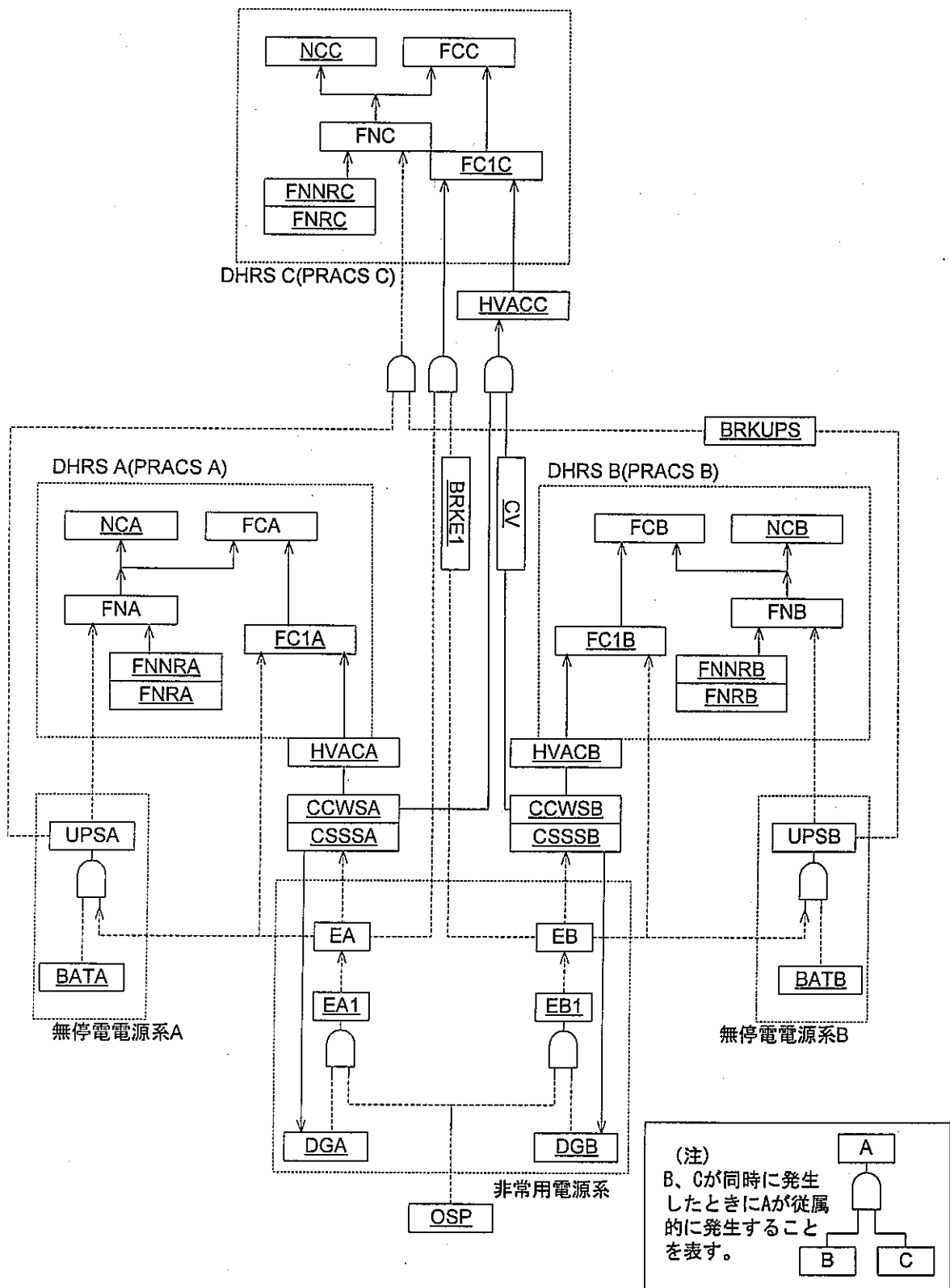


図 5.2 崩壊熱除去系機能従属関係(2)
 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

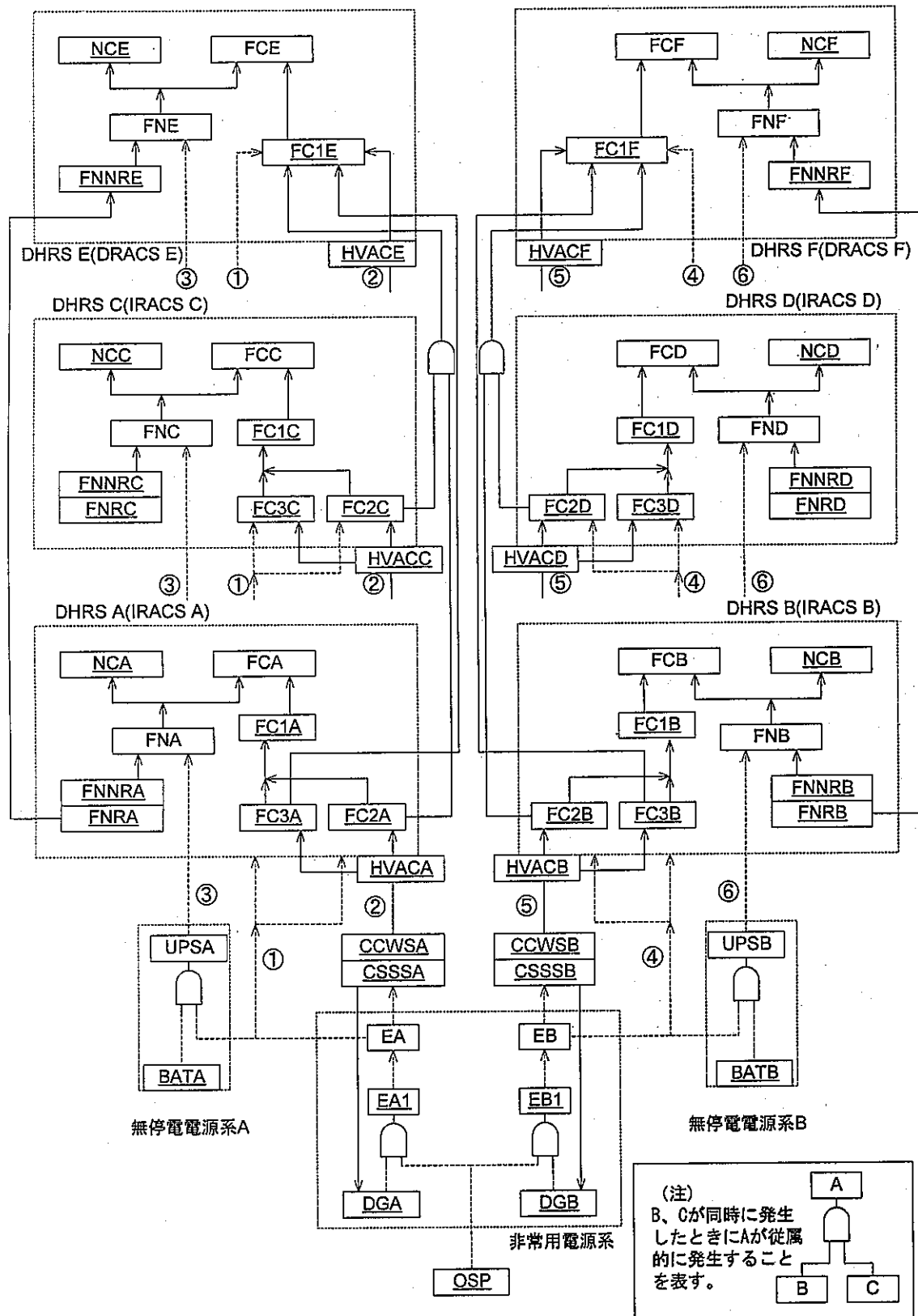


図 5.3 崩壊熱除去系機能従属関係(3)
タンク型 (機器合体・集中配置)

表 5.4 崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(1)
ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

(システムモデル)

$$AFC = FCA + FNA.$$

$$ANC = NCA + FNA.$$

$$BFC = FCB + FNB.$$

$$BNC = NCB + FNB.$$

$$DFC = FCD + FND.$$

$$DNC = NCD + FND.$$

$$FCA = FC1A + FC2A + EA + HVACA + CCWSA + CSSSA.$$

$$FCB = FC1B + FC2B + EB + HVACB + CCWSB + CSSSB.$$

$$FCD = FC1D + FC2A * FC2B + EA * (EB + BRKE1) + HVACD \\ + (CCWSA + CSSSA + EA) * (CCWSB + CSSSB + EB + CV).$$

$$EA = OSP * (DGA + CSSSA) + EA1.$$

$$EB = OSP * (DGB + CSSSB) + EB1.$$

$$FNA = FNNRA + FNRA + UPSA.$$

$$FNB = FNNRB + FNRB + UPSB.$$

$$FND = FNNRD + FNRD + UPSA * (UPSB + BRKUPS).$$

$$UPSA = EA * BATA.$$

$$UPSB = EB * BATB.$$

(失敗基準)

$$D1 = AFC * BFC * DFC * (ANC + BNC + DNC).$$

$$D2 = AFC * DFC * (ANC + BNC + DNC).$$

$$D3 = AFC * DFC.$$

$$D4 = AFC * BFC.$$

$$D5 = AFC * BFC * DFC * (ANC + BNC + DNC). \quad OSP = OMEGA. \quad ※ OMEGA : 常に成立している意味$$

表 5.5 崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(2)
タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

(システムモデル)

$$AFC = FCA + FNA.$$

$$BFC = FCB + FNB.$$

$$CFC = FCC + FNC.$$

$$ANC = NCA + FNA.$$

$$BNC = NCB + FNB.$$

$$CNC = NCC + FNC.$$

$$FCA = FC1A+EA+HVACA+CCWSA+CSSSA.$$

$$FCB = FC1B+EB+HVACB+CCWSB+CSSSB.$$

$$FCC = FC1C+EA*(EB+BRKE1)+HVACC+(CCWSA+CSSSA+EA)*(CCWSB+CSSSB+EB+CV).$$

$$EA = OSP*(DGA+CSSSA)+EA1.$$

$$EB = OSP*(DGB+CSSSB)+EB1.$$

$$FNA = FNNRA+FNRA+UPSA.$$

$$FNB = FNNRB+FNRB+UPSB.$$

$$FNC = FNNRC+FNRC+UPSA*(UPSB+BRKUPS).$$

$$UPSA= EA*BATA.$$

$$UPSB= EB*BATB.$$

(失敗基準)

$$D1 = AFC*BFC*CFC*(ANC+BNC+CNC).$$

$$D2 = AFC*CFC*(ANC+BNC+CNC).$$

$$D3 = AFC*CFC.$$

$$D5 = AFC*BFC*CFC*(ANC+BNC+CNC). \quad OSP=OMEGA.$$

表 5.6 崩壊熱除去系機能従属関係ブール代数式(3)
タンク型 (機器合体・集中配置)

(システムモデル)

$$AFC = FCA + FNA.$$

$$ANC = NCA + FNA.$$

$$BFC = FCB + FNB.$$

$$BNC = NCB + FNB.$$

$$CFC = FCC + FNC.$$

$$CNC = NCC + FNC.$$

$$DFC = FCD + FND.$$

$$DNC = NCD + FND.$$

$$EFC = FCE + FNE.$$

$$FFC = FCF + FNF.$$

$$FCA = FC1A + FC2A + FC3A + EA + HVACA + CCWSA + CSSSA.$$

$$FCB = FC1B + FC2B + FC3B + EB + HVACB + CCWSB + CSSSB.$$

$$FCC = FC1C + FC2C + FC3C + EA + HVACC + CCWSA + CSSSA.$$

$$FCD = FC1D + FC2D + FC3D + EB + HVACD + CCWSB + CSSSB.$$

$$FCE = FC1E + FC2A + FC3A * FC3C + EA + HVACE + CCWSA + CSSSA.$$

$$FCF = FC1F + FC2B + FC3B * FC3D + EB + HVACF + CCWSB + CSSSB.$$

$$EA = OSP * (DGA + CSSSA) + EA1.$$

$$EB = OSP * (DGB + CSSSB) + EB1.$$

$$FNA = FNNRA + FNRA + UPSA.$$

$$FNB = FNNRB + FNRB + UPSB.$$

$$FNC = FNNRC + FNRC + UPSA.$$

$$FND = FNNRD + FNRD + UPSB.$$

$$FNE = FNNRE + FNRA + UPSA.$$

$$FNF = FNNRF + FNRB + UPSB.$$

$$UPSA = EA * BATA.$$

$$UPSB = EB * BATB.$$

(前ページからの続き)

(失敗基準)

$$D1=AFC*BFC*CFC*DFC$$

$$\begin{aligned} & * (ANC*BNC*CNC+ANC*BNC*DNC+ANC*CNC*DNC+BNC*CNC*DNC \\ & + (ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) * (EFC+FFC) \\ & + (ANC+BNC+CNC+DNC) * EFC*FFC) \\ & +AFC*BFC*CFC* (ANC*BNC*CNC* (EFC+FFC) + (ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC) *EFC*FFC) \\ & +AFC*BFC*DFC* (ANC*BNC*DNC* (EFC+FFC) + (ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC) *EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC*DFC* (ANC*CNC*DNC* (EFC+FFC) + (ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC) *EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC*DFC* (BNC*CNC*DNC* (EFC+FFC) + (BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) *EFC*FFC) \end{aligned}$$

$$D2=AFC*BFC*CFC$$

$$\begin{aligned} & * (ANC*BNC*CNC+ANC*BNC*DNC+ANC*CNC*DNC+BNC*CNC*DNC \\ & + (ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) * (EFC+FFC) \\ & + (ANC+BNC+CNC+DNC) * EFC*FFC) \\ & +AFC*BFC* (ANC*BNC*DNC* (EFC+FFC) + (ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC) *EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC* (ANC*CNC*DNC* (EFC+FFC) + (ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC) *EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC* (BNC*CNC*DNC* (EFC+FFC) + (BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) *EFC*FFC) \end{aligned}$$

$$D3=AFC*BFC*CFC* (ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC+ (ANC+BNC+CNC) * (EFC+FFC) +EFC*FFC)$$

$$\begin{aligned} & +AFC*BFC* (ANC*BNC* (EFC+FFC) + (ANC+BNC) *EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC* (ANC*CNC* (EFC+FFC) + (ANC+CNC) *EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC* (BNC*CNC* (EFC+FFC) + (BNC+CNC) *EFC*FFC) \end{aligned}$$

$$D4=AFC*BFC*CFC*DFC$$

$$\begin{aligned} & * (ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC+ (ANC+BNC+CNC+DNC) *EFC) \\ & +AFC*BFC*CFC* (ANC*BNC*CNC+ (ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC) *EFC) \\ & +AFC*BFC*DFC* (ANC*BNC*DNC+ (ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC) *EFC) \\ & +AFC*CFC*DFC* (ANC*CNC*DNC+ (ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC) *EFC) \\ & +BFC*CFC*DFC* (BNC*CNC*DNC+ (BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) *EFC) \end{aligned}$$

$$D5=D1. \text{ OSP}=\text{OMEGA.}$$

表 5.7 フロントラインシステムマクロイベントの構成機器と故障率データ
表中記号等説明

故障モード

- UA : ディマンド故障のみ考慮する故障モード
- UR : 時間故障のみ考慮する故障モード

故障率データ

- Qd : ディマンド故障確率
- Ta : 故障通報時間間隔又は試験間隔
- λ : 時間故障率 (Qdとなっている場合はディマンド故障確率値をディマンド故障データより引用したことを示す。)

備考欄

- 原 : 原安協データのみ記載。大型 FBR データは該当無し。
- F : 大型 FBR データのみ記載。原安協データは該当無し。

ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

マクロイベント名:FCI(A, B)(FCモードのみに関係する系統:IRACS)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
2次系ポンプ (ボニーモータ)	起動失敗(UA)	1.0E-3	3.3E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-5	1.2E-5	
ACポンプ (電磁ポンプ)	起動失敗(UA)	4.0E-4	3.6E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-6	5.0E-6	
プロア	起動失敗(UA)	2.0E-4	1.5E-5	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				5.0E-6	2.4E-7	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器(3個)	作動失敗(UA)	8.6E-4	2.7E-5	720			
	誤動作(誤開)(UR)				2.4E-6	8.7E-8	
合計		4.7E-3	7.3E-4		5.8E-5	1.7E-5	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	6.1E-3	1.2E-3
使命時間1週間	168	1.4E-2	3.6E-3
使命時間1ヶ月	720	4.6E-2	1.3E-2

マクロイベント名:FCID(FCモードのみに関係する系統:DRACS)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
ACポンプ (電磁ポンプ)	起動失敗(UA)	4.0E-4	3.6E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-6	5.0E-6	
プロア	起動失敗(UA)	2.0E-4	1.5E-5	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				5.0E-6	2.4E-7	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器(2個)	作動失敗(UA)	5.8E-4	1.8E-5	720			
	誤動作(誤開)(UR)				1.6E-6	5.8E-8	
合計		3.4E-3	3.9E-4		1.7E-5	5.3E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	3.8E-3	5.2E-4
使命時間1週間	168	6.3E-3	1.3E-3
使命時間1ヶ月	720	1.6E-2	4.2E-3

[1]1000ft あたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:FC2(A, B)(FCモードのみに関係する系統:1次系ポンプ)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ (ポニーモータ)	起動失敗(UA)	1.0E-3	3.3E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-5	1.2E-5	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器	作動失敗(UA)	2.9E-4	9.0E-6	720			
	誤動作(誤開)(UR)				8.0E-7	2.9E-8	
合計		3.6E-3	3.4E-4		4.7E-5	1.2E-5	

故障確率	使用時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使用時間24時間	24	4.7E-3	6.3E-4
使用時間1週間	168	1.1E-2	2.4E-3
使用時間1ヶ月	720	3.7E-2	9.0E-3

マクロイベント名:FNR(A, B, D)(FC, NC両モードに関係する修復可能な系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
ACダンパ (2個)	作動失敗(UA)	5.0E-3	2.6E-6	720	Qd		
	誤動作(誤閉)(UR)				3.0E-6	7.2E-9	
ACペーン	作動失敗(UA)	6.0E-4	1.3E-6	720	Qd		
	誤動作(誤閉)(UR)				1.0E-7	3.6E-9	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
合計		7.9E-3	4.9E-6		9.4E-6	1.4E-8	

故障確率	使用時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使用時間24時間	24	8.1E-3	5.3E-6
使用時間1週間	168	9.4E-3	7.3E-6
使用時間1ヶ月	720	1.5E-2	1.5E-5

マクロイベント名:NC(A, B, D)(NCモードのみに関係する系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
信号系 (半導体ロジック)	不動作(UA)		2.3E-6	720			原
	誤動作(UR)					6.5E-9	原
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
ACダクト・シエル	外部漏えい	8.6E-7	[3] 6.5E-7	720	2.4E-9	[3] 1.8E-9	
合計		2.3E-3	4.0E-6		6.3E-6	1.1E-8	

故障確率	使用時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使用時間24時間	24	2.4E-3	4.3E-6
使用時間1週間	168	3.3E-3	5.9E-6
使用時間1ヶ月	720	6.8E-3	1.2E-5

[1]1000ftあたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:FNNR(A, B)(FC, NC両モードに係する修復不能な系統:IRACS)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ(回転式)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
2次系ポンプ(回転式)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
ACポンプ(電磁)	外部漏えい	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
中間熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
2次系-AC熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
1次系配管(200ft.)	漏えい	4.0E-10	8.0E-8	1	8.0E-10	1.6E-7	
	閉塞	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
2次系配管(300ft.)	漏えい	6.0E-10	1.2E-7	1	1.2E-9	2.4E-7	
	閉塞	6.0E-8	6.0E-8	1	1.2E-7	1.2E-7	
AC配管(100ft.)	漏えい	2.0E-10	4.0E-8	1	4.0E-10	8.0E-8	
	閉塞	2.0E-8	2.0E-8	1	4.0E-8	4.0E-8	
AC伝熱管	漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
合計		4.9E-6	6.6E-7		9.8E-6	1.3E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	2.4E-4	3.2E-5
使命時間1週間	168	1.7E-3	2.2E-4
使命時間1ヶ月	720	7.1E-3	9.5E-4

マクロイベント名:FNNRD(FC, NC両モードに係する修復不能な系統:DRACS)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ(回転式)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
ACポンプ(電磁)	外部漏えい	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
1次系-AC熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
1次系配管(200ft.)	漏えい	4.0E-10	8.0E-8	1	8.0E-10	1.6E-7	
	閉塞	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
AC配管(100ft.)	漏えい	2.0E-10	4.0E-8	1	4.0E-10	8.0E-8	
	閉塞	2.0E-8	2.0E-8	1	4.0E-8	4.0E-8	
AC伝熱管	漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
合計		3.3E-6	3.9E-7		6.5E-6	7.8E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.6E-4	1.9E-5
使命時間1週間	168	1.1E-3	1.3E-4
使命時間1ヶ月	720	4.7E-3	5.6E-4

タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

マクロイベント名:FC1(A-C)(FCモードのみに関係する系統:1次系ポンプ)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ (ボニーモータ)	起動失敗(UA)	1.0E-3	3.3E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)					4.0E-5	1.2E-5
AC用ポンプ (電磁ポンプ)	起動失敗	4.0E-4	3.6E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)					4.0E-6	5.0E-6
プロア	起動失敗(UA)	2.0E-4	1.5E-5	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)					5.0E-6	2.4E-7
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器(3個)	作動失敗(UA)	8.6E-4	2.7E-5	720			
	誤動作(誤開)(UR)					2.4E-6	8.7E-8
	合計	4.7E-3	7.3E-4			5.8E-5	1.7E-5

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	6.1E-3	1.2E-3
使命時間1週間	168	1.4E-2	3.6E-3
使命時間1ヶ月	720	4.6E-2	1.3E-2

マクロイベント名:FNR(A-C)(FC、NC両モードに關係する修復可能な系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
ACダンパ (2個)	作動失敗(UA)	5.0E-3	2.6E-6	720	Qd		
	誤動作(誤開)(UR)					3.0E-6	7.2E-9
ACベーン	作動失敗(UA)	6.0E-4	1.3E-6	720	Qd		
	誤動作(誤開)(UR)					1.0E-7	3.6E-9
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
	合計	7.9E-3	4.9E-6			9.4E-6	1.4E-8

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	8.1E-3	5.3E-6
使命時間1週間	168	9.4E-3	7.3E-6
使命時間1ヶ月	720	1.5E-2	1.5E-5

マクロイベント名:NC(A-C)(NCモードのみに關係する系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
信号系 (半導体ロジック)	不動作(UA)		2.3E-6				原
	誤動作(UR)						6.5E-9
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
ACダクト・シェル	外部漏えい	8.6E-7	[3] 6.5E-7	720	2.4E-9	[3] 1.8E-9	
	合計	2.3E-3	4.0E-6			6.3E-6	1.1E-8

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	2.4E-3	4.3E-6
使命時間1週間	168	3.3E-3	5.9E-6
使命時間1ヶ月	720	6.8E-3	1.2E-5

[1]1000ft あたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:FNNR(A-C)(FC、NC両モードに関する修復不能な系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ(回転式)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
ACポンプ	外部漏えい	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
中間熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
AC配管(100ft.)	漏えい	2.0E-10	4.0E-8	1	4.0E-10	8.0E-8	
	閉塞	2.0E-8	2.0E-8	1	4.0E-8	4.0E-8	
AC伝熱管	漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
合計		3.2E-6	2.7E-7		6.4E-6	5.4E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.6E-4	1.3E-5
使命時間1週間	168	1.1E-3	9.0E-5
使命時間1ヶ月	720	4.6E-3	3.9E-4

タンク型 (機器合体・集中配置)

マクロイベント名:FC1(A-D)(FCモードのみに関係する事象:ポンプ)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
2次系ポンプ(電磁ポンプ)	起動失敗(UA)	4.0E-4	3.6E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-6	5.0E-6	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器	作動失敗(UA)	2.9E-4	9.0E-6	720			
	誤動作(誤開)(UR)				8.0E-7	2.9E-8	
合計		3.0E-3	3.7E-4		1.1E-5	5.0E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	3.2E-3	4.9E-4
使命時間1週間	168	4.8E-3	1.2E-3
使命時間1ヶ月	720	1.1E-2	4.0E-3

マクロイベント名:FC1(E, F)(FCモードのみに関係する事象:ポンプ)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
ACSポンプ(電磁ポンプ)	起動失敗(UA)	4.0E-4	3.6E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				4.0E-6	5.0E-6	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
遮断器	作動失敗(UA)	2.9E-4	9.0E-6	720			
	誤動作(誤開)(UR)				8.0E-7	2.9E-8	
合計		3.0E-3	3.7E-4		1.1E-5	5.0E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	3.2E-3	4.9E-4
使命時間1週間	168	4.8E-3	1.2E-3
使命時間1ヶ月	720	1.1E-2	4.0E-3

[1]1000ft あたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:FC2(A-D)(FCモードのみに関係する系統:ACブロー)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR LI	原安協点推定		大型FBR LI	原安協点推定	
ブロー	起動失敗(UA)		2.0E-4	1.5E-5	720	Qd	
	継続運転失敗(UR)						5.0E-6 2.4E-7
ケーブル	断線	[1]	1.1E-4	[2]	3.5E-7	720	[1] 3.0E-7 [2] 9.8E-10
	短絡	[1]	2.2E-3	[2]	3.5E-7	720	[1] 6.0E-6 [2] 9.8E-10
	地絡			[2]	3.5E-7	720	[2] 9.8E-10 原
遮断器	作動失敗(UA)		2.9E-4	9.0E-6	720		
	誤動作(誤開)(UR)						8.0E-7 2.9E-8
合計			2.8E-3	2.6E-5			1.2E-5 2.7E-7

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR LI	原安協点推定
使命時間24時間	24	3.0E-3	3.2E-5
使命時間1週間	168	4.8E-3	7.1E-5
使命時間1ヶ月	720	1.1E-2	2.2E-4

マクロイベント名:FC3(A-D)(FCモードのみに関係する事象:ポンプ)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR LI	原安協点推定		大型FBR LI	原安協点推定	
1次系ポンプ (電磁ポンプ)	起動失敗(UA)		4.0E-4	3.6E-4	720	Qd	
	継続運転失敗(UR)						4.0E-6 5.0E-6
ケーブル	断線	[1]	1.1E-4	[2]	3.5E-7	720	[1] 3.0E-7 [2] 9.8E-10
	短絡	[1]	2.2E-3	[2]	3.5E-7	720	[1] 6.0E-6 [2] 9.8E-10
	地絡			[2]	3.5E-7	720	[2] 9.8E-10 原
遮断器	作動失敗(UA)		2.9E-4	9.0E-6	720		
	誤動作(誤開)(UR)						8.0E-7 2.9E-8
合計			3.0E-3	3.7E-4			1.1E-5 5.0E-6

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR LI	原安協点推定
使命時間24時間	24	3.2E-3	4.9E-4
使命時間1週間	168	4.8E-3	1.2E-3
使命時間1ヶ月	720	1.1E-2	4.0E-3

マクロイベント名:FNR(A-D)(FC、NC両モードに関係する修復可能な系統)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR LI	原安協点推定		大型FBR LI	原安協点推定	
ACSダンパ (2個)	作動失敗(UA)		5.0E-3	2.6E-6	720	Qd	
	誤動作(誤閉)(UR)						3.0E-6 7.2E-9
ACSベーン	作動失敗(UA)		6.0E-4	1.3E-6	720	Qd	
	誤動作(誤閉)(UR)						1.0E-7 3.6E-9
ケーブル	断線	[1]	1.1E-4	[2]	3.5E-7	720	[1] 3.0E-7 [2] 9.8E-10
	短絡	[1]	2.2E-3	[2]	3.5E-7	720	[1] 6.0E-6 [2] 9.8E-10
	地絡			[2]	3.5E-7	720	[2] 9.8E-10 原
合計			7.9E-3	4.9E-6			9.4E-6 1.4E-8

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR LI	原安協点推定
使命時間24時間	24	8.1E-3	5.3E-6
使命時間1週間	168	9.4E-3	7.3E-6
使命時間1ヶ月	720	1.5E-2	1.5E-5

[1]1000ftあたりの故障率
[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:FNNR(A-D)(FC、NC両モードに係る修復不能な系統:IRACS)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ(電磁)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
2次系ポンプ(電磁)	外部漏えい	7.5E-9	6.0E-9	1	1.5E-8	1.2E-8	
電動弁	閉失敗(UA)	8.0E-4	7.2E-4	720	Qd		
	外部漏えい	1.5E-9	2.5E-10	1	3.0E-9	5.0E-10	
	内部漏えい	1.4E-4	2.9E-4	720	4.0E-7	8.0E-7	
	誤開(誤動作)(UR)				8.0E-7	1.5E-8	
	断線	[1] 2.2E-4	[2] 7.1E-7	720	[1] 6.0E-7	[2] 2.0E-9	
	短絡	[1] 4.3E-3	[2] 7.1E-7	720	[1] 1.2E-5	[2] 2.0E-9	
	地絡		[2] 7.1E-7	720		[2] 2.0E-9	原
中間熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
1次系配管(200ft.)	漏えい	4.0E-10	8.0E-8	1	8.0E-10	1.6E-7	
	閉塞	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
2次系配管(300ft.)	漏えい	6.0E-10	1.2E-7	1	1.2E-9	2.4E-7	
	閉塞	6.0E-8	6.0E-8	1	1.2E-7	1.2E-7	
ACS伝熱管	漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
合計		5.5E-3	1.0E-3		2.0E-5	1.8E-6	

故障確率	使用時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使用時間24時間	24	6.0E-3	1.1E-3
使用時間1週間	168	8.9E-3	1.3E-3
使用時間1ヶ月	720	2.0E-2	2.3E-3

マクロイベント名:FNNR(E, F)(FC、NC両モードに係る修復不能な系統:DRACS)

構成機器	故障モード	Qd/(demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
1次系ポンプ(電磁)	外部漏えい	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
ACSポンプ(電磁)	外部漏えい	4.0E-8	4.0E-8	1	8.0E-8	8.0E-8	
1次系-ACS熱交換器	伝熱管閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
	伝熱管漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	胴側外部漏えい	6.0E-9	4.0E-9	1	1.2E-8	8.0E-9	
AC配管(100ft.)	漏えい	2.0E-9	4.0E-8	1	4.0E-9	8.0E-8	
	閉塞	2.0E-7	2.0E-8	1	4.0E-7	4.0E-8	
ACS伝熱管	漏えい	7.5E-8	4.0E-9	1	1.5E-7	8.0E-9	
	閉塞	1.5E-6	7.5E-8	1	3.0E-6	1.5E-7	
合計		3.4E-6	3.0E-7		6.9E-6	6.0E-7	

故障確率	使用時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使用時間24時間	24	1.7E-4	1.5E-5
使用時間1週間	168	1.2E-3	1.0E-4
使用時間1ヶ月	720	5.0E-3	4.4E-4

[1]1000ftあたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

マクロイベント名:NC(A-F)(NCモードのみに関係する系統)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原妥協点推定		大型FBR L1	原妥協点推定	
信号系 (半導体ロジック)	不動作(UA)		2.3E-6	720			原
	誤動作(UR)					6.5E-9	原
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 3.5E-7	720	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 3.5E-7	720	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	地絡		[2] 3.5E-7	720		[2] 9.8E-10	原
ACSダクト・シェル	外部漏えい	8.6E-7	[3] 6.5E-7	720	2.4E-9	[3] 1.8E-9	
	合計	2.3E-3	4.0E-6		6.3E-6	1.1E-8	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原妥協点推定
使命時間24時間	24	2.4E-3	4.3E-6
使命時間1週間	168	3.3E-3	5.9E-6
使命時間1ヶ月	720	6.8E-3	1.2E-5

[1]1000ft あたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

表 5.8 サポートシステムマクロイベントの構成機器と故障率データ

表中記号等説明

故障モード

UA : デiamond故障のみ考慮する故障モード

UR : 時間故障のみ考慮する故障モード

故障率データ

Qd : デiamond故障確率

Ta : 故障通報時間間隔又は試験間隔

λ : 時間故障率 (Qdとなっている場合はデiamond故障確率値をデiamond故障データより引用したことを示す。)

備考欄

原 : 原安協データのみ記載。大型FBRデータは該当無し。

F : 大型FBRデータのみ記載。原安協データは該当無し。

補機冷却系統

マクロイベント名:CSSS(A, B)(補機冷却海水系)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
海水ポンプ (電動ポンプ)	運転失敗	1.0E-5	3.2E-7	1	2.0E-5	6.3E-7	
	外部漏えい	5.0E-7	(運転失敗に含む)	1	1.0E-6	(運転失敗に含む)	F
	ケーブル断線	[1] 1.5E-7	[2] 4.9E-10	1	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	ケーブル短絡	[1] 3.0E-6	[2] 4.9E-10	1	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	ケーブル地絡		[2] 4.9E-10	1		[2] 9.8E-10	原
	ブレーカ誤作動	4.0E-7		1	8.0E-7		F
	遮断機誤開		1.5E-8	1		2.9E-8	原
海水系配管 (>3in.)	漏えい	[3] 3.2E-6	[4] 1.4E-8	8	[3] 8.0E-7	[4] 3.6E-9	
	閉塞	[3] 3.2E-6	[4] 1.4E-8	8	[3] 8.0E-7	[4] 3.6E-9	
海水系オフィス	外部漏えい	4.0E-7	1.1E-8	8	1.0E-7	2.8E-9	
	内部閉塞	6.0E-6	1.1E-8	8	1.5E-6	2.8E-9	
	合計	2.7E-5	3.8E-7		3.1E-5	6.7E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	7.8E-4	1.7E-5
使命時間1週間	168	5.3E-3	1.1E-4
使命時間1ヶ月	720	2.3E-2	4.9E-4

マクロイベント名:CV(補機冷却水切替弁)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ(/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
切替弁 (電動弁4)	作動失敗(UA)	5.0E-3	3.3E-4	8760	Qd		
	誤開または誤閉(UR)				6.0E-6	6.4E-9	
	閉塞(2個)	9.6E-7	5.0E-8	8	2.4E-7	1.2E-8	
	外部リーク	1.3E-7	2.6E-8	8	3.2E-8	6.4E-9	
	内部リーク(2個)	6.4E-7	2.5E-8	8	1.6E-7	6.2E-9	
	ケーブル断線(UA)	[1] 1.3E-3	[2] 4.3E-6	8760			
	ケーブル短絡(UA)	[1] 2.6E-2	[2] 4.3E-6	8760			
	ケーブル地絡(UA)		[2] 4.3E-6	8760			原
	ブレーカ誤作動(UA)	1.4E-2		8760			F
遮断機誤開(UA)		5.1E-4	8760			原	
	合計	4.7E-2	8.5E-4		6.4E-6	3.1E-8	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	4.7E-2	8.5E-4
使命時間1週間	168	4.8E-2	8.6E-4
使命時間1ヶ月	720	5.1E-2	8.8E-4

[1]1000ftあたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×10

[3]3in.以上配管10000ftあたりの故障率

[4]3in.以上配管の機器、材質変更箇所及び分岐によって区分される1セクションあたりの故障率×20

マクロイベント名:CCWS(A、B)(補機冷却水系)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
冷凍機	運転失敗	1.0E-5	※ 3.4E-7	1	2.0E-5	※ 6.7E-7	
	ケーブル断線	[1] 1.5E-7	[2] 4.9E-10	1	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	ケーブル短絡	[1] 3.0E-6	[2] 4.9E-10	1	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	ケーブル地絡		[2] 4.9E-10	1		[2] 9.8E-10	原
	ブレーカ誤作動	4.0E-7		1	8.0E-7		
	遮断機誤開		1.5E-8	1		2.9E-8	原
冷水ポンプ	運転失敗	1.0E-5	3.2E-7	1	2.0E-5	6.3E-7	
	外部漏えい	5.0E-7	(運転失敗に含む)	1	1.0E-6	(運転失敗に含む)	F
	ケーブル断線	[1] 1.5E-7	[2] 4.9E-10	1	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	ケーブル短絡	[1] 3.0E-6	[2] 4.9E-10	1	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	ケーブル地絡		[2] 4.9E-10	1		[2] 9.8E-10	原
	ブレーカ誤作動	4.0E-7		1	8.0E-7		F
	遮断機誤開		1.5E-8	1		2.9E-8	原
配管 (>3in.)	漏えい	[5] 9.6E-7	[4] 1.4E-8	8	[5] 2.4E-7	[4] 3.6E-9	
	閉塞	[5] 9.6E-7	[4] 1.4E-8	8	[5] 2.4E-7	[4] 3.6E-9	
オリフィス×2	外部漏えい	8.0E-7	2.2E-8	8	2.0E-7	5.6E-9	
	内部閉塞	1.2E-5	2.2E-8	8	3.0E-6	5.6E-9	
合計		4.2E-5	7.6E-7		5.9E-5	1.4E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.5E-3	3.4E-5
使命時間1週間	168	9.9E-3	2.3E-4
使命時間1ヶ月	720	4.2E-2	1.0E-3

マクロイベント名:HVAC(A-F)(補機冷却空調系)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
空調用熱交換器	伝熱管漏えい	[6] 1.0E-6	[7] 3.7E-8	8	[6] 2.5E-7	[7] 9.2E-9	
	伝熱管閉塞	1.0E-5	1.5E-7	8	2.5E-6	3.7E-8	[7]
	外部漏えい	4.8E-7	3.7E-8	8	1.2E-7	9.2E-9	[7]
空調用フィルタ	故障(閉塞)	2.4E-5	6.0E-8	8	6.0E-6	1.5E-8	2個
空調用冷却ファン	運転失敗	2.0E-5	9.6E-7	8	5.0E-6	2.4E-7	
	外部漏えい	8.0E-8	(運転失敗に含む)	8	2.0E-8	(運転失敗に含む)	F
	ケーブル断線	[1] 1.2E-6	[2] 3.9E-9	8	[1] 3.0E-7	[2] 9.8E-10	
	ケーブル短絡	[1] 2.4E-5	[2] 3.9E-9	8	[1] 6.0E-6	[2] 9.8E-10	
	ケーブル地絡		[2] 3.9E-9	8		[2] 9.8E-10	原
	ブレーカ誤作動	3.2E-6		8	8.0E-7		F
	遮断機誤開		1.2E-7	8		2.9E-8	原
空調用ダクト (>3in.)	外部漏えい	[5] 1.6E-6	[4] 1.4E-8	8	[5] 4.0E-7	[4] 3.6E-9	
	内部閉塞	[5] 1.6E-6	[4] 1.4E-8	8	[5] 4.0E-7	[4] 3.6E-9	
ダンパ 2個	誤作動	8.0E-7		8	2.0E-7		F
	誤開または誤閉		2.9E-8	8		7.2E-9	原
	閉塞		2.9E-8	8		7.2E-9	原
制御弁 (電動弁)	制御失敗	1.0E-4		8	2.5E-5		F
	作動失敗		7.6E-8	8		UA	原
	誤開または誤閉		6.4E-9	8		1.6E-9	原
	閉塞		2.5E-8	8		6.2E-9	原
	外部リーク	6.0E-8	6.4E-9	8	1.5E-8	1.6E-9	
合計		1.9E-4	1.6E-6		4.7E-5	3.7E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.3E-3	1.1E-5
使命時間1週間	168	8.1E-3	6.4E-5
使命時間1ヶ月	720	3.4E-2	2.7E-4

[5] 3in. 以上配管 1000ft あたりの故障率

[6] 伝熱管 100 本あたりの故障率

[7] 熱交換器 1 機あたりの故障率

※原安協データの冷凍機運転失敗は、「電動ポンプ」の「運転継続失敗」と「熱交換器」の「伝熱管閉塞」との故障率の和とした

電源系統

マクロイベント名:BAT(A, B)(バッテリーおよび無停電電源系)

構成機器	故障モード	Qd/demand		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
母線(2系統)	機能喪失	1.5E-6	1.7E-8	1	3.0E-6	3.4E-8	
ケーブル	断線	[1] 1.5E-7	[2] 1.5E-9	1	[1] 3.0E-7	[2] 2.9E-9	
	短絡	[1] 3.0E-6	[2] 1.5E-9	1	[1] 6.0E-6	[2] 2.9E-9	
	地絡		[2] 1.5E-9	1		[2] 2.9E-9	原
遮断器(5個)	誤動作(誤開)	2.0E-6	7.3E-8	1	4.0E-6	1.5E-7	
制御系リレー (9個)	不動作		8.1E-10	1		1.6E-9	原
	誤動作	2.3E-6	5.0E-9	1	4.5E-6	9.9E-9	
制御系スイッチ (9個)	不動作		1.2E-8	1		2.3E-8	原
	誤動作	1.1E-5	5.9E-9	1	2.3E-5	1.2E-8	
シリコンドロップ (半導体ロジック)	不動作		3.3E-9	1		6.5E-9	原
	誤動作	5.0E-8	3.3E-9	1	1.0E-7	6.5E-9	
インバータ	機能喪失	4.0E-6	3.7E-8	1	8.0E-6	7.3E-8	
蓄電池	機能喪失	1.5E-6	2.0E-8	1	3.0E-6	3.9E-8	
充電器	機能喪失	1.5E-6	2.0E-8	1	3.0E-6	3.9E-8	
合計		2.7E-5	2.0E-7		5.4E-5	4.0E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.3E-3	9.8E-6
使命時間1週間	168	9.2E-3	6.7E-5
使命時間1ヶ月	720	3.9E-2	2.9E-4

マクロイベント名:E(A, B)I(非常用電源系)

構成機器	故障モード	Qd/demand		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
母線(3系統)	機能喪失	2.3E-6	2.6E-8	1	4.5E-6	5.1E-8	
ケーブル	断線	[1] 1.5E-7	[2] 1.5E-9	1	[1] 3.0E-7	[2] 2.9E-9	
	短絡	[1] 3.0E-6	[2] 1.5E-9	1	[1] 6.0E-6	[2] 2.9E-9	
	地絡		[2] 1.5E-9	1		[2] 2.9E-9	原
遮断器(6個)	誤動作(誤開)	2.4E-6	8.7E-8	1	4.8E-6	1.7E-7	
制御系リレー (6個)	不動作		5.4E-10	1		1.1E-9	原
	誤動作	1.5E-6	3.3E-9	1	3.0E-6	6.6E-9	
制御系スイッチ (6個)	不動作		7.8E-9	1		1.6E-8	原
	誤動作	7.5E-6	3.9E-9	1	1.5E-5	7.8E-9	
手動スイッチ (2個)	不動作		8.4E-10	1		1.7E-9	
	誤動作	5.0E-6	4.2E-10	1	1.0E-5	8.4E-10	
変圧器(2個)	機能喪失	5.0E-7	9.7E-8	1	1.0E-6	1.9E-7	
合計		2.2E-5	2.3E-7		4.5E-5	4.6E-7	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	1.1E-3	1.1E-5
使命時間1週間	168	7.5E-3	7.8E-5
使命時間1ヶ月	720	3.2E-2	3.3E-4

[1] 1000ft あたりの故障率

[2] 機器間の1セクションあたりの故障率×30

マクロイベント名:BRK(E1,UPS)(電源切替用遮断器)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
遮断器	作動失敗(2個)(UA)		1.1E-4	8760			原
	誤動作(2個)	7.0E-3		8760	1.6E-6		F
	誤閉(1個)(UR)					2.1E-9	原
	誤開(1個)(UR)					2.9E-8	原
	合計	7.0E-3	1.1E-4		1.6E-6	3.1E-8	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	7.0E-3	1.1E-4
使命時間1週間	168	7.3E-3	1.1E-4
使命時間1ヶ月	720	8.2E-3	1.3E-4

マクロイベント名:DG(A, B)(非常用ディーゼル発電機)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
ディーゼル発電機	起動失敗(UA)	1.2E-3	6.8E-4	720	Qd		
	継続運転失敗(UR)				2.0E-4	1.4E-4	
DGスピード計測器	誤動作	5.4E-4	(発電機を含む)	720	1.5E-6	(発電機を含む)	F
DG制御系リレー	不動作(UA)	5.4E-3	6.5E-8	720			原
	誤動作(UR)				1.5E-5	1.1E-9	
DG制御系スイッチ	不動作(UA)	4.7E-3	9.4E-7	720			原
	誤動作(UR)				1.3E-5	1.3E-9	
ケーブル	断線	[1] 1.1E-4	[2] 1.1E-6	720	[1] 3.0E-7	[2] 2.9E-9	
	短絡	[1] 2.2E-3	[2] 1.1E-6	720	[1] 6.0E-6	[2] 2.9E-9	
	地絡		[2] 1.1E-6	720		[2] 2.9E-9	原
遮断器	閉失敗	5.0E-4	9.0E-6	720	Qd		
	誤動作(誤開)				8.0E-7	2.9E-8	
	合計	1.5E-2	7.0E-4		2.4E-4	1.4E-4	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	2.0E-2	4.1E-3
使命時間1週間	168	5.4E-2	2.4E-2
使命時間1ヶ月	720	1.8E-1	1.0E-1

マクロイベント名:OSP(所外電源)

構成機器	故障モード	Qd(/demand)		Ta	λ (/hour)		備考
		大型FBR L1	原安協点推定		大型FBR L1	原安協点推定	
送電線	給電喪失	3.8E-6	3.8E-6	1	7.5E-6	7.5E-6	
開閉所(遮断器)	故障(誤開)	1.5E-6	1.5E-8	1	3.0E-6	2.9E-8	
変圧器	故障(機能喪失)	2.5E-7	4.9E-8	1	5.0E-7	9.7E-8	
ケーブル	断線	[1] 1.5E-7	[2] 1.5E-9	1	[1] 3.0E-7	[2] 2.9E-9	
	短絡	[1] 3.0E-6	[2] 1.5E-9	1	[1] 6.0E-6	[2] 2.9E-9	
	地絡		[2] 1.5E-9	1		[2] 2.9E-9	原
遮断器(2個)	誤動作(誤開)	8.0E-7	2.9E-8	1	1.6E-6	5.8E-8	
遮断器関連リレー(20個)	不動作		1.8E-9	1		3.6E-9	原
	誤動作	5.0E-6	1.1E-8	1	1.0E-5	2.2E-8	
遮断器関連スイッチ(4個)	不動作		5.2E-9	1		1.0E-8	原
	誤動作	5.0E-6	2.6E-9	1	1.0E-5	5.2E-9	
	合計	1.9E-5	3.9E-6		3.9E-5	7.7E-6	

故障確率	使命時間(hours)	大型FBR L1	原安協点推定
使命時間24時間	24	9.5E-4	1.9E-4
使命時間1週間	168	6.6E-3	1.3E-3
使命時間1ヶ月	720	2.8E-2	5.6E-3

[1]1000ft あたりの故障率

[2]機器間の1セクションあたりの故障率×30

表 5.9 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) マクロイベント発生確率

マクロイベント名	使命時間24時間とした場合の故障確率		使命時間1週間とした場合の故障確率		使命時間1ヶ月とした場合の故障確率	
	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定
FC1A	6.1E-03	1.2E-03	1.4E-02	3.6E-03	4.6E-02	1.3E-02
FC1B	6.1E-03	1.2E-03	1.4E-02	3.6E-03	4.6E-02	1.3E-02
FC1D	3.8E-03	5.2E-04	6.3E-03	1.3E-03	1.6E-02	4.2E-03
FC2A	4.7E-03	6.3E-04	1.1E-02	2.4E-03	3.7E-02	9.0E-03
FC2B	4.7E-03	6.3E-04	1.1E-02	2.4E-03	3.7E-02	9.0E-03
FNNRA	2.4E-04	3.2E-05	1.7E-03	2.2E-04	7.1E-03	9.5E-04
FNNRB	2.4E-04	3.2E-05	1.7E-03	2.2E-04	7.1E-03	9.5E-04
FNNRD	1.6E-04	1.9E-05	1.1E-03	1.3E-04	4.7E-03	5.6E-04
FNRA	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRB	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRD	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
NCA	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCB	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCD	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
HVACA	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACB	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACD	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
CV	4.7E-02	8.5E-04	4.8E-02	8.6E-04	5.1E-02	8.8E-04
CCWSA	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CCWSB	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CSSSA	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
CSSSB	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
EA1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
EB1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
BRKE1	7.0E-03	1.1E-04	7.3E-03	1.1E-04	8.2E-03	1.3E-04
BATA	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
BATB	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
BRKUPS	7.0E-03	1.1E-04	7.3E-03	1.1E-04	8.2E-03	1.3E-04
DGA	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
DGB	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
OSP	9.5E-04	1.9E-04	6.6E-03	1.3E-03	2.8E-02	5.6E-03

表 5.10 タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) マクロイベント発生確率

マクロイベント名	使用時間24時間とした場合の故障確率		使用時間1週間とした場合の故障確率		使用時間1ヶ月とした場合の故障確率	
	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定
FC1A	6.1E-03	1.2E-03	1.4E-02	3.6E-03	4.6E-02	1.3E-02
FC1B	6.1E-03	1.2E-03	1.4E-02	3.6E-03	4.6E-02	1.3E-02
FC1C	6.1E-03	1.2E-03	1.4E-02	3.6E-03	4.6E-02	1.3E-02
FNNRA	1.6E-04	1.3E-05	1.1E-03	9.0E-05	4.6E-03	3.9E-04
FNNRB	1.6E-04	1.3E-05	1.1E-03	9.0E-05	4.6E-03	3.9E-04
FNNRC	1.6E-04	1.3E-05	1.1E-03	9.0E-05	4.6E-03	3.9E-04
FNRA	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRB	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRC	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
NCA	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCB	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCC	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
HVACA	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACB	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACC	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
CV	4.7E-02	8.5E-04	4.8E-02	8.6E-04	5.1E-02	8.8E-04
CCWSA	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CCWSB	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CSSSA	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
CSSSB	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
EA1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
EB1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
BRKE1	7.0E-03	1.1E-04	7.3E-03	1.1E-04	8.2E-03	1.3E-04
BATA	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
BATB	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
BRKUPS	7.0E-03	1.1E-04	7.3E-03	1.1E-04	8.2E-03	1.3E-04
DGA	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
DGB	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
OSP	9.5E-04	1.9E-04	6.6E-03	1.3E-03	2.8E-02	5.6E-03

表 5.11 タンク型（機器合体・集中配置）マクロイベント発生確率

マクロイベント名	使命時間24時間とした場合の故障確率		使命時間1週間とした場合の故障確率		使命時間1ヶ月とした場合の故障確率	
	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定	FBR PSA値	原安協点推定
FC1A	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC1B	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC1C	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC1D	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC1E	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC1F	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC2A	3.0E-03	3.2E-05	4.8E-03	7.1E-05	1.1E-02	2.2E-04
FC2B	3.0E-03	3.2E-05	4.8E-03	7.1E-05	1.1E-02	2.2E-04
FC2C	3.0E-03	3.2E-05	4.8E-03	7.1E-05	1.1E-02	2.2E-04
FC2D	3.0E-03	3.2E-05	4.8E-03	7.1E-05	1.1E-02	2.2E-04
FC3A	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC3B	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC3C	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FC3D	3.2E-03	4.9E-04	4.8E-03	1.2E-03	1.1E-02	4.0E-03
FNNRA	6.0E-03	1.1E-03	8.9E-03	1.3E-03	2.0E-02	2.3E-03
FNNRB	6.0E-03	1.1E-03	8.9E-03	1.3E-03	2.0E-02	2.3E-03
FNNRC	6.0E-03	1.1E-03	8.9E-03	1.3E-03	2.0E-02	2.3E-03
FNNRD	6.0E-03	1.1E-03	8.9E-03	1.3E-03	2.0E-02	2.3E-03
FNNRE	1.7E-04	1.5E-05	1.2E-03	1.0E-04	5.0E-03	4.4E-04
FNNRF	1.7E-04	1.5E-05	1.2E-03	1.0E-04	5.0E-03	4.4E-04
FNRA	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRB	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRC	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
FNRD	8.1E-03	5.3E-06	9.4E-03	7.3E-06	1.5E-02	1.5E-05
NCA	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCB	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCC	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCD	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCE	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
NCF	2.4E-03	4.3E-06	3.3E-03	5.9E-06	6.8E-03	1.2E-05
HVACA	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACB	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACC	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACD	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACE	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
HVACF	1.3E-03	1.1E-05	8.1E-03	6.4E-05	3.4E-02	2.7E-04
CCWSA	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CCWSB	1.5E-03	3.4E-05	9.9E-03	2.3E-04	4.2E-02	1.0E-03
CSSSA	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
CSSSB	7.8E-04	1.7E-05	5.3E-03	1.1E-04	2.3E-02	4.9E-04
EA1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
EB1	1.1E-03	1.1E-05	7.5E-03	7.8E-05	3.2E-02	3.3E-04
BATA	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
BATB	1.3E-03	9.8E-06	9.2E-03	6.7E-05	3.9E-02	2.9E-04
DGA	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
DGB	2.0E-02	4.1E-03	5.4E-02	2.4E-02	1.8E-01	1.0E-01
OSP	9.5E-04	1.9E-04	6.6E-03	1.3E-03	2.8E-02	5.6E-03

6. 崩壊熱除去機能喪失確率と PLOHS シーケンス発生頻度の評価

ここでは、前節で作成した評価概念のシステムモデルを基にして PLOHS シーケンス発生頻度を算出し、定量的な評価を行う。

6.1 解析条件

解析にあたっては、共通要因故障、メンテナンスアウトージ（計画外の機器修理活動に伴うアウトージ）、テストアウトージ及び機器修復を考慮しないものとした。崩壊熱除去失敗シーケンスに対応するブール代数式は前節の 5.3 に、マクロイベントの定量化データは 5.4 に示した「原安協点推定値」の使命時間 1 週間の値を使用した。

6.2 解析結果及び考察

6.1 の条件で、評価対象概念ごとに、起因事象発生頻度とそれに対応する崩壊熱除去機能喪失確率とを掛け合わせて和をとり、PLOHS シーケンス発生頻度を求めると以下のようなになった（詳細は表 6.1 case 1）。また、評価対象概念ごとの崩壊熱除去運転モード別 PLOHS シーケンス発生頻度を図 6.1 case 1 に示す。

ループ型（1 次系機器合体・ループ数削減）	$3.7 \times 10^{-7}/\text{ry}$
タンク型（2 次系機器合体・ループ数削減）	$2.4 \times 10^{-7}/\text{ry}$
タンク型（機器合体・集中配置）	$2.2 \times 10^{-7}/\text{ry}$

PLOHS 発生頻度に関しては、本解析では共通要因故障について評価していないものの、3 つの概念すべてが $10^{-6}/\text{ry}$ を下回った。

今回の評価では、ナトリウム系以外の機器に対して、原安協データを採用することによりこれまで保守的に見ていた機器故障率について、より現実的な評価を行うことができた。また、その結果として、経済的に魅力のある高速炉設計のために安全系を合理化した本研究の評価対象概念でも、安全性目標である「1 炉年当たりの炉心損傷確率 10^{-6} 以下」を達成することができる見通しを得た。

なお、今回の評価は設計ベースのものである。過去の経験から、実機の崩壊熱除去系の除熱容量が設計値を上回ることは確実であり、このことにより更に信頼度が上昇すると考えられる。

図 6.1 により評価対象概念を比較すると、崩壊熱除去系が必要除熱容量 $100\% \times 3$ ループのもの（ループ型及びタンク型（2 次系機器合体・ループ数削減）、以下 3 ループタイプとする）、及び $50\% \times 4$ ループのもの（タンク型（機器合体・集中配置）、以下 4 ループタイプとする）の 2 タイプに分けられる。3 ループタイプでは崩壊熱除去系が 1 ループ使用できない場合の確率が大きく、4 ループタイプでは外部電源喪失時の確率が支配的となっている。以下、タイプ別の特徴等を述べる。

6.2.1 3ループタイプの特徴

図 6.1 から、PLOHS シーケンス発生 of 支配的な起因事象は IRACS 1 ループ NC、FC 両モード不能となる場合 (D3 モード) と言える。さらに詳しく分析するために、確率の高いマクロイベントの重ね合わせを示す (表 6.2、表 6.3)。この表からは、ループ型、タンク型 (2 次系機器合体・ループ数削減) の違いによらず、ポンプそのものの故障やサポートシステムの故障により残りの健全ループの強制循環除熱に失敗することが支配的な機器故障重ね合わせとなっていることがわかる。これが支配的となる理由は、電源が使える状況下で除熱失敗に至らしめるために必要な故障数 (冗長度) が 4 ループタイプのものより少ないため、その結果としてポンプに代表される電源以外の故障の寄与が相対的に大きいからである。発生確率の観点から支配的な重ね合わせは、具体的にはナトリウムポンプ 2 台の機能喪失である。

ここで対象となった 2 つのプラント概念は、先に述べた通り「1 炉年当たりの炉心損傷確率 10^{-6} 未満」を達成することができる見通しを得たが、更なる信頼度向上を図るための方策としては、上の分析結果から、プラント設計に対して次の 2 つの信頼度向上策が考えられる。

- (a) 強制循環除熱の信頼度を向上させるために、強制循環により 100% の除熱能力を有する DRACS を 1 系統増設する。この場合、自然循環能力を 1 基当たり 100/3% から 25% へ削減することが可能である。
- (b) 自然循環除熱の信頼度を向上させるために自然循環除熱容量を 1 基当たり 100/3% から 50% へ増強する。

(a) は、DRACS を追加することによる原子炉容器径の増大や建屋容積増加の影響が大きいと考えられ、物量の増加をもたらす可能性がある。それと比べて (b) は、崩壊熱除去系の系統圧損削減や伝熱中心差の増大が必要となる可能性もあるが、概念の大幅な設計変更を取り入れなくとも実機の性能ベースの評価では設計マージンを取り入れてさらに自然循環除熱能力の評価値が増加することも十分考えられることから、設計へのインパクトは比較的少ないと考えられる。

6.2.2 4ループタイプの特徴

図 6.1 から、PLOHS シーケンス発生 of 支配的な起因事象は外部電源喪失時 (D5 モード) と言える。さらに詳しく分析するために、確率の高いマクロイベントの重ね合わせを示す (表 6.4)。この表からは 2 系統ある非常用ディーゼル発電機の双方が起動失敗することですべてのループが強制循環除熱に失敗し、さらに IRACS 1 ループで自然循環も失敗するような事象重ね合わせが支配的となっていることがわかる。

ディーゼル発電機とそれをサポートする補機冷却系については、3つの評価対象概念に対して同一の設備構成を想定した。それにもかかわらず、外部電源喪失に起因するシーケンスは他のプラントの同シーケンスより高い発生頻度で、1桁程度の違いとなっている。つまり非常用電源系そのものや補機冷却系が他の概念より弱いわけではなく、フロントラインシステムにその原因があると考えるのが自然である。そこでフロントラインシステムについて詳細に調査した。前節のマクロイベント発生確率表 5.9～表 5.11 にて、タンク型（機器合体・集中配置）とその他の評価対象概念についてマクロイベント FNNRA の使命時間 1 週間とした場合の原安協データによる発生確率を比較すると次のようになる。

4 ループタイプ（タンク型・機器合体・集中配置）	1.3×10^{-3}
3 ループタイプ（ループ型）	2.2×10^{-4}
（タンク型・2次系機器合体）	9.0×10^{-5}

このようにタンク型（機器合体・集中配置）の FNNRA の確率が他の評価対象概念と比較して 5～15 倍程度大きくなっていることがわかる。さらに FNNRA を構成する機器について表 5.7 で調べると、タンク型（機器合体・集中配置）には電動弁が含まれていて、この故障率が FNNRA の故障確率の支配要因と見られる。他の評価対象概念の FNNRA には電動弁が含まれておらず、このことが FNNRA の信頼度の差、さらには D5 モードにおける信頼度の差につながっていると考えられる。なお、この信頼度の差は 4 ループタイプと 3 ループタイプの信頼度の差ではなく、崩壊熱除去系 1 ループの構成機器の違いによるものである。

また、3 ループタイプ、4 ループタイプとも、すべてのループで強制循環が失敗するような状況では、すべてのループの自然循環除熱成功により崩壊熱除去が可能となる構成であり、裏返せば 1 ループの自然循環除熱失敗により PLOHS シーケンス発生に至る。このような場合、仮に 1 ループあたりの自然循環除熱失敗確率が等しいならば、4 ループタイプのほうが 4/3 倍だけ 3 ループタイプよりも概念全体で 1 ループの自然循環除熱失敗の起こる確率が大きいことになる。しかしその寄与は、電動弁の有無による信頼度の差と比較すると小さい。

一方、電源が使える状況下で除熱失敗に至らしめるために必要な設備故障数が他 2 つの評価対象概念より多いため、その結果としてポンプ故障に代表される電源以外の故障の寄与が相対的に小さい。

ここで対象となった概念は、先に述べた通り「1 炉年当たりの炉心損傷確率 10^{-6} 未満」を達成することができる見通しを得たが、更なる信頼度向上を図るための方策としては、上の分析結果から、プラント設計に対して次の 4 つの信頼度向上策が考えられる。

- (a) 自然循環除熱モード起動時の信頼度を向上させるためにナトリウム系電動弁が不要な蒸気発生器共用型の IRACS（例えばループ型（1 次系機器合体・ループ数削減）概念の IRACS、3.1 参照）にする。

- (b) 自然循環除熱モード起動時の信頼度を向上させるためにナトリウム系電動弁を多重化する。
- (c) 自然循環除熱容量を1基当たり25%から100/3%へ増強する。
- (d) 外部電源喪失時の非常用発電設備をサポート系も含めて1系統増設する。

(a)は、蒸気発生器と IRACS 伝熱管の取り合いが設計に影響を及ぼすものの、物量の増加は比較的少ないと考えられる。(b)は、電動弁の個数が増えること、それらの制御系統設計がやや複雑になることなどから、コスト削減の観点からは好ましい変更とは言えない。(c)は、崩壊熱除去系の系統圧損削減や伝熱中心差の増大が必要となる可能性もあるが、プラントの大幅な設計変更を取り入れなくとも、実機の性能ベースの評価ではさらに自然循環除熱能力が増加することが十分に考えられることから、設計へのインパクトは比較的少ないと考えられる。(d)は建屋内の設置スペースを考慮することの影響が大きく、また物量も増加することから好ましい変更とは言えない。したがって(a)及び(c)が有望な案と考えられる。

6.3 自然循環除熱容量を増強した場合の信頼度評価

先に述べた信頼度向上策の中で、自然循環除熱容量の増強は3種類のプラント概念に共通したものであるが、プラントの大幅な設計変更を取り入れなくとも、実機の性能ベースの評価ではさらに自然循環除熱能力の評価値が増加することが考えられる。自然循環除熱容量が増加することは、自然循環除熱に必要な設備の単一故障を想定しても自然循環除熱が行われるという特長を生み出す。このような特長が PLOHS 発生頻度の低減にどれだけ寄与するかを把握するために、この自然循環除熱容量の増加を想定した場合の PLOHS 発生頻度の定量化を行った。

解析のためのデータは、前節 5.1 に示した失敗基準を次のように変えた。

ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

- D1 冷却ループ3ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗
- D2 冷却ループ2ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗
- D3 冷却ループ2ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D4 IRACS 2ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D5 冷却ループ3ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗

タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

- D1 PRACS 3ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗
- D2 PRACS 2ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗
- D3 PRACS 2ループのFC失敗かつ1ループ以上のNC失敗
- D4 (DRACSなしのため対象となる運転モード自体が存在しない)
- D5 PRACS 3ループのFC失敗かつ2ループ以上のNC失敗

タンク型 (機器合体・集中配置)

D1 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 100/3%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D11	4 失敗	3 失敗以上	
D12	4 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D14	3 失敗	3 失敗	1 失敗以上
D15	3 失敗	2 失敗	2 失敗

D2 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×3 ループ	IRACS NC モード 100/3%×FC 失敗ループ+1	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D21	3 失敗	3 失敗以上	
D22	3 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D24	2 失敗	2 失敗	2 失敗
D25	2 失敗	3 失敗	1 失敗以上

D3 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×3 ループ	IRACS NC モード 100/3%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D31	3 失敗	2 失敗以上	
D32	3 失敗	1 失敗	1 失敗以上
D34	2 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D35	2 失敗	1 失敗	2 失敗

D4 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 100/3%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×1 ループ
D41	4 失敗	2 失敗以上	
D43	3 失敗	3 失敗	
D44	3 失敗	2 失敗	1 失敗

D5 以下のいずれかを満たす

使用可能 ループ数	IRACS FC モード 50%×4 ループ	IRACS NC モード 100/3%×FC 失敗ループ	DRACS FC モード 25%×2 ループ
D51	4 失敗	3 失敗以上	
D52	4 失敗	2 失敗	1 失敗以上
D54	3 失敗	3 失敗	1 失敗以上
D55	3 失敗	2 失敗	2 失敗

上記に対応するブール代数式を表 6.5 に示す。これらは前節のブール代数式（表 5.4～表 5.6）のうち失敗基準に変わる部分である。表 6.5 の失敗基準を適用した信頼度評価結果を表 6.1 と図 6.1 の case 2 に示す。

case 1 と case 2 とを比較した結果、上記提案の自然循環除熱容量の増加を採用することは、いずれの評価対象概念に対しても 1 桁程度、PLOHS シーケンス発生頻度を低下させる効果があることを確認することができた。

表 6.1 信頼度評価結果

ループ型(1次系機器合体・ループ数削減)評価結果			case1		case2	
崩壊熱除去運転モード	起回事象発生頻度 f/ry]	使命時間条件 [hr]	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1
D1 全ループ使用可能	1.5E+0	168	1.5E-8	2.2E-8	4.8E-10	7.0E-10
D2 IRACS 1ループ FCモード不能	8.2E-2	168	1.2E-6	1.0E-7	3.1E-8	2.6E-9
D3 IRACS 1ループ FC、NC両モード不能	9.1E-3	168	2.0E-5	1.8E-7	1.2E-6	1.1E-8
D4 DRACS 1ループ不能	7.2E-4	168	4.6E-5	3.3E-8	3.0E-6	2.2E-9
D5 所外電源喪失	5.2E-2	168	5.8E-7	3.0E-8	2.0E-9	1.1E-10
計				3.7E-7		1.7E-8

タンク型(2次系機器合体・ループ数削減)評価結果			case1		case2	
崩壊熱除去運転モード	起回事象発生頻度 f/ry]	使命時間条件 [hr]	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1
D1 全ループ使用可能	1.7E+0	168	5.1E-9	8.4E-9	1.1E-10	1.7E-10
D2 PRACS 1ループ FCモード不能	7.2E-2	168	7.7E-7	5.5E-8	9.5E-9	6.9E-10
D3 PRACS 1ループ FC、NC両モード不能	9.1E-3	168	1.7E-5	1.6E-7	7.7E-7	7.0E-9
D5 所外電源喪失	5.2E-2	168	3.1E-7	1.6E-8	5.9E-10	3.0E-11
計				2.4E-7		7.9E-9

タンク型(機器合体・集中配置)評価結果			case1		case2	
崩壊熱除去運転モード	起回事象発生頻度 f/ry]	使命時間条件 [hr]	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1	崩壊熱除去機能喪失確率 l[/demand]	PLOHS発生頻度 f×1
D1 全ループ使用可能	1.8E+0	168	7.0E-9	1.3E-8	1.8E-9	3.4E-9
D2 IRACS 1ループ FCモード不能	1.6E-1	168	1.6E-8	2.6E-9	6.3E-9	1.0E-9
D3 IRACS 1ループ FC、NC両モード不能	1.8E-2	168	1.7E-6	3.1E-8	6.9E-7	1.3E-8
D4 DRACS 1ループ不能	1.4E-3	168	2.3E-8	3.3E-11	1.5E-8	2.1E-11
D5 所外電源喪失	5.2E-2	168	3.3E-6	1.7E-7	1.8E-7	9.3E-9
計				2.2E-7		2.6E-8

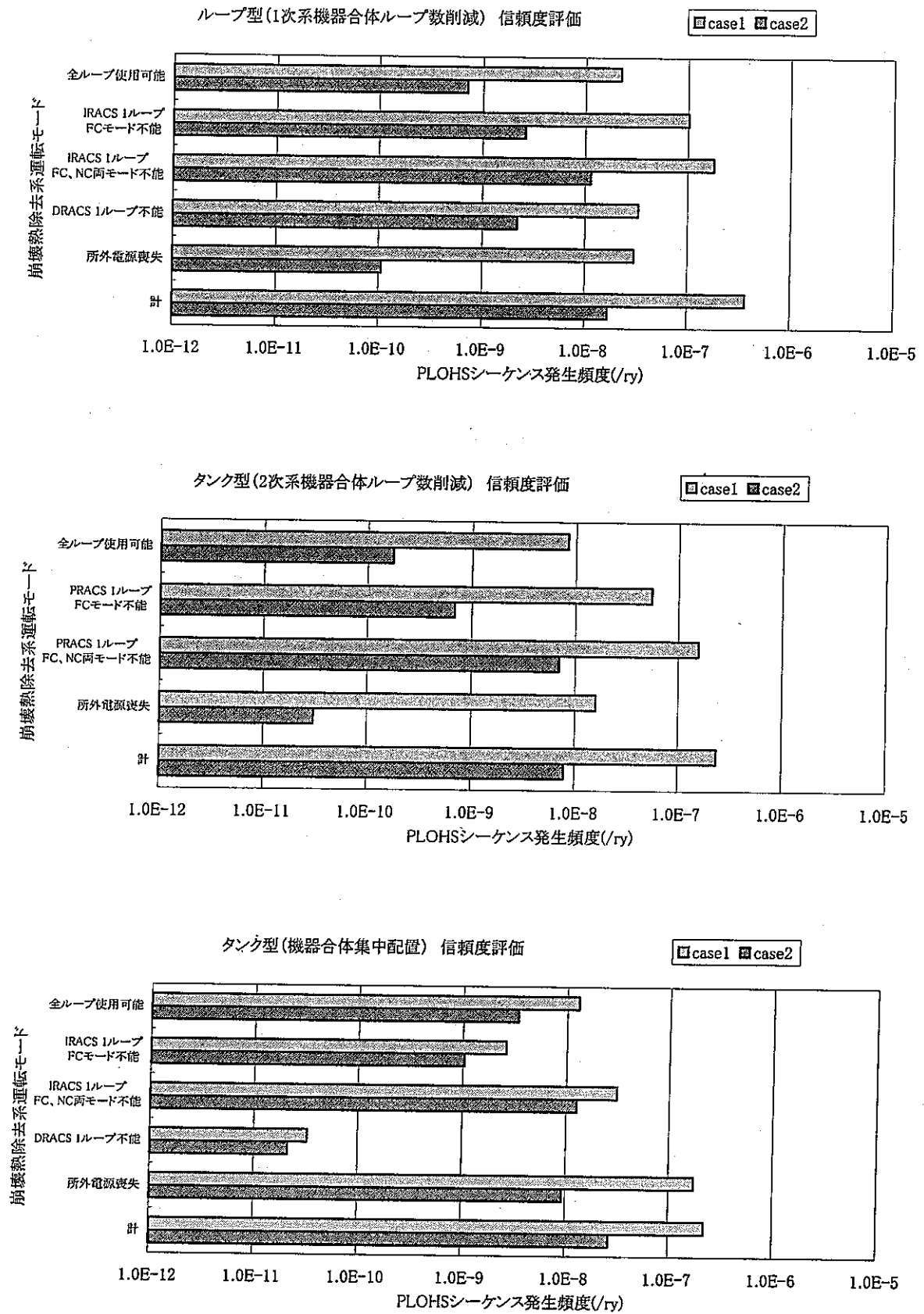


図 6.1 信頼度評価結果

表 6.2 支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(1)
 ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

崩壊熱除去運転モードD1 (起因事象発生頻度1.5/ry)

D1	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	1.68E-09	FC1A	FC1B	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN1失敗
2	1.27E-09	FC2A	FC2B	FNNRA		IRACSFN1失敗+1次ボニー2失敗
3	1.27E-09	FC2A	FC2B	FNNRB		IRACSFN1失敗+1次ボニー2失敗
4	1.12E-09	FC1A	FC2B	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN1失敗
5	1.12E-09	FC2A	FC1B	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN1失敗
6	1.03E-09	FC1B	FC1D	FNNRA		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFC1失敗
7	1.03E-09	FC1A	FC1D	FNNRB		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFC1失敗
8	7.49E-10	FC2A	FC2B	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN1失敗
9	6.86E-10	FC2B	FC1D	FNNRA		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFC1失敗
10	6.86E-10	FC2A	FC1D	FNNRB		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFC1失敗
11	1.65E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRA	外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
12	1.65E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRB	外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
13	1.21E-10	FC2A	CCWSB	FNNRA		IRACSFN1失敗+1次ボニー1失敗+補機冷1失敗
14	1.21E-10	CCWSA	FC2B	FNNRA		IRACSFN1失敗+1次ボニー1失敗+補機冷1失敗
15	1.21E-10	FC2A	CCWSB	FNNRB		IRACSFN1失敗+1次ボニー1失敗+補機冷1失敗
16	1.21E-10	CCWSA	FC2B	FNNRB		IRACSFN1失敗+1次ボニー1失敗+補機冷1失敗
17	1.08E-10	FC1A	CCWSB	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN失敗
18	1.08E-10	CCWSA	FC1B	FNNRD		IRACSFC2失敗+DRACSFN失敗
19	1.03E-10	FC1B	FNNRA	FNNRD		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFN1失敗
20	1.03E-10	FC1A	FNNRB	FNNRD		IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗+DRACSFN1失敗

崩壊熱除去運転モードD2 (起因事象発生頻度 8.2×10^{-2} /ry)

D2	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	4.68E-07	FC1A	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
2	3.12E-07	FC2A	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
3	2.86E-07	FC1D	FNNRA			(IRACSFC1失敗+) IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
4	2.99E-08	CCWSA	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+DRACSFN失敗
5	2.86E-08	FNNRA	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFN1失敗+DRACSFN失敗
6	2.63E-08	FC1A	FNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
7	1.75E-08	FC2A	FNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
8	1.43E-08	CSSSA	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+DRACSFN失敗
9	1.41E-08	HVACD	FNNRA			(IRACSFC1失敗+) IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
10	1.01E-08	EA1	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+DRACSFN失敗
11	9.49E-09	FC1D	FNRA			(IRACSFC1失敗+) IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
12	8.32E-09	HVACA	FNNRD			(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
13	4.06E-09	OSP	DGA	FNNRD		(IRACSFC1失敗+) 外電喪失+1DG失敗+DRACSFN失敗

ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) (前ページからの続き)

崩壊熱除去運転モードD3 (起因事象発生頻度 $9.1 \times 10^{-3}/ry$)

D3	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	5.76E-06	FC2A	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 1次ボニー2失敗
2	4.68E-06	FC1A	FC1D			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFC失敗
3	3.12E-06	FC2A	FC1D			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFC失敗
4	7.49E-07	OSP	DGA	DGB		(IRACSFN1失敗+) 外電喪失+2DG失敗
5	5.52E-07	CCWSA	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+1次ボニー1失敗
6	5.52E-07	FC2A	CCWSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+1次ボニー1失敗
7	4.68E-07	FC1A	FNNRD			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
8	3.12E-07	FC2A	FNNRD			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFN失敗
9	2.99E-07	CCWSA	FC1D			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+DRACSFC失敗
10	2.86E-07	FC1D	FNNRA			(IRACSFN1失敗+) IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
11	2.64E-07	FC2A	CSSSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+1次ボニー1失敗
12	2.64E-07	CSSSA	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+1次ボニー1失敗
13	2.30E-07	FC1A	HVACD			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFC失敗
14	1.98E-07	CCWSA	CV			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+補機冷切換失敗
15	1.87E-07	FC2A	EB1			(IRACSFN1失敗+) 電源1失敗+1次ボニー1失敗
16	1.87E-07	FC2B	EA1			(IRACSFN1失敗+) 電源1失敗+1次ボニー1失敗
17	1.54E-07	HVACA	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 1次ボニー2失敗
18	1.54E-07	FC2A	HVACD			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFC失敗
19	1.54E-07	FC2A	HVACB			(IRACSFN1失敗+) 1次ボニー2失敗
20	1.43E-07	CSSSA	FC1D			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+DRACSFC失敗
21	1.01E-07	FC1D	EA1			(IRACSFN1失敗+) 電源1失敗+DRACSFC失敗
22	9.46E-08	CSSSA	CV			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+補機冷切換失敗
23	8.32E-08	HVACA	FC1D			(IRACSFN1失敗+) IRACSFC1失敗+DRACSFC失敗
24	7.49E-08	FC2A	OSP	DGB		(IRACSFN1失敗+) 外電喪失+1DG失敗+1次ボニー1失敗
25	7.49E-08	FC2B	OSP	DGA		(IRACSFN1失敗+) 外電喪失+1DG失敗+1次ボニー1失敗
26	6.71E-08	CV	EA1			(IRACSFN1失敗+) 電源1失敗+補機冷切換失敗

ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) (前ページからの続き)

崩壊熱除去運転モードD4 (起因事象発生頻度 $7.2 \times 10^{-4}/ry$)

D4	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	1.30E-05	FC1A	FC1B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
2	8.64E-06	FC1A	FC2B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
3	8.64E-06	FC2A	FC1B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
4	5.76E-06	FC2A	FC2B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
5	8.28E-07	FC1A	CCWSB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
6	8.28E-07	CCWSA	FC1B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
7	7.92E-07	FC1A	FNNRB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN1失敗
8	7.92E-07	FC1B	FNNRA			(DRACSFN失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN1失敗
9	7.49E-07	OSP	DGA	DGB		(DRACSFN失敗+) 外電喪失+2 DG失敗
10	5.52E-07	FC2A	CCWSB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
11	5.52E-07	CCWSA	FC2B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
12	5.28E-07	FC2A	FNNRB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN1失敗
13	5.28E-07	FC2B	FNNRA			(DRACSFN失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN1失敗
14	3.96E-07	FC1A	CSSSB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
15	3.96E-07	CSSSA	FC1B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
16	2.81E-07	FC1A	EB1			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[電源1失敗含む]
17	2.81E-07	FC1B	EA1			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[電源1失敗含む]
18	2.64E-07	FC2A	CSSSB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
19	2.64E-07	CSSSA	FC2B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[補機冷1失敗含む]
20	2.30E-07	FC1A	HVACB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
21	2.30E-07	HVACA	FC1B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
22	1.87E-07	FC2A	EB1			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[電源1失敗含む]
23	1.87E-07	FC2B	EA1			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[電源1失敗含む]
24	1.54E-07	FC2A	HVACB			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
25	1.54E-07	HVACA	FC2B			(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗
26	1.12E-07	FC1B	OSP	DGA		(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[外電喪失+1DG失敗含む]
27	1.12E-07	FC1A	OSP	DGB		(DRACSFN失敗+) IRACSFC2失敗[外電喪失+1DG失敗含む]

ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減) (前ページからの続き)

崩壊熱除去運転モードD5 (起因事象発生頻度 $5.2 \times 10^{-2}/\text{ry}$)

D5	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	1.27E-07	DGA	DGB	FNNRB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
2	1.27E-07	DGA	DGB	FNNRA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
3	7.49E-08	DGA	DGB	FNNRD		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
4	3.86E-08	DGA	DGB	BATB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
5	3.86E-08	DGA	DGB	BATA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
6	1.27E-08	FC2B	DGA	FNNRB		(外電喪失+) 1次ボニー2失敗[DG1失敗含む]+1FN失敗
7	1.27E-08	FC2B	DGA	FNNRA		(外電喪失+) 1次ボニー2失敗[DG1失敗含む]+1FN失敗
8	1.27E-08	FC2A	DGB	FNNRB		(外電喪失+) 1次ボニー2失敗[DG1失敗含む]+1FN失敗
9	1.27E-08	FC2A	DGB	FNNRA		(外電喪失+) 1次ボニー2失敗[DG1失敗含む]+1FN失敗
10	1.12E-08	FC1B	DGA	FNNRD		(外電喪失+) IRACSFC2失敗[DG1失敗含む]+DRACSFN失敗
11	1.12E-08	FC1A	DGB	FNNRD		(外電喪失+) IRACSFC2失敗[DG1失敗含む]+DRACSFN失敗
12	7.49E-09	FC2B	DGA	FNNRD		(外電喪失+) IRACSFC2失敗[DG1失敗含む]+DRACSFN失敗
13	7.49E-09	FC2A	DGB	FNNRD		(外電喪失+) IRACSFC2失敗[DG1失敗含む]+DRACSFN失敗
14	6.86E-09	FC1D	DGA	FNNRB		(外電喪失+) DG1失敗+IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
15	6.86E-09	FC1D	DGB	FNNRA		(外電喪失+) DG1失敗+IRACSFN1失敗+DRACSFC失敗
16	4.54E-09	CV	DGA	FNNRB		(外電喪失+) IRACSFN1失敗+DG1失敗+補機冷切換失敗
17	4.20E-09	DGA	DGB	FNRB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
18	4.20E-09	DGA	DGB	FNRD		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
19	4.20E-09	DGA	DGB	FNRA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
20	3.86E-09	FC2B	DGA	BATA		(外電喪失+) FN2失敗[1トレイン全電源喪失]+1FC失敗
21	3.86E-09	FC2A	DGB	BATB		(外電喪失+) FN2失敗[1トレイン全電源喪失]+1FC失敗
22	3.40E-09	NCD	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
23	3.40E-09	NCB	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
24	3.40E-09	NCA	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
25	1.68E-09	FC1A	FC1B	FNNRD		2FC失敗+1FN失敗
26	1.27E-09	FC2A	FC2B	FNNRB		2FC失敗+1FN失敗
27	1.27E-09	FC2A	FC2B	FNNRA		2FC失敗+1FN失敗

表 6.3 支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(2)
タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

崩壊熱除去運転モードD1 (起因事象発生頻度1.7/ry)

D1	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	1.17E-09	FC1B	FC1C	FNNRA		FC2失敗+FN1失敗
2	1.17E-09	FC1A	FC1B	FNNRC		FC2失敗+FN1失敗
3	1.17E-09	FC1A	FC1C	FNNRB		FC2失敗+FN1失敗
4	9.46E-11	FC1B	FC1C	FNRA		FC2失敗+FN1失敗
5	9.46E-11	FC1A	FC1C	FNRB		FC2失敗+FN1失敗
6	9.46E-11	FC1A	FC1B	FNRC		FC2失敗+FN1失敗
7	7.45E-11	CCWSB	FC1C	FNNRA		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
8	7.45E-11	FC1A	CCWSB	FNNRC		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
9	7.45E-11	CCWSA	FC1B	FNNRC		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
10	7.45E-11	CCWSA	FC1C	FNNRB		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
11	6.74E-11	OSP	DGA	DGB	FNNRA	外電喪失+DG2失敗+FN1失敗
12	6.74E-11	OSP	DGA	DGB	FNNRC	外電喪失+DG2失敗+FN1失敗
13	6.74E-11	OSP	DGA	DGB	FNNRB	外電喪失+DG2失敗+FN1失敗
14	5.02E-11	OSP	DGA	DGB	BATB	外電喪失+DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
15	5.02E-11	OSP	DGA	DGB	BATA	外電喪失+DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
16	3.56E-11	CSSSB	FC1C	FNNRA		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
17	3.56E-11	FC1A	CSSSB	FNNRC		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
18	3.56E-11	CSSSA	FC1B	FNNRC		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
19	3.56E-11	CSSSA	FC1C	FNNRB		FC2失敗[補機冷1失敗含む]+FN1失敗
20	2.92E-11	FC1A	FNNRB	FNNRC		FC1失敗+FN2失敗
21	2.92E-11	FC1B	FNNRA	FNNRC		FC1失敗+FN2失敗
22	2.92E-11	FC1C	FNNRA	FNNRB		FC1失敗+FN2失敗
23	2.53E-11	FC1C	EB1	FNNRA		FC2失敗[電源1失敗含む]+FN1失敗
24	2.53E-11	FC1A	EB1	FNNRC		FC2失敗[電源1失敗含む]+FN1失敗
25	2.53E-11	FC1B	EA1	FNNRC		FC2失敗[電源1失敗含む]+FN1失敗
26	2.53E-11	FC1C	EA1	FNNRB		FC2失敗[電源1失敗含む]+FN1失敗
27	2.07E-11	HVACB	FC1C	FNNRA		FC2失敗+FN1失敗
28	2.07E-11	FC1B	HVACC	FNNRA		FC2失敗+FN1失敗
29	2.07E-11	FC1A	HVACB	FNNRC		FC2失敗+FN1失敗
30	2.07E-11	HVACA	FC1B	FNNRC		FC2失敗+FN1失敗
31	2.07E-11	FC1A	HVACC	FNNRB		FC2失敗+FN1失敗
32	2.07E-11	HVACA	FC1C	FNNRB		FC2失敗+FN1失敗
33	1.78E-11	CCWSA	CV	FNNRB		補機冷1失敗+補機冷切換失敗+FN1失敗

崩壊熱除去運転モードD2 (起因事象発生頻度 7.2×10^{-2} /ry)

D2	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	3.24E-07	FC1A	FNNRC			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
2	3.24E-07	FC1C	FNNRA			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
3	2.63E-08	FC1A	FNRC			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
4	2.63E-08	FC1C	FNRA			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
5	2.07E-08	CCWSA	FNNRC			(FC1失敗+) FC1失敗[補機冷1失敗]+FN1失敗
6	9.90E-09	CSSSA	FNNRC			(FC1失敗+) FC1失敗[補機冷1失敗]+FN1失敗
7	8.10E-09	FNNRA	FNNRC			(FC1失敗+) FN2失敗
8	7.02E-09	EA1	FNNRC			(FC1失敗+) FC1失敗[電源1失敗]+FN1失敗
9	5.76E-09	HVACA	FNNRC			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
10	5.76E-09	HVACC	FNNRA			(FC1失敗+) FC1失敗+FN1失敗

タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減) (前ページからの続き)

崩壊熱除去運転モードD3 (起因事象発生頻度 $9.1 \times 10^{-3}/ry$)

D3	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	1.30E-05	FC1A	FC1C			(FN1失敗+) FC2失敗
2	8.28E-07	CCWSA	FC1C			(FN1失敗+) FC2失敗[補機冷1失敗含む]
3	7.49E-07	OSP	DGA	DGB		(FN1失敗+) 外電喪失+DG2失敗
4	3.96E-07	CSSSA	FC1C			(FN1失敗+) FC2失敗[補機冷1失敗含む]
5	3.24E-07	FC1C	FNNRA			(FN1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
6	3.24E-07	FC1A	FNNRC			(FN1失敗+) FC1失敗+FN1失敗
7	2.81E-07	FC1C	EA1			(FN1失敗+) FC2失敗[電源1失敗含む]
8	2.30E-07	HVACA	FC1C			(FN1失敗+) FC2失敗
9	2.30E-07	FC1A	HVACC			(FN1失敗+) FC2失敗
10	1.98E-07	CCWSA	CV			(FN1失敗+) 補機冷1失敗+補機冷切換失敗
11	1.12E-07	FC1C	OSP	DGA		(FN1失敗+) FC2失敗[外電喪失+DG1失敗含む]

崩壊熱除去運転モードD5 (起因事象発生頻度 $5.2 \times 10^{-2}/ry$)

D5	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	5.18E-08	DGA	DGB	FNNRC		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
2	5.18E-08	DGA	DGB	FNNRB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
3	5.18E-08	DGA	DGB	FNNRA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
4	3.86E-08	DGA	DGB	BATB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
5	3.86E-08	DGA	DGB	BATA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗[バッテリー1失敗]
6	7.78E-09	FC1C	DGA	FNNRB		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
7	7.78E-09	FC1B	DGA	FNNRC		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
8	7.78E-09	FC1C	DGB	FNNRA		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
9	7.78E-09	FC1A	DGB	FNNRC		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
10	4.20E-09	DGA	DGB	FNRC		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
11	4.20E-09	DGA	DGB	FNRB		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
12	4.20E-09	DGA	DGB	FNRA		(外電喪失+) DG2失敗+FN1失敗
13	3.40E-09	NCC	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FC1失敗
14	3.40E-09	NCB	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FC1失敗
15	3.40E-09	NCA	DGA	DGB		(外電喪失+) DG2失敗+FC1失敗
16	1.86E-09	CV	DGA	FNNRB		(外電喪失+) 電源1失敗+補機冷切換失敗+FC1失敗
17	1.17E-09	FC1B	FC1C	FNNRA		FC2失敗+FN1失敗
18	1.17E-09	FC1A	FC1C	FNNRB		FC2失敗+FN1失敗
19	1.17E-09	FC1A	FC1B	FNNRC		FC2失敗+FN1失敗
20	6.31E-10	FC1C	DGA	FNRB		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
21	6.31E-10	FC1B	DGA	FNRC		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
22	6.31E-10	FC1C	DGB	FNRA		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗
23	6.31E-10	FC1A	DGB	FNRC		(外電喪失+) FC2失敗[DG1失敗含む]+FN1失敗

表 6.4 支配的な PLOHS シーケンス発生マクロイベント重ね合わせ(3)
タンク型 (機器合体・集中配置)

崩壊熱除去運転モードD1 (起因事象発生頻度1.8/ry)

D1	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRC	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
2	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRD	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
3	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRB	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
4	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRA	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
5	3.89E-10	CCWSB	FNNRA	FNNRC		補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
6	3.89E-10	CCWSA	FNNRB	FNNRD		補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
7	1.86E-10	CSSSB	FNNRA	FNNRC		補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
8	1.86E-10	CSSSA	FNNRB	FNNRD		補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
9	1.32E-10	EB1	FNNRA	FNNRC		電源1失敗+IRACSFN2失敗
10	1.32E-10	EA1	FNNRB	FNNRD		電源1失敗+IRACSFN2失敗

崩壊熱除去運転モードD2 (起因事象発生頻度 1.6×10^{-1} /ry)

D2	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	2.20E-09	FNNRA	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) IRACSFN3失敗
2	1.68E-09	CCWSA	FNRB			(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACS&DRACS共用FN失敗
3	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRC	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
4	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRB	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
5	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRD	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
6	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRA	外部電源喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
7	8.03E-10	CSSSA	FNRB			(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACS&DRACS共用FN失敗
8	5.69E-10	EA1	FNRB			(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACS&DRACS共用FN失敗
9	3.89E-10	CCWSB	FNNRA	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
10	3.89E-10	CCWSA	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
11	3.89E-10	CCWSA	FNNRB	FNNRD		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
12	3.89E-10	CCWSA	FNNRA	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
13	3.59E-10	CCWSA	FC1F	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+DRACSFC1失敗
14	2.28E-10	OSP	DGA	FNRB		(IRACSFC1失敗+) 外電喪失+DG1失敗+IRACS&DRACS共用FN失敗
15	1.86E-10	CSSSB	FNNRA	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
16	1.86E-10	CSSSA	FNNRA	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
17	1.86E-10	CSSSA	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
18	1.86E-10	CSSSA	FNNRB	FNNRD		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
19	1.72E-10	CSSSA	FC1F	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+DRACSFC1失敗
20	1.32E-10	EB1	FNNRA	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
21	1.32E-10	EA1	FNNRA	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
22	1.32E-10	EA1	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
23	1.32E-10	EA1	FNNRB	FNNRD		(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
24	1.22E-10	FC1F	EA1	FNNRB		(IRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN1失敗+DRACSFC1失敗
25	1.20E-10	FC2B	FNNRA	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN2失敗
26	1.20E-10	FC2A	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN2失敗
27	1.08E-10	HVACB	FNNRA	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN2失敗
28	1.08E-10	HVACA	FNNRB	FNNRC		(IRACSFC1失敗+) IRACSFC1失敗+IRACSFN2失敗

タンク型（機器合体・集中配置）（前ページからの続き）

崩壊熱除去運転モードD3（起回事象発生頻度 $1.8 \times 10^{-2}/ry$ ）

D3	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	7.49E-07	OSP	DGA	DGB		(IRACSFN1失敗+) 外電喪失+DG2失敗
2	2.99E-07	CCWSA	FNNRB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
3	1.43E-07	CSSSA	FNNRB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
4	1.01E-07	EA1	FNNRB			(IRACSFN1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN1失敗
5	5.29E-08	CCWSA	CCWSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷2失敗
6	4.06E-08	OSP	DGA	FNNRB		(IRACSFN1失敗+) 外電喪失+DG1失敗+IRACSFN1失敗
7	2.53E-08	CSSSA	CCWSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷2失敗
8	2.53E-08	CCWSA	CSSSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷2失敗
9	1.79E-08	CCWSA	EB1			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+電源1失敗
10	1.79E-08	CCWSB	EA1			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+電源1失敗
11	1.63E-08	CCWSA	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFC1失敗
12	1.47E-08	CCWSA	HVACB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFC1失敗
13	1.21E-08	CSSSA	CSSSB			(IRACSFN1失敗+) 補機冷2失敗
14	9.49E-09	FNNRA	FNRB			(IRACSFN1失敗+) IRACSFN2失敗+DRACSFC1失敗
15	9.49E-09	FNRA	FNNRC			(IRACSFN1失敗+) IRACSFN2失敗+DRACSFC1失敗
16	9.49E-09	FNRA	FNNRB			(IRACSFN1失敗+) IRACSFN2失敗+DRACSFC1失敗
17	9.49E-09	FNRB	FNNRC			(IRACSFN1失敗+) IRACSFN2失敗+DRACSFC1失敗
18	8.58E-09	CSSSA	EB1			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+電源1失敗
19	8.58E-09	CSSSB	EA1			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+電源1失敗
20	7.81E-09	CSSSA	FC2B			(IRACSFN1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFC1失敗

タンク型（機器合体・集中配置）（前ページからの続き）

崩壊熱除去運転モードD4（起因事象発生頻度 $1.4 \times 10^{-3}/ry$ ）

D4	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	2.20E-09	FNNRA	FNNRB	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) IRACSFC3失敗
2	2.20E-09	FNNRA	FNNRB	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) IRACSFC3失敗
3	2.20E-09	FNNRB	FNNRC	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) IRACSFC3失敗
4	2.20E-09	FNNRA	FNNRC	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) IRACSFC3失敗
5	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRC	(DRACSFC1失敗+) 外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
6	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRD	(DRACSFC1失敗+) 外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
7	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRA	(DRACSFC1失敗+) 外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
8	9.73E-10	OSP	DGA	DGB	FNNRB	(DRACSFC1失敗+) 外電喪失+DG2失敗+IRACSFN1失敗
9	3.89E-10	CCWSA	FNNRB	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
10	3.89E-10	CCWSA	FNNRB	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
11	3.89E-10	CCWSA	FNNRA	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
12	3.89E-10	CCWSA	FNNRC	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
13	3.89E-10	CCWSA	FNNRA	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
14	3.89E-10	CCWSB	FNNRA	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
15	3.59E-10	CCWSA	FC3B	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
16	3.59E-10	CCWSA	FC1B	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
17	3.59E-10	CCWSA	FC3D	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
18	3.59E-10	CCWSA	FC1D	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
19	1.86E-10	CSSSA	FNNRB	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
20	1.86E-10	CSSSA	FNNRA	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
21	1.86E-10	CSSSB	FNNRA	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
22	1.86E-10	CSSSA	FNNRC	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
23	1.86E-10	CSSSA	FNNRA	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
24	1.86E-10	CSSSA	FNNRB	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN2失敗
25	1.72E-10	CSSSA	FC3B	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
26	1.72E-10	CSSSA	FC1B	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
27	1.72E-10	CSSSA	FC3D	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
28	1.72E-10	CSSSA	FC1D	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 補機冷1失敗+IRACSFN1失敗+IRACSFC1失敗
29	1.32E-10	EA1	FNNRB	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
30	1.32E-10	EA1	FNNRA	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
31	1.32E-10	EB1	FNNRA	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
32	1.32E-10	EA1	FNNRC	FNNRD		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
33	1.32E-10	EA1	FNNRA	FNNRB		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗
34	1.32E-10	EA1	FNNRB	FNNRC		(DRACSFC1失敗+) 電源1失敗+IRACSFN2失敗

崩壊熱除去運転モードD5（起因事象発生頻度 $5.2 \times 10^{-2}/ry$ ）

D5	失敗確率 (/demand)	事象1	事象2	事象3	事象4	説明
1	7.49E-07	DGA	DGB	FNNRD		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗
2	7.49E-07	DGA	DGB	FNNRB		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗
3	7.49E-07	DGA	DGB	FNNRA		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗
4	7.49E-07	DGA	DGB	FNNRC		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗
5	4.06E-08	DGA	FNNRB	FNNRD		(外電喪失+) DG1失敗+IRACSFN2失敗
6	4.06E-08	DGB	FNNRA	FNNRC		(外電喪失+) DG1失敗+IRACSFN2失敗
7	3.86E-08	DGA	DGB	BATB		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗[バッテリー1失敗]
8	3.86E-08	DGA	DGB	BATA		(外電喪失+) DG2失敗+IRACSFN1失敗[バッテリー1失敗]
9	7.18E-09	CCWSB	DGA	FNNRA		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
10	7.18E-09	CCWSB	DGA	FNNRB		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
11	7.18E-09	CCWSB	DGA	FNNRD		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
12	7.18E-09	CCWSA	DGB	FNNRD		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
13	7.18E-09	CCWSA	DGB	FNNRB		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
14	7.18E-09	CCWSB	DGA	FNNRC		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
15	7.18E-09	CCWSA	DGB	FNNRA		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗
16	7.18E-09	CCWSA	DGB	FNNRC		(外電喪失+) DG1失敗+補機冷1失敗+IRACSFN1失敗

表 6.5 自然循環能力を増強した場合の失敗基準に対応するブール代数式
ループ型 (1次系機器合体・ループ数削減)

$$D1=AFC*BFC*DFC*(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC).$$

$$D2=AFC*DFC*(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC).$$

$$D3=AFC*DFC*(ANC+DNC).$$

$$D4=AFC*BFC*(ANC+BNC).$$

$$D5=AFC*BFC*DFC*(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC).$$

タンク型 (2次系機器合体・ループ数削減)

$$D1=AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC).$$

$$D2=AFC*CFC*(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC).$$

$$D3=AFC*CFC*(ANC+CNC).$$

$$D5=AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC). \text{ OSP}=\text{OMEGA}$$

タンク型 (機器合体・集中配置)

$$\begin{aligned} D1= & AFC*BFC*CFC*DFC*(ANC*BNC*CNC+ANC*BNC*DNC+ANC*CNC*DNC+BNC*CNC*DNC \\ & + (ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC)*(EFC+FFC)) \\ & +AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC*CNC*(EFC+FFC)+(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC)*EFC*FFC) \\ & +AFC*BFC*DFC*(ANC*BNC*DNC*(EFC+FFC)+(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC)*EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC*DFC*(ANC*CNC*DNC*(EFC+FFC)+(ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC)*EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC*DFC*(BNC*CNC*DNC*(EFC+FFC)+(BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC)*EFC*FFC). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D2= & AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC*CNC+ANC*BNC*DNC+ANC*CNC*DNC+BNC*CNC*DNC \\ & + (ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC)*(EFC+FFC)) \\ & +AFC*BFC*(ANC*BNC*DNC*(EFC+FFC)+(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC)*EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC*(ANC*CNC*DNC*(EFC+FFC)+(ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC)*EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC*(BNC*CNC*DNC*(EFC+FFC)+(BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC)*EFC*FFC). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D3= & AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC+(ANC+BNC+CNC)*(EFC+FFC)) \\ & +AFC*BFC*(ANC*BNC*(EFC+FFC)+(ANC+BNC)*EFC*FFC) \\ & +AFC*CFC*(ANC*CNC*(EFC+FFC)+(ANC+CNC)*EFC*FFC) \\ & +BFC*CFC*(BNC*CNC*(EFC+FFC)+(BNC+CNC)*EFC*FFC). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D4= & AFC*BFC*CFC*DFC*(ANC*BNC+ANC*CNC+ANC*DNC+BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC) \\ & +AFC*BFC*CFC*(ANC*BNC*CNC+(ANC*BNC+ANC*CNC+BNC*CNC)*EFC) \\ & +AFC*BFC*DFC*(ANC*BNC*DNC+(ANC*BNC+ANC*DNC+BNC*DNC)*EFC) \\ & +AFC*CFC*DFC*(ANC*CNC*DNC+(ANC*CNC+ANC*DNC+CNC*DNC)*EFC) \\ & +BFC*CFC*DFC*(BNC*CNC*DNC+(BNC*CNC+BNC*DNC+CNC*DNC)*EFC). \end{aligned}$$

$$D5=D1. \text{ OSP}=\text{OMEGA}.$$

7. まとめ

機構において、実用化戦略調査研究で検討されている大型ナトリウム冷却高速炉 3 種類の評価対象概念の崩壊熱除去系に対し、それぞれシステムモデルを作成し、フォールトツリー手法によって PLOHS シーケンス発生頻度を算出することにより信頼度評価を実施した。これにあたり、国内軽水炉の運転経験を基に作成された機器故障率データ^[1]を活用することにより、より現実的な評価となるよう努めた。その結果、以下の結論を得た。

- ・ ループ数及びサポート系統数の削減を図った 3 種類の評価対象概念は、共通要因故障が排除されているという条件で、内的事象に起因する PLOHS シーケンスの発生頻度は、設計ベースの評価で 10^{-6} /炉年未満を達成する見通しを得た。また、支配的な事象重ね合わせの整理を行い、系統的な分析を加えることにより、信頼度向上に有効な知見をまとめた。
- ・ 仮想的に実機の性能ベースの評価を試みるため、予め設計マージン分を見込んで、崩壊熱除去が（総除熱ループ数-1）ループの自然循環除熱によっても成功となるように、自然循環除熱容量の評価値が増強された場合の信頼度評価を実施した。その結果、PLOHS シーケンス発生頻度が設計ベースの評価と比較して 1 桁程度小さくなることを確認した。

今後の課題としては、評価対象の概念設計研究の進捗を反映した評価を進めるとともに、共通要因故障及び修復効果の検討、機器重要度評価及び感度解析による検討等が挙げられる。

略語一覽

PSA	Probabilistic Safety Assessment
PLOHS	Protected Loss of Heat Sink
DRACS	Direct Reactor Auxiliary Cooling System
IRACS	Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System
PRACS	Primary Reactor Auxiliary Cooling System

謝辞

本報告書の執筆に当たり、FBR システム Gr 三原隆嗣副主任研究員及びリスク評価 Gr 栗坂健一副主任研究員に数多くの助言を頂き、また、原子力システム(株)和田明氏に信頼度評価の解析作業を実施して頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 財団法人 原子力安全研究協会：PSA 用故障率データに関する調査(1997)
- [2] 新部信昭、他：ナトリウム冷却炉の検討 -平成 11 年度報告-、JNC TN9400 2000-074(2000)
- [3] 日置一雅、他：大型高速炉のレベル-1 PSA 概括評価、PNC TN9410 93-134(1993)
- [4] 可児吉男、他：高速増殖炉原型炉レベル 1-PSA、PNC ZN9410 91-381(1991)
- [5] 栗坂健一：高速炉機器の故障率データハンドブック、PNC ZN9410 93-228(1993)