

非常用炉心冷却系(ECCS)作動事象の分析

Evaluation of ECCS Actuation Events

麻坂 顯一 (Ken-ichi Osaka)* 加藤 啓之 (Hiroyuki Kato)*
 木田 正則 (Masanori Kida)* 原 信一 (Shin-ichi Hara)*
 熊田 雅充 (Masamitsu Kumada)*

要約 商業用の原子力発電所が運転を開始して以来、長年にわたって多くの事故の経験がなされてきている。冷却材事故発生時に炉心の安全性を護るための非常用炉心冷却系(ECCS:Emergency Core Cooling System)が作動した事象は、国内では少ないが、海外では、現在まで数多く経験してきている。これらの事例から教訓を学ぶことは、原子力発電の信頼性向上を図るための有効な手段の一つと考えられる。

本研究報告では、現在国内外で運転中の原子力発電所で、これまでに経験した事故情報のデータベースの中から、ECCSが作動した事象を検索し、原因を分析することにより再発防止対策案を検討する。まず、検索したECCS作動事象から、分析評価に役立てるために2次データベース(SDBEE: Secondary Data Base for ECCS Events)を構築した。次に、SDBEEを利用して、事象の原因を以下の2つに分類し、分析する。(1)実信号: 温度・圧力等のプラントパラメータが実際に変動し、ECCS作動条件を満たした事象。(2)誤発信: 温度・圧力等のプラントパラメータに変動はなく、不適切な安全防護信号でECCS作動に至った事象。

分析の結果、実信号によるものの主要因は、弁等の機器故障によるプラント誤動作であること、および誤発信の主要因は、保守作業時におけるECCS作動信号ブロックの不適切によるものであることが明らかとなった。主要な事象に対して、再発防止のための課題を提示する。

キーワード 非常用炉心冷却系, 事故の経験, 実信号, 誤発信, 機器故障, 誤動作, 再発防止

Abstract Since commercial nuclear power plants began being operated, a number of incidents have occurred. Actuation of the emergency core cooling system (ECCS), which maintains core safety in the case of coolant accidents, occur very few times in Japan, but occur rather often abroad. Learning from these experiences is one effective means for improving the reliability of nuclear power generation. In this report, information on ECCS actuation events is retrieved from data bases on accidents experienced at operating nuclear power stations in Japan and abroad up to the present. Through analysis of the causes of these events, various means of preventing the recurrence of similar events are discussed. First, the Secondary Data Base for ECCS Events (SDBEE) was established from the data retrieved, to facilitate cause analysis. Next, the causes were classified into the following two categories and analyzed by adapting SDBEE. (1) Actual Signal : ECCS actuation events due to an actual signal triggered by changes in such actual plant parameters as pressure, temperature etc. (2) Spurious Actuation : ECCS actuation events due to an improper safeguard signal without an accompanying change in such actual plant parameters as pressure, temperature etc. It has been reported that the dominant causes of actual signal events are improper plant operation due to malfunction of such equipment as valves, and one kind of spurious actuation event is incorrect blocking of the ECCS actuation signal during maintenance work. Some means for preventing the recurrence of major events are presented.

Keywords ECCS, accident's experience, actual signal, spurious actuation, equipment malfunction, improper plant operation, prevent recurrence

*(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

原子力発電の安全性について議論されるときに、必ず取り上げられる項目の一つに非常用炉心冷却系（ECCS：Emergency Core Cooling System）がある。ECCSは、原子力発電所設置許可申請の段階で、安全設計審査指針等に基づき設計審査されるもので、冷却材喪失事故時にその安全機能を発揮することが期待されているものである。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

これまでのECCSに関連した研究の動向をみると、事故時のプラント挙動を実験あるいは計算機により解析し、炉心に損傷を与えるような重大な事象に進展することを防止するために、ECCSが十分な機能を発揮し得るかどうかを検証することを目的とした研究が多く、ECCSの性能あるいはシステムの健全性に係わるものが殆どであった。

炉心の安全性確保を考えると、ECCSが重要なシステムの一つであることは論を待たない。一方、ECCSそのものの重要性ではなく、見方を変えて、ECCS作動が必要となるようなプラント状態に至らしめないようにすることが、原子力発電の安全性を考えると、より重要な要件であると言える。ECCSが作動することは、プラント設備に与える技術的な面からの影響が大きいと同時に、一度ECCSが作動するような状況が発生した場合の社会的反響の大きさにも考慮しながら検討すべきである。

どのようなプラント状態のときにECCSが作動するかについてみると、実際に炉心の安全性確保のためにECCS作動を必要とするプラント状態になって作動したものと、そうではなくて、誤操作・誤動作によって作動が引き起こされる場合とがあることがわかる。プラントがこれらの状態に達することは、技術的および社会的にみて重要であり、いずれも避けることが望ましい。

一方、類似のシステムを持つ同型式の原子力発電所で、実際に経験した事例を参考にすることが、同様な事象の再発防止のための有力な手がかりになり得ると考えられる。

このような観点から、本稿では、過去に経験したECCS作動事象の内から事象発生の経緯・原因等を調査し、その傾向を把握することにより、ECCSが作動するようなプラント状態に至った事象の再発防止対策について考察する。

2. 加圧水型原子力発電所のECCS概要

加圧水型原子力発電所のECCSは、蓄圧注入系、高圧注入系および低圧注入系で構成されている。ECCSは、一次冷却材喪失事故・蒸気発生器伝熱管破損事故等に対し燃料取替用水タンクのほう酸水を注入して炉心の冷却を行うとともに、原子炉に負の反応度を添加し、燃料および燃料被覆管の重大な損傷を防止する。また、主蒸気管破断事故・主蒸気の異常な減圧等による一次冷却材温度の低下時に、ほう酸水を注入し負の反応度を添加する。

ECCSの系統構成の一例を図1に示す。蓄圧注入系は、加圧されたほう酸水を貯える蓄圧タンクを備え、一次冷却系の圧力が低下すると自動的にほう酸水を注入する。高圧注入系は充てん/高圧注入ポンプを、低圧注入系は余熱除去ポンプをそれぞれ備え、事故時には燃料取替用水タンクに貯蔵するほう酸水を原子炉に注入する。⁽⁴⁾

燃料取替用水タンクの水位が低くなると、水源を格納容器再循環サンプに切替えて再循環モードに移行する。

高圧注入系および低圧注入系は、以下に例示するECCS作動信号で自動作動する。

ポンプ電源は、各々独立した2系統の非常用母線に接続されている。ディーゼル発電機がECCS作動信号により自動起動し、外部電源喪失時にはこれらの非常用母線に電源供給することになっている。

1. 原子炉圧力低と加圧器水位低の一致
2. 原子炉圧力異常低
3. 主蒸気流量高と一次冷却材平均温度（ T_{avg} ）異常低の一致
4. 主蒸気流量高と主蒸気圧力低の一致
5. 主蒸気差圧高
6. 主蒸気圧力低
7. その他

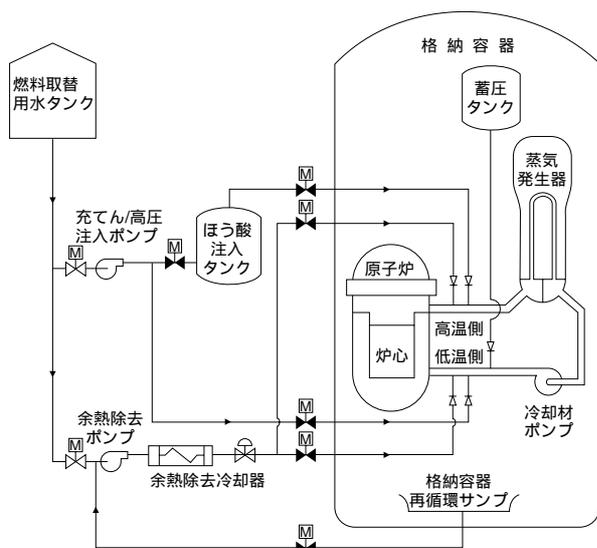


図1 非常用炉心冷却系（ECCS）の構成

以下に、ECCS作動事象に基づく分析評価の概要を記す。

3. 調査要領

我が国および米国の原子力発電所で経験したECCS作動事象を調査し分析評価する。

3.1 情報源

国内事例は、法律や大臣通達等に基づき通商産業省に報告が義務付けられている事故報告⁵⁾から抽出する。一方米国の事例は、法律に基づき米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）への報告が義務付けられている原子力発電所設置者事象報告（LER：Licensee Event Report⁶⁾からそれぞれECCS作動事象を抽出する。

3.2 調査対象期間

1983年4月から1992年3月の約10年間に発生した事象を調査する。但し、1992年7月までに報告された事象を対象とする。

3.3 調査対象プラント

ウエスティングハウス社（WH：Westinghouse Electric Corporation）型の加圧水型原子炉（PWR：Pressurized Water Reactor）で発生した事象を対象とする。

4. 調査経緯

4.1 2次データベースの構築

実際のプラントにおけるECCS作動の経験事象を調査するため、米国の発電所で発生した事象については、豊富な情報源である米国LERの中から目的とする事象を抽出して分析評価することとした。

LERは、米国NRCが、発電所で発生した事象について文書での報告を義務付けているものであり、報告されるべき事象としては、プラントの安全性に係わるものが広範囲に含まれている⁽⁶⁾従って、必ずしもECCS作動事象のみに関する報告ではないため、事象の進展の解明にあたっては、内容を注意深く把握する必要があった。そこで、抽出した個々の事象についてECCS作動に係わる情報を的確に把握するため、事象発生の原因・経緯・対策等に整理するための様式を定め、ECCS作動事象2次データベース（SDBEE：Secondary Data Base for ECCS Events）を構築することとした。SDBEEは、市販のデータベースソフトを使用して作成している。事象の原因・経緯・影響等の分類コード付けをすることにより、事象発生傾向把握・重要性評価を容易に行うことができる構成になっている。その一例を図2に示す。

このデータベース構築には、多大の労力を要したが、以降の分析評価に大いに役立てることができた。

4.2 情報の分類

ECCS作動事象2次データベース（SDBEE）では、事象の類似性を明確にし要因分析に役立てるための分類を付加した。

1. 原因分類

ECCSが作動した事象の全体を概観してみると、プラントが炉心への非常用冷却水注入

ECCS作動事象調査票

LER No.	275-84030	WANO No.	[整理 No.]	No.	47
発生日	841124	NIC 報告 No.			
ユニット名	Diablo Canyon 1	炉型 : PWR	メーカー : WH	出力 : 1124	国 : 米
		運開 : 8505			所有者 : PGE

概要	タービン制御システムとダンブ制御システムの不調で、タービン・原子炉トリップとその後運転員がダンブ弁を圧力制御モードに切り替え時セット値の確認忘れによりダンブ弁開で、SI 動作。					
状況	モード1・タービン制御システムの不良で負荷急減・制御棒はフラックスマッピングのため手動であったので、Tavg 上昇・40%ダンブ弁が開かず、35%大気放出弁開となるまでに Tavg570Fに上昇・35%ダンブ弁が開となった時、Tavg 高と蒸気圧減によりSGレベル異常高でタービントリップと原子炉トリップ・蒸気ダンブ制御を圧力モードに切り替えたと時、40%ダンブ弁が開となり、蒸気流量高と Tavg 異常低で SI 動作。	プラントモード：〔1〕出力運転(タービンおよび原子炉トリップ後のSI)	冷却材流出： []	冷却材収縮： []	蒸気流出： []	給水流出： []
状況		1次系圧力低下： []	2次系圧力低下： []	CV内圧力上昇： []	信号種別：〔8〕主蒸気流量高+Tave異常低 ([])	
影響	全ESF設備は設計どおり動作・注水。	SI状況：〔3〕注水あり	影響分類：〔] []	([])		
原因	負荷急減の原因は、タービン制御圧力トランスミッターの結線ゆるみ・40%ダンブ弁が開かなかったのは、図面の誤りによる結線誤り・SIの原因は人的エラー(タービンが起動した時にダンブ弁圧力コントローラを事前に通常運転にセットしなかったため)。	原因分類：〔11〕実信号(操作)([])	機器：〔60〕主蒸気ダンブ弁	故障モード：開		根本原因：圧力制御モード切替え時のセット値の確認忘れ ([])
対策	線のゆるみ修正・結線図と配線の修正・手順の修正(「圧力制御モード」に変える前にコントローラのセットをチェック、およびTavgが無負荷値に近いことをチェックすること)・直引継時に異常なコントローラセットをリステイングすること。	事象パターン〔710〕	タービンバイパス蒸気過剰	(原子炉トリップ後)		

図2 2次データベース(SDBEE)の例

を実際に必要とする状態に至ったかどうか、すなわち、機器の故障あるいは運転員・保守作業員の不注意が原因となって1次系および2次系流体の温度・圧力・流量・レベルが実際に変動することにより、ECCS設計にあたって、それが作動すべき条件として設定した値に至った結果ECCS作動信号が発せられたものと、プラントの状態が、そのような作動条件を満たす状態になっていないにもかかわらず、電気・信号系の故障あるいは運転員・保守作業員の不注意により作動信号が発せられたものに大別される見通しが得られた。

前者が炉心の安全性にとって重要な事象であることは勿論のこと、後者においても、プラント設備に与える影響および保守管理上の安全性に重要な影響を与える事象であることから、再発防止すべき重要事象と考えられる。

前者を実信号、後者を誤発信として大分類する。

(a) 実信号：

温度・圧力等のプラントパラメータが実際に変動し、ECCS作動条件を満たして作動に至った事象。

(b) 誤発信：

温度・圧力等のプラントパラメータに変動はなく、電気・信号系の故障等でECCS作動に至った事象。

更に、実信号・誤発信それぞれについて、機器故障、操作ミス、作業ミスに中分類する。

2. 機器分類

上記機器故障・操作ミス・作業ミスの各々について、それが関係した機器に小分類するものとする。

実信号に類するものは、蒸気発生器・タービンバイパス弁等といった機器別に、また、誤発信に類するものは、電源系・チャンネル部・トレン部といった信号系別に分ける。チャンネル部とは、系統の圧力・流量等のパラ

メータの変化を検出し、異常な変化を示した場合に信号を出す部分を言う。また、トレン部とは、チャンネル部の信号をうけて、ロジック回路により保護系機器を作動させるための信号をつくり出す部分を言う。なお、チャンネル部・トレン部共、信頼性をあげるために複数系列で構成されている。

3. 運転状態分類

ECCS作動事象が発生した時点のプラントの運転状態により、出力運転・高温停止・低温停止等に分類する。

4. 作動信号分類

原子炉圧力低、主蒸気圧力低等ECCS作動信号により分類する。

5. 調査結果

調査対象期間の約10年間で268件のECCS作動事象を抽出した。このうちの殆どは、米国LERから抽出したものであり、我が国では僅かに1件報告されているのみであった。図3に抽出した268件のECCS作動事象の発生状況を、実信号・誤発信および発生したときのプラント運転状態別に示す。

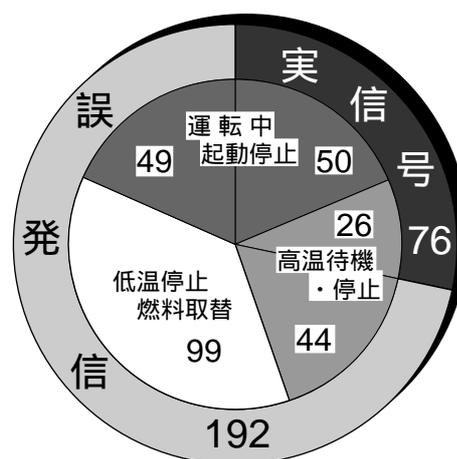


図3 ECCS作動事象の発生状況

実信号による事象は76件であり、その内訳としては運転中あるいは起動停止時に50件、高温待機・停止時に26件発生している。低温停止時ある

いは燃料取替時には発生していないのは、実信号の定義を温度・圧力等のプラントパラメータが実際に変動したものとしたことからして当然のことと言える。一方、誤発信による事象は192件であり、その内訳としては運転中あるいは起動停止時に49件、高温待機・停止時に44件、低温停止時あるいは燃料取替時に99件発生している。温度・圧力の比較的低い低温停止時・燃料取替時に幾分多く発生していることは注目に値する。

5.1 実信号による事象

図4に実信号による事象の発生状況を原因別に示す。機器故障によるものが42件と比較的多く発生している。また、起動停止に伴う運転操作ミスによるものが23件、直接運転には関係しないところで、作業ミスによるものが11件発生していることには注意が必要である。

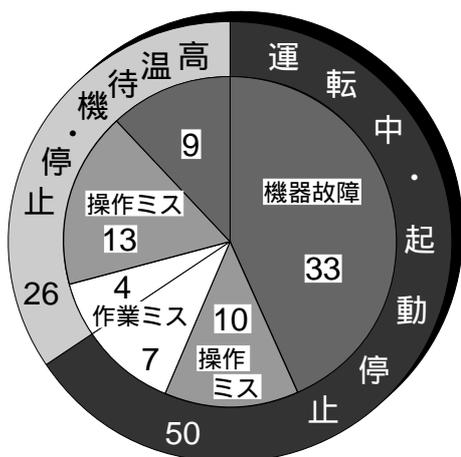


図4 実信号による事象の発生状況

実信号による事象について、原因となった機器・その故障モード・事象の進展およびECCS作動信号をパターン化して整理したものを図5に示す。

1次系機器に係わるものとして、蒸気発生器伝熱管破断による1次冷却水の2次系への流出あるいは加圧器スプレー弁・加圧器逃がし弁の誤開等により原子炉圧力の低下に至ったものがある。

また、2次系機器に係わるものとしては、タービンバイパス弁の開過剰や閉止失敗、主蒸気加減弁・

主蒸気隔離弁・主蒸気安全弁・主蒸気逃がし弁の誤開等あるいは給水制御系の不調による給水過剰により主蒸気流量高や主蒸気圧力低に至ったものがみられた。

5.2 誤発信による事象

図7に誤発信による事象192件の発生状況を原因別に示す。作業ミスによるものが120件、操作ミスによるものが21件あり、誤発信全体の約73%が人的要因で発生している。また、機器故障による誤発信が51件みられた。

誤発信による事象について、原因となった機器・故障モード・事象の進展およびECCS作動信号をパターン化して整理したものを図6に示す。

計装用電源に係わるものとして、作業時の不手際あるいはインバータの故障により1系列の計装用電源が喪失したときに、他のチャンネルが作業等でトリップ状態にあったため、2チャンネル動作の条件が成立してECCS作動に至ったものがみられた。また、1系列の電源喪失だけで2チャンネル動作の条件が成立する電源系列構成になっているプラントがみられたのは注意を要する。

また、チャンネル部に係わるものとして、バイステータブルやトランスミッタの故障あるいはそれらの機器に係わる作業時の確認不足が原因で2チャンネル動作の条件を成立させたものがみられた。

プラントが停止している状態では、原子炉圧力低および主蒸気圧力低によるECCS作動を阻止するためにブロック回路が設けられている。トレン部に係わるものとして、プラント停止操作中にこのブロック操作を忘れた場合や、トレン部の機能確認試験および保守作業時にブロックを誤って解除してしまったこと等によりECCS作動に至ったものが数多くみられた。また、リレーや回路基盤の故障等トレン部の構成機器の故障により、ロジック回路から直接ECCS作動信号が発信された事象も若干発生している。

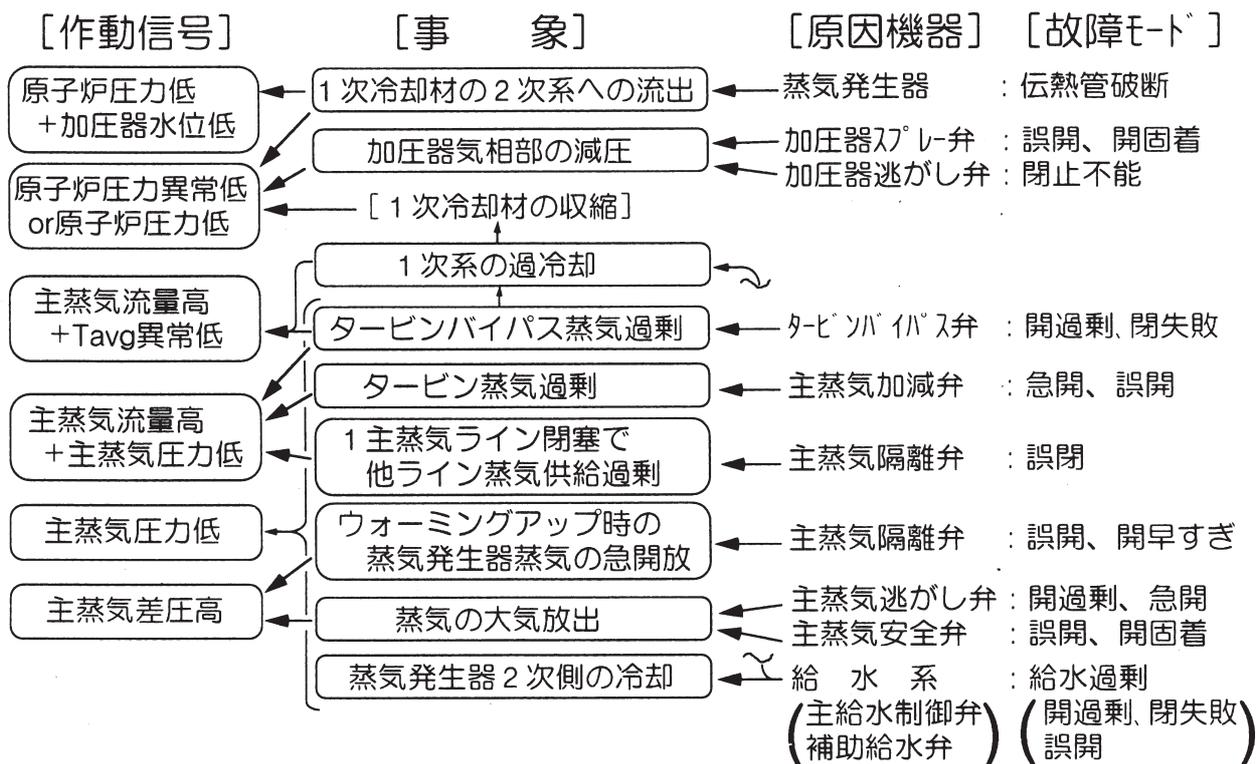


図5 実信号の事象パターン

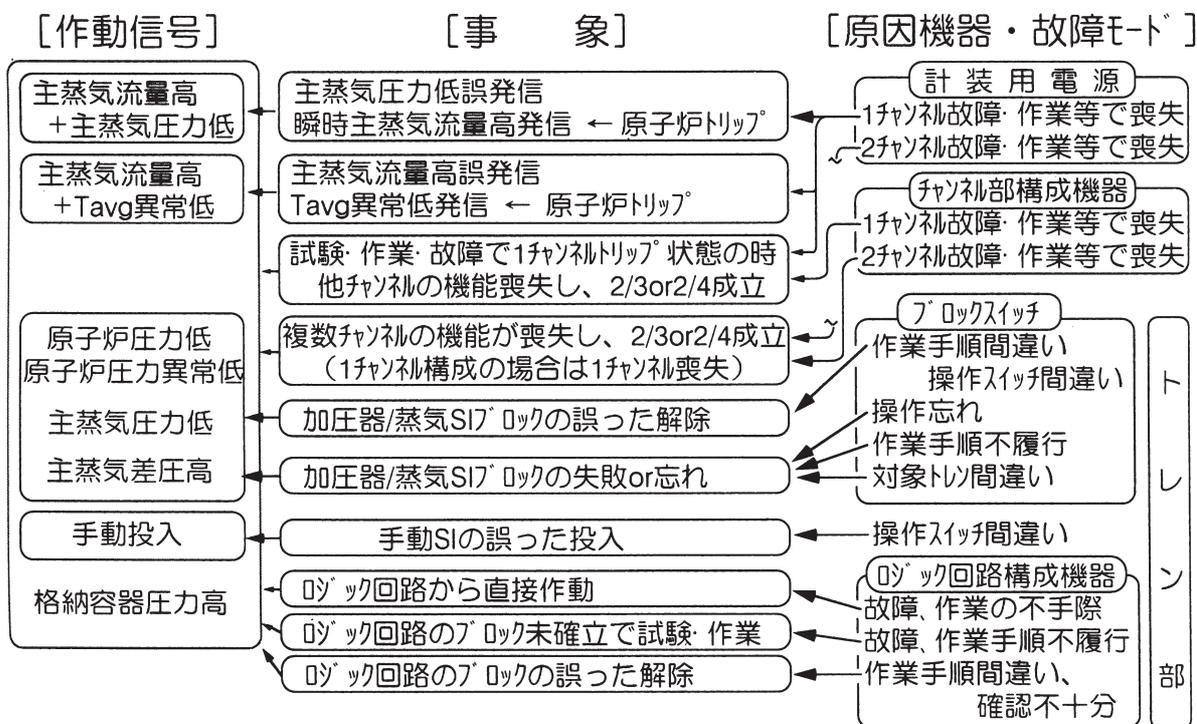


図6 誤発信の事象パターン

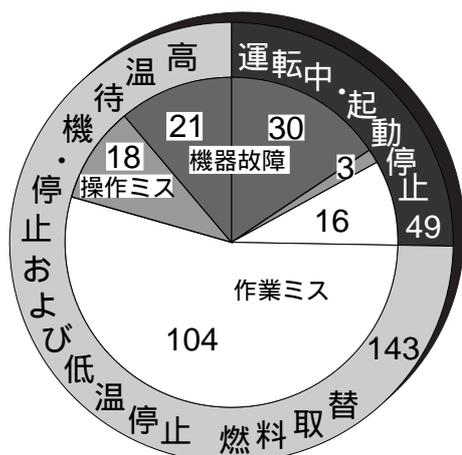


図7 誤発信による事象の発生状況

6. 分析

図4および図7に示す実信号および誤発信による事象の発生要因を以下に分析する。

6.1 実信号

6.1.1 機器故障

実信号の機器故障に分類される事象42件の発生状況を系統別にみると、図8に示すように、2次系機器に係わるものが31件、1次系機器に係わるものが9件であり、大部分が2次系機器に関連して発生した事象である。

これらについて、更に踏み込んで要因分析をした結果、図9に示すように2次系機器の中でも、タービンバイパス弁、主蒸気隔離弁、主蒸気安全弁、主蒸気加減弁等、蒸気系統の弁の動作に係わる不具合が大半であった。

更に、これらの事象の原因となっているのは、弁の本体に係わる不具合よりも、むしろ、弁の制御系の不良によるものが多く、その原因も制御モジュール・コントローラ・制御カード・ストロークスイッチ等の不良、パイロット弁の組立不良等多岐にわたっていることが明らかとなった。

このように、実信号の機器故障に分類されるものは、弁本体あるいは弁の制御系および駆動系の不具合に起因して、プラントが誤動作したことによりECCS作動に至ったものであり、誤動作によるECCS

作動を防止するための改善策検討が必要である。

6.1.2 操作ミス

実信号の操作ミスに分類した事象のうち主なものとしては、タービンバイパス弁の圧力制御器の設定ミス、主蒸気逃し弁の急開操作、主蒸気隔離弁の開操作手順誤り等がみられる。これらは、いずれもプラント過渡応答の結果として主蒸気圧力の低下を招き、ECCS作動に至るという点で重要事象である。

6.1.3 作業ミス

実信号の作業ミスに分類した事象のうち主なものとしては、タービン起動試験時に手順を間違えて、主蒸気加減弁を急開したもの、あるいは高温待機状態で主蒸気隔離弁保守時の手順を間違えて誤開したもの等がみられる。

6.2 誤発信

6.2.1 作業ミス

誤発信事象は、プラント状態に関係なく、計装系チャンネルや安全防护シーケンスロジックの不調等が原因でECCS作動に至る事象であることから、安全防护計装系の冗長構成に着目し、計装用電源系・チャンネル部・トレン部に分けて要因分析を行った。

図10に示すとおり、作業ミスによる事象120件の内、トレン部に係わるものが74件、チャンネル部に係わるものが24件、電源系に係わるものが15件であり、トレン部の不具合による事象が数多く発生している。

大部分を占めるトレン部の事象74件の発生要因をさらに詳しくみると、図11に示すとおり、プラントが停止状態にあり、原子炉圧力あるいは主蒸気圧力が低い状態にあるときに、不必要なECCS作動をブロックするための回路構成が、作業のため不用意に解除されたケース、ブロックに失敗したケースあるいはブロックすることを忘れたケース等、ECCS作動ブロックに係わるものが67件（約91%）と多くみられる。また、これらの要因について、更に詳しくみると、作業時の手順ミス・確認不十分・手順書の不備が共通的な要因としてあげられる。

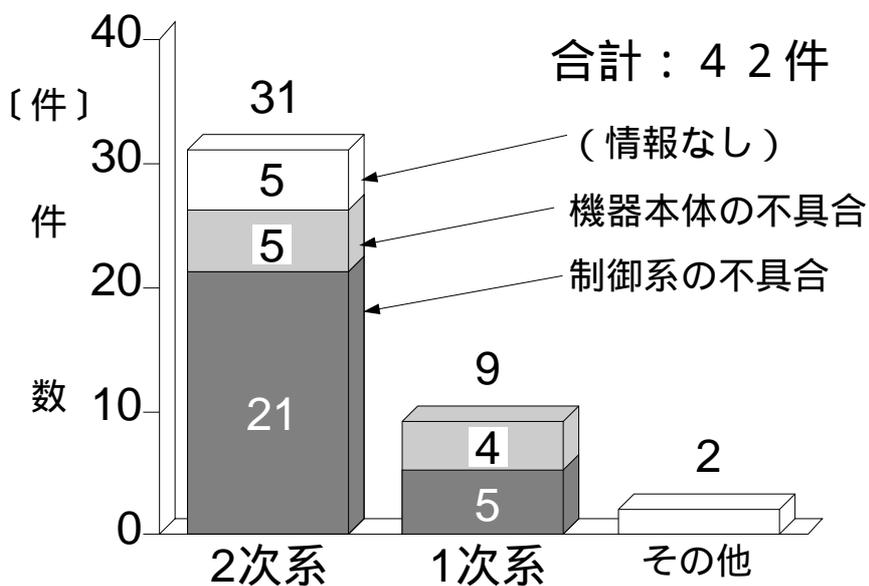


図8 実信号の機器故障要因（系統別）

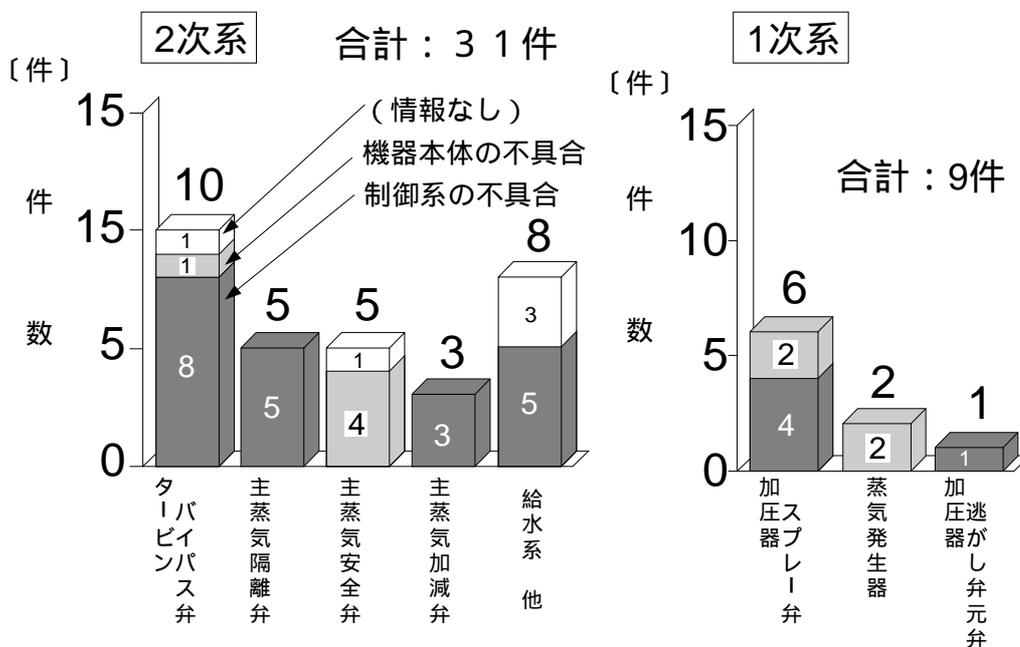


図9 実信号の機器故障要因（機器別）

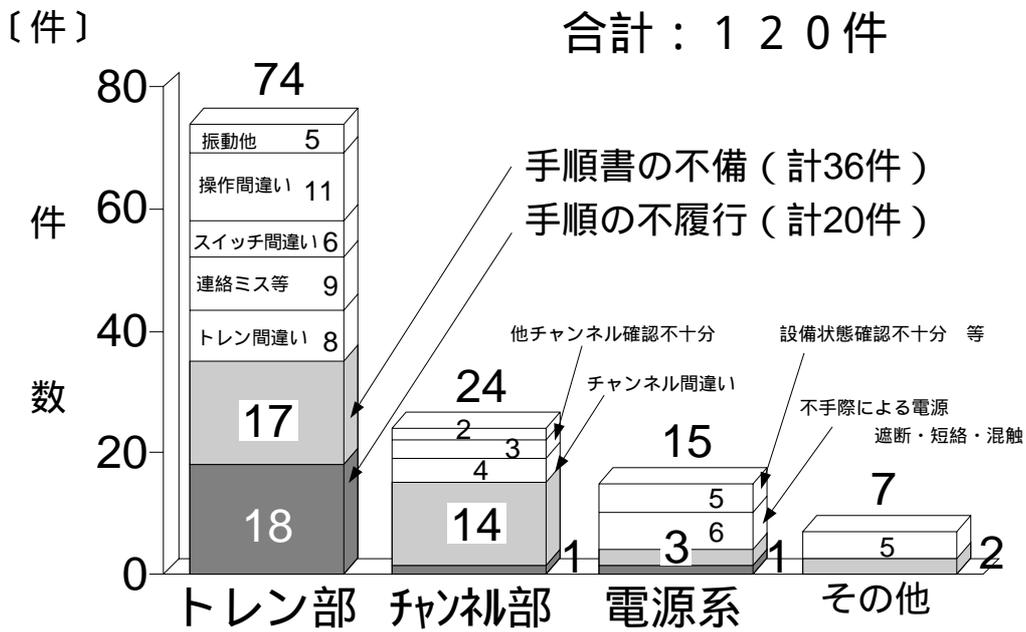


図10 誤発信の作業ミス要因（安全防護計装系）

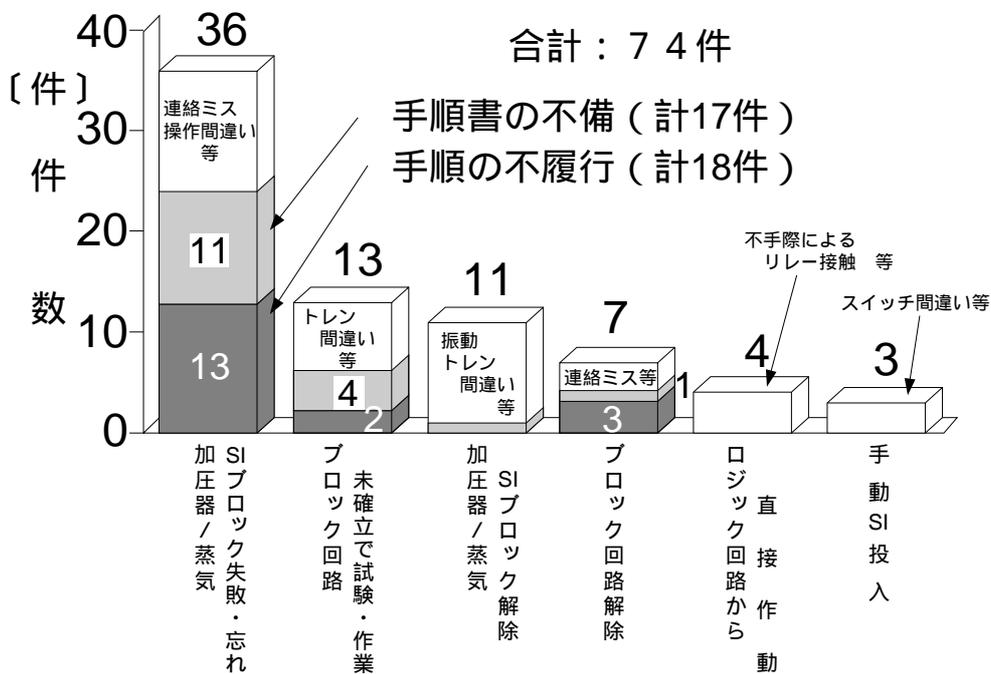


図11 誤発信の作業ミス要因（トレン部）

6.2.2 機器故障

誤発信の機器故障に分類した主なものは、電源系に係わるものとして、インバータ故障が発生頻度の高いものがあげられる。その原因はキャパシターの損傷・ミストの混入・ヒューズ取り付け不良等多岐にわたっている。

チャンネル部に係わるものとして、トランスミッタの故障・電気スパイク・携帯無線機による障害等が主要な原因と考えられる。

トレン部に係わるものとして、リレー・ブロックスイッチ・カード等の故障が主要な原因になっている。

6.2.3 操作ミス

誤発信の操作ミスに分類されるものとしては、トレン部に係わるものが殆どで、原子炉昇圧の早過ぎ、ECCS作動信号ブロックの忘れ等が多く発生している。原子炉昇圧の早過ぎについては、起動時に2次側蒸気圧が低いにもかかわらず、原子炉圧力の昇圧が早過ぎたためにブロックが自動解除された事象であり、発生頻度の高い事象として注意を要する。

7. まとめ

これまでに経験したECCS作動事象の傾向を把握するため、実信号と誤発信に分けて分析した。実信号に分類されるものは全体の約28%、76件で、1次系よりも2次系に起因するものが多く、タービンバイパス弁、主蒸気加減弁、主蒸気安全弁等、弁の動作不良によるものが多くみられた。その原因は、弁そのものの故障よりも弁の駆動制御系の不具合によるものが多く、制御系部品の信頼度向上、不調の事前チェック、予防保全の徹底等の対策と共に、そのような不具合が発生した場合にも、ECCS作動を回避できるシステムの構成を検討することが必要と考えられる。

また、誤発信に分類されるものについてみると、全体の約72%、192件で、保守作業や運転操作に係わる人的ミスが圧倒的に多いことが判明した。特に、安全防護シーケンスロジックのトレン部での作業ミスが多く、例えば、原子炉圧力低あるいは主蒸気圧力低のSIブロックの誤った解除やブロック失敗・

忘れ等がみられる。これら予期せぬ事象を引き起こす原因として、保守作業あるいは運転操作手順書の不備・不履行が多くみられた。この点については、我が国と米国における運用管理体制の違いから、それ程心配する必要はないという意見もあるが、問題の重要性に鑑みて、国内の実態を確認しておくことも今後の課題の一つと思われる。また、誤発信の中で、作業ミスほど件数は多くないものの電源系のインバータに係わる不具合で、電源喪失によりECCS作動に至っているものがあり、国内プラントでの電源構成上の信頼度を再チェックすることも肝要と思われる。

以上の分析評価が、原子力発電所の信頼性向上という観点から、ECCSの作動が要求されるようなプラント状態になることを防止するために、いくばくかの寄与ができれば幸いである。

参考文献

- (1) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針，1990.8.30，原子力安全委員会決定
- (2) 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針，1990.8.30，原子力安全委員会決定
- (3) 軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針，1992.6.11，原子力安全委員会改訂
- (4) 実務テキストシリーズNo.1 軽水炉発電所のあらまし，財団法人 原子力安全研究協会，1992.10
- (5) 電気事業法第106条，電気関係報告規則第3条，原子炉等規制法第67条，実用発電用原子炉の設置・運転等に関する規則第24条第2項
- (6) Code of Federal Regulation (CFR) Title 10 Part 50.73(a)(2)(iv)