

「もんじゅ」の崩壊熱除去系の設計評価

Design Evaluation of MONJU Decay Heat Removal Systems

高速増殖炉開発本部 建設計画部

1. まえがき

「もんじゅ」の原子炉停止後の崩壊熱除去は、1次、2次主冷却系循環ポンプボニーモータ運転及び補助冷却設備空気冷却器により行われる。これらの設備は主冷却系に対応して3系統から成り、いずれか1系統の運転で崩壊熱を除去し得る。また炉心と1次主冷却系中間熱交換器、1次主冷却系中間熱交換器と補助冷却設備空気冷却器の伝熱中心差を適切にとり、更に補助冷却設備空気冷却器出口ダクトを適切に長くすることにより、これらの設備は自然循環除熱能力を有する設計となっている。更に長期にわたる崩壊熱除去にあたってはメンテナンス冷却系設備の崩壊熱除去機能を期待することも可能である。

本報告は「もんじゅ」の崩壊熱除去系統について実施した設計評価結果について述べたものである。

2. 崩壊熱除去系の系統構成

崩壊熱を除去する補助炉心冷却系の型式には直接炉心冷却系、主冷却系を共用する方式等があるが「もんじゅ」では2次主冷却系を共用する方式を採用、自然循環能力を有する設計とすることにより崩壊熱除去機能の高い系統構成としている。

崩壊熱を除去する方法は次のとおりである。

a) 補助冷却設備等による強制循環除熱

原子炉トリップ時、1次、2次主冷却系循環ポンプは主モータ運転からボニーモータ運転に自動的に引継がれ崩壊熱は補助冷却設備空気冷却器により大気へ放散される。

b) 補助冷却設備等による自然循環除熱

全動力電源喪失時等の強制循環による崩壊熱除去が出来ない場合には自然循環による崩壊熱除去状態へ移行する。

c) その他メンテナンス冷却系設備がありメンテナンス期間以外での運用では補助冷却設備機能喪失時に運転する。

系統構成を図1に示す。

3. 崩壊熱除去系フォールトツリー評価

補助冷却設備についてフォールトツリーを作成し、また強制循環除熱時起動失敗及び自然循環除熱時起動失敗について評価を実施した。図2に崩壊熱除去系のフォールトツリーを示す。

また評価にあたって必要となる故障率等のデータはCRBRP PSAR、WASH-1400、IEEE std 500-1977等に記載のデータを使用した。

(1) フォールトツリー評価にあたっての前提

補助冷却設備1系統の起動失敗は次のような場合がある。

- a) 補助冷却設備等構成機器の起動失敗
- b) 補助冷却設備等構成機器の運転失敗
- c) 補助冷却設備計装・制御系の故障
- d) 冷却系漏えい事故

評価は、補助冷却設備の起動失敗確率を計算することで行ったがここで起動失敗とは起動失

敗及び起動後20時間以内に故障等で運転失敗にいたった場合を含むものとして定義した。即ち起動20時間後のアンアベイラビリティを求めた。

なお、自然循環除熱時においては補助冷却設備構成機器の起動失敗に対して運転員による手動操作を考慮している。

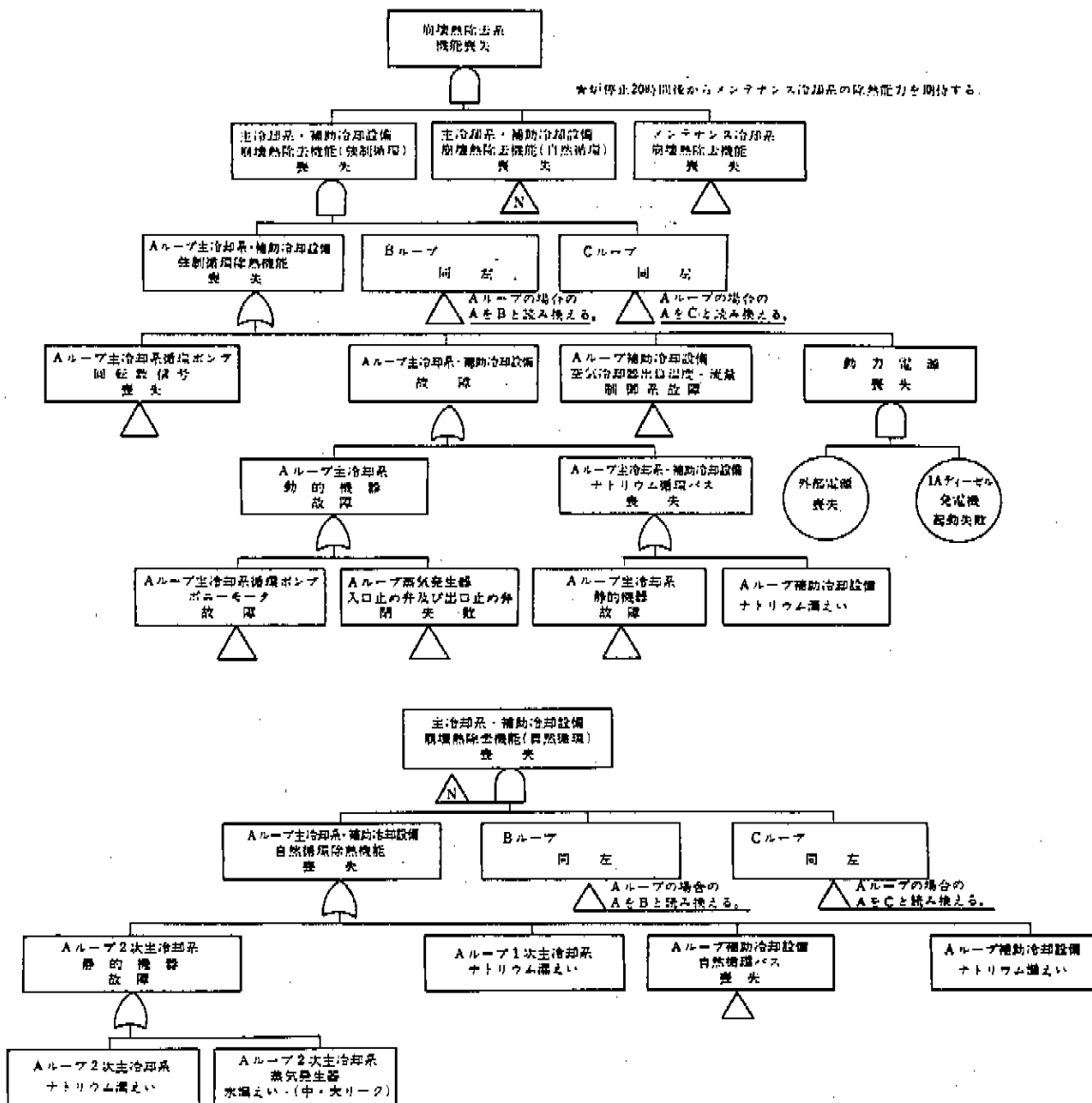


図2 崩壊除熱系のフォールトツリー

(2) フォールトツリー評価結果

1ループの補助冷却設備の起動失敗確率を表1に示す。確率分布はモンテカルロ計算により求め、95%、5%各信頼水準値は1200回のモンテカルロ試行により求めた。また表2に補助冷却設備3ループ共に起動失敗にいたる確率を示す。

4. 崩壊熱除去系の信頼性評価

崩壊熱除去系の作動要求事象として、作動要求時に補助冷却設備3系統が期待できる場合、3系統のうち1系統が期待できない場合を考慮して事象を想定し、非信頼度を求めることにより信頼性評価を実施した。

(1) 崩壊熱除去系作動要求事象及び頻度、使命時間

a) 計画停止

「もんじゅ」では、燃料交換のため年2回停止する。従って計画停止頻度は2/炉年である。また燃料交換に要する時間を720時間(30日)として、計画停止時使命時間を

720時間とする。

b) 全動力電源喪失

全動力電源喪失頻度は、外部電源が喪失し、同時に3台の非常用ディーゼル発電機が起動に失敗する確率として計算する。

非常用ディーゼル発電機の共通原因故障を考慮し、非常用ディーゼル発電機が3台共に起動失敗にいたる確率を以下で評価する。

$$(3 \times 10^{-2}) \times (3 \times 10^{-2}) \times 1$$

ただしディーゼル発電機1台起動失敗確率:

$$3 \times 10^{-2} / \text{demand}$$

これに外部電源が喪失する頻度 $0.2/$ 炉年を考慮し全動力電源喪失頻度を $1.8 \times 10^{-4} /$ 炉年とする。外部電源が復帰すればプラントは再び強制循環モードに移行できるが、使命時間は、プラントが低温停止の状態に移行し、プラントを再起動できる時間とし、一義的には決められないが余裕を考慮し720時間とする。

*注) $0.2/$ 炉年:外部電源故障率 $2.3 \times 10^{-2} /$

表1 補助冷却設備(1ループ)起動失敗確率

	強制循環除熱起動失敗	自然循環除熱起動失敗
95%信頼水準値	$2.1 \times 10^{-2} / \text{demand}$	$2.1 \times 10^{-3} / \text{demand}$
5%信頼水準値	$5.7 \times 10^{-3} / \text{demand}$	$1.3 \times 10^{-4} / \text{demand}$
メディアン値	$5.8 \times 10^{-3} / \text{demand}$	$2.5 \times 10^{-4} / \text{demand}$

表2 補助冷却設備(3ループ)起動失敗確率

	強制循環除熱起動失敗	自然循環除熱起動失敗
95%信頼水準値	$7.3 \times 10^{-7} / \text{demand}$	$7.1 \times 10^{-10} / \text{demand}$
5%信頼水準値	$1.1 \times 10^{-7} / \text{demand}$	$5.1 \times 10^{-12} / \text{demand}$
メディアン値	$2.1 \times 10^{-7} / \text{demand}$	$1.5 \times 10^{-11} / \text{demand}$

hr (WASH-1400) から算出。

c) 自然循環を阻外するような事象

この事象に含まれるのは主冷却系の漏えい事象である。主冷却系の配管、機器漏えい故障率はCRBRPデータを用い以下の値とする。

1次冷却系漏えい	$1.8 \times 10^{-6} / \text{hr} \cdot \text{Loop}$
2次冷却系漏えい	$5.17 \times 10^{-6} / \text{hr} \cdot \text{Loop}$
補助冷却設備漏えい	$0.45 \times 10^{-6} / \text{hr} \cdot \text{Loop}$
計	$7.42 \times 10^{-6} / \text{hr} \cdot \text{Loop}$

「もんじゅ」の稼働率を80%とすると、本事象の年間頻度は、3ループで0.16/炉年となる。また使命時間は漏えい機器修復時間552時間(CRBRPデータ)を目安とし、修復作業開始時間を考慮して720時間とする。

d) 蒸気発生器水漏えい(小漏えい)

蒸気発生器水漏えいの発生頻度をCRBRP PSARで用いている評価法をベースに更に技術的判断を加えて評価する。CRBRP PSARでの評価式を用い「もんじゅ」の設計を考慮して次の漏えい故障率を用いた。

蒸気発生器水漏えい故障率:

$$9.52 \times 10^{-6} / \text{hr} \cdot \text{Loop}$$

本事象の発生頻度は、「もんじゅ」の稼働率を80%として3ループで0.2/炉年となる。また使命時間は、漏えい機器修復時間694時間(CRBRPデータ)を目安とし修復開始作業時間を考慮して720時間とする。

e) その他の事象

冷却系に起因する事象で自然循環を阻外しない事象及び他の過渡事象発生頻度は、WASH-1400に基づいて判断する。WASH-1400では過渡事象発生頻度を10回/炉年で評価している。「もんじゅ」において全過渡事象発生頻度を10回/炉年とし、これから「全動力電源喪失」、「自然循環を阻外する事象」並びに「蒸気発生器水漏えい」の各発生頻度を引いた値である9.6/炉年を「その他の事象」の発生頻度とする。また使命時間は、1次、2次冷却

系、水蒸気系の主要な動的機器の故障を考慮し、その平均修復時間を目安として、これに修復作業開始時間を考慮して240時間とする。

(2) 信頼性評価での崩壊熱除去系の前提

崩壊熱除去系の信頼性評価を行う上での前提を示す。

a) 崩壊熱除去に必要なループ数は、強制循環時、自然循環時いずれもの場合についても1ループで除熱可能である。

b) 自然循環流路確保に必要な補助冷却設備構成機器(空気冷却器出入口ダンパ、ベーン等)は、起動に失敗したとしても固着モードを除き、運転員の手動操作により正常に復帰できる。

c) メンテナンス冷却系設備による除熱は、炉停止20時間後から、その除熱機能を期待する。

(3) 崩壊熱除去系の非信頼度

a) 計画停止時の非信頼度

計画停止時には、補助冷却設備3ループ期待できる。崩壊熱除去系機能喪失確率は3ループ計算モデルにより 5.27×10^{-11} の値を得る。計画停止頻度2/炉年から非信頼度は 1.05×10^{-11} /炉年となる。

b) 全動力電源喪失時の非信頼度

全動力電源喪失時には自然循環モードへと移行する。また期待できるループ数は3ループである。電源喪失のためメンテナンス冷却系は期待できない。全使命時間中自然循環モードで除熱するとして、その崩壊熱除去系機能喪失確率は 1.01×10^{-7} と計算される。全動力電源喪失頻度は 1.8×10^{-4} /炉年から非信頼度は 1.82×10^{-11} /炉年となる。

c) 自然循環を阻外するような事象時の非信頼度

冷却系漏えい事故時には、補助冷却設備2ループに期待することになる。崩壊熱除去系機能喪失確率は、2ループ計算モデルから 6.89×10^{-8} の値を得る。自然循環を阻外するような事象の発生頻度が0.16/炉年から非信頼度は 1.10×10^{-8} /炉年となる。

表3 信頼性評価結果

項目	評価結果	備考
総合信頼度	1.3×10^{-8} / 炉年	
補助冷却設備 強制循環 起動失敗	2.1×10^{-7} / demand	起動20時間後のアンアベイラビリティ
補助冷却設備 自然循環 起動失敗	1.5×10^{-11} / demand	同上

d) 蒸気発生器水漏えい時(小漏えい)の非信頼度

蒸気発生器水漏えい時には漏えいループは炉停止20時間までは崩壊熱除去運転を行う。従って炉停止20時間までは補助冷却設備3ループ期待できる。その後、漏えいループを停止する。崩壊熱除去系機能喪失確率は 8.80×10^{-8} と計算される。

蒸気発生器水漏えい頻度 0.2 / 炉年から非信頼度は 1.76×10^{-8} / 炉年となる。

e) その他の事象時の非信頼度

補助冷却設備3ループ期待できる事象であり、3ループ計算モデルより崩壊熱除去系機能喪失は、 5.27×10^{-11} の値を得る。そ

の他の事象頻度 9.6 / 炉年から非信頼度は 5.06×10^{-10} / 炉年となる。

(4) 崩壊熱除去系総合非信頼度

崩壊熱除去系の総合的な非信頼度は以上の各事象の非信頼度から 1.3×10^{-8} / 炉年と評価される。

5. まとめ

崩壊熱除去系のフォールトツリー評価及び信頼性評価結果を表3に示す。「もんじゅ」崩壊熱除去系は主冷却系に対応した3系統の補助冷却設備の設置及び自然循環除熱能力を有する設計とすることにより崩壊熱除去能力は十分信頼性の高いものであると考える。