

原子力発電所における電気計装設備不具合事象の分析

Study of Electrical Instrumentation and Control Equipment Malfunction Events in Nuclear Power Plants

柳 千裕 (Chihiro Yanagi)* 藤井 登 (Noboru Fujii)*
嶋田 善夫 (Yoshio Shimada)* 木田 正則 (Masanori Kida)†
橋場 隆 (Takashi Hashiba)‡

要約 電気計装設備は、原子力発電所の安全で効率的な運転に重要な役割を担っているため、本研究では電気計装設備に係る不具合事象の分析を実施した。

本調査報告では、これまでに経験した国内および米国のPWR型原子力発電所の事故・故障情報データベースの中から電気計装設備不具合事象を分析するとともに、米国規制関連文献を調査することにより、再発防止対策を策定した。

まず、米国の事象についてはLicensee Event Reports(LER)を分析するために、また、国内の事象については通商産業省への事故報告を分析するために、それぞれ電気計装設備不具合事象データベースを構築した。

次に、このデータベースを利用して事象の分析を行った。その結果、不具合の多くが「試験」で検出されていることから、「国内における試験のあり方を作業平準化や定検短縮の観点から見直す」という今後の新たな調査課題がクローズアップされた。

このような電気計装設備不具合事象の調査分析から、7項目の再発防止対策を策定した。

キーワード 原子力、電気計装、不具合、データベース、再発防止

Abstract Electrical instrumentation and control equipment plays an important role in safety and efficient operation of nuclear power plants.

In this report, malfunction events on electrical instrumentation and control equipment of nuclear power plant were analyzed using the database in Japan and the United States, examined relevant documents, and studied measures for preventing recurrence of similar events.

First, to help this analysis, the database of malfunction events on electrical instrumentation and control equipment has been structured from Licensee Event Reports (LER) in the United States and accident reports to the Ministry of International Trade & Industry of Japan.

Second, by utilizing the database, the causes of each event were analyzed and evaluated. Consequently, as it is clarified that testing detected malfunction in many events testing should be focused and evaluated in further research from the point to level off the work load and shorten the refueling outage period.

Based on this analysis, seven measures have been studied to improve facilities for the prevention of recurrence of accidents.

Keywords nuclear power, electrical instrumentation and control, malfunction, database, prevention of recurrence

1. はじめに

国内外の原子力発電所の事故・故障情報を分析することから教訓を学び、同種の事故・故障を防止す

ることは、原子力発電の信頼性向上を図るために有益である。当研究所では、「重要事象に係わる信頼性向上の研究」として「非常用炉心冷却系（ECCS）作動事象の分析」⁽¹⁾「原子力発電所における弁不具

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
現 関西電力(株)原子力・火力本部 原子力計画課

‡ (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
現 関西電力(株)高砂発電所

合事象の分析²⁾等を実施してきた。

今回は、プラントの安全で効率的な運転に重要な役割を担っている電気計装設備の不具合事象に注目し、過去に発生した国内および米国の電気計装設備不具合事象の調査分析と、米国規制関連文献の調査を行い、再発防止対策を策定したので、その概要を述べる。

2. 不具合事象の調査分析

2.1 情報源

米国の事象は、法律に基づき原子力規制委員会（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 Report³⁾）を情報源とした。この情報は、入手が容易であることと公開情報であること、さらに日本の原子力発電所と類似のプラントが多いことから選択した。一方、国内事象は、法律や大臣通達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⁴⁾を情報源とした。国内事象は、米国の情報と比較検討のために選択した。

2.2 調査対象期間と調査対象プラント

LERは年間2000件近く報告され、その数が膨大であることから、1991年から1995年の5年間に報告された事象を調査の対象とし、一方、国内は報告件数が少ないことから1970年から1996年の事故報告全てを、調査の対象とした。

対象プラントは、ウェ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）とした。

2.3 データベースの構築

LERについては、その概要版を利用して電気計装設備に関係のある事象を抽出し、その抽出されたものについて全文を入手した。

LERは、事象内容の記述については自由記述であるため、分析に適した形に整理し直す必要がある。

そのため抽出した個々の事象について、事象の状況・原因・対策等に整理するための様式を定め、電気計装設備不具合事象データベースを構築した。

但し、LERの改訂により重複するもの、情報が不足しているものなどは除き、770件のデータベースを作成した。データベースでは、事象の類似性を明確にし、発生事象の傾向把握・分析を容易に行うことができるように分類した。国内についてもLERと同様に、67件全てについて整理収録した。

2.4 不具合事象分析結果

2.4.1 不具合原因分類

図1に米国の不具合原因を設備面と保守・運転面から分類したものを示すが、設備劣化が原因として最も多く227件を占めている。

2.4.2 電気計装設備経年劣化傾向

米国の不具合事象のうち、不具合原因が設備劣化に該当する227件について、プラント運転年別不具合報告件数をその年に運転したプラント数で除した値を図2に示す。古いプラントほど不具合が多ければこの図では右下がりの傾向となるが、そのような傾向は見られないことから、電気計装設備では経年劣化の傾向は見られないことが分かる。国内では、設備劣化に該当するものが7件と少ないため、傾向把握はできなかった。

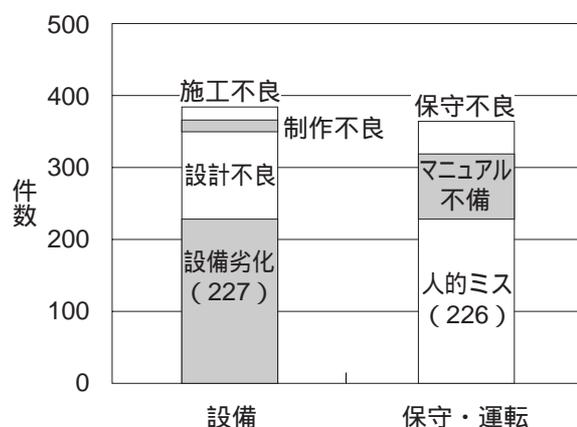


図1 不具合原因分類（米国）

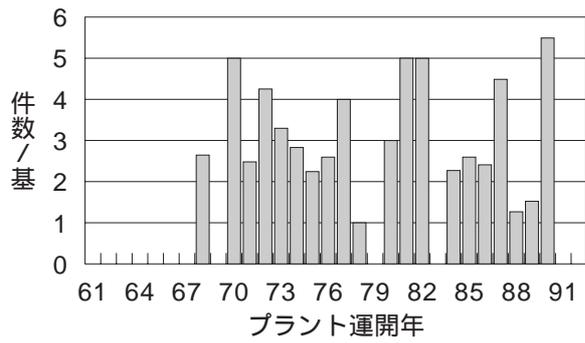


図2 運開年別不具合報告件数/運開プラント数

2.4.3 不具合発生時の機器運転分類

図3と図4に、それぞれ米国と国内の不具合発生時の機器運転状況を示す。

これらの図から、米国では「試験中」の不具合が約4分の1を、一方、国内では約5分の1を占めている。不具合の多くが「試験」で検出されていることから、「国内における試験のあり方作業平準化や定検短縮の観点から見直す」という今後の新たな調査課題がクローズアップされた。

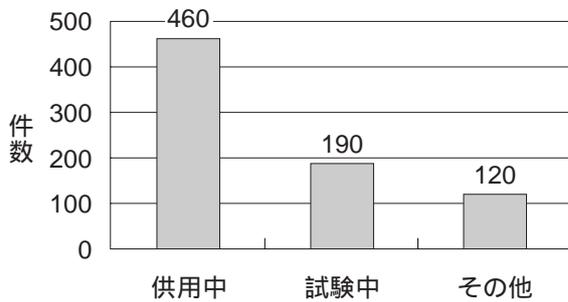


図3 不具合発生時の機器運転状況（米国）

2.4.4 不具合原因機器分類

図5に、米国の不具合原因機器の分類を示す。

設置台数の割には、遮断器に不具合が多い。その理由は、遮断器が他の動的機器と異なり複雑な機械的動作機構を有しているため不具合が発生しやすいと考えられる。

また、変圧器は静的機器であり、かつ、設置台数

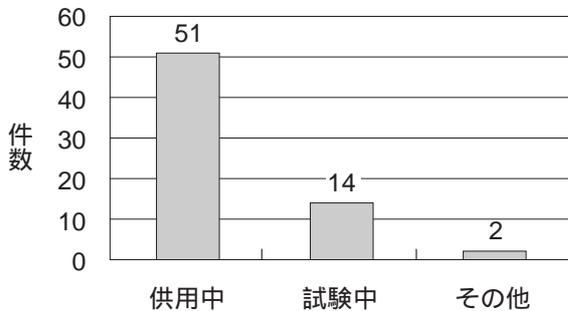


図4 不具合発生時の機器運転状況（国内）

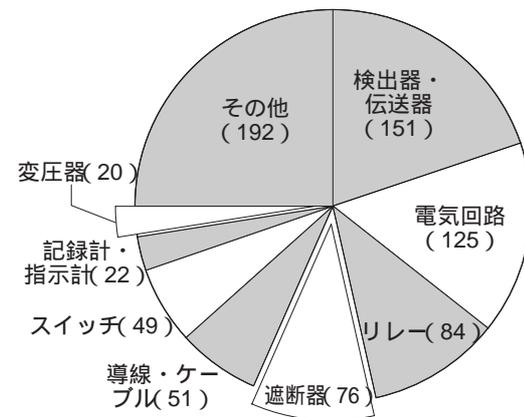


図5 不具合原因機器分類（米国）

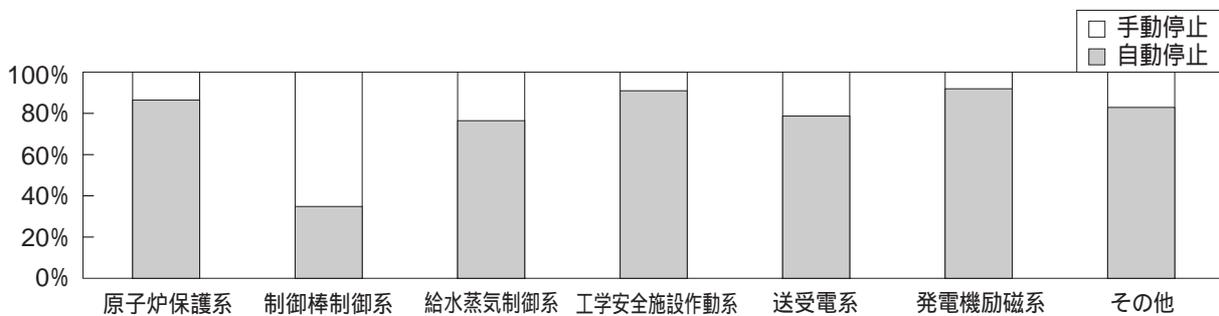


図6 手動・自動停止別系統分類（米国）

も検出器などに比べて少ないわりには、不具合件数が多いことに注目して内容を調査したが、変圧器が直接の原因となったものは4件と少なく、それ以外は人的ミスや落雷などによる変圧器の付属機器の故障である。

2.4.5 手動・自動停止別系統分類

図6に米国の手動停止および自動停止に至った不具合系統に分類したものを示す。この図から米国では他の系統に比べ、制御棒制御系での手動停止が約60%と多い。

その内容を調査したところ、制御棒が数本落下し、Technical Specification⁽⁵⁾により手動停止せざるを得なかったという事象である。一方、国内においてはこのような事象で手動停止に至った事象はない。このことは国内の運用・保守面で信頼性が高いと評価できる。

3. 再発防止対策の検討

3.1 検討の手順

米国の不具合事象770件のうち、出力に影響を及ぼした事象254件はプラントの効率的な運転を目指すための重要な事象と考えられ、また、二度と同様の不具合を起こさないという観点からも全て調査した。その中から、詳細検討が必要と思われるもの47件を選び、それぞれについての対策の要否を検討した。

次に、(財)電力中央研究所が作成しているトラブルマップを参考にして、それら47件が属する系統の「不具合状況図」を作成した。この「不具合状況図」は、どの系統に何が原因でどのような不具合が生じているかを視覚的に訴えるため作成したものである。一例を図7に示す。

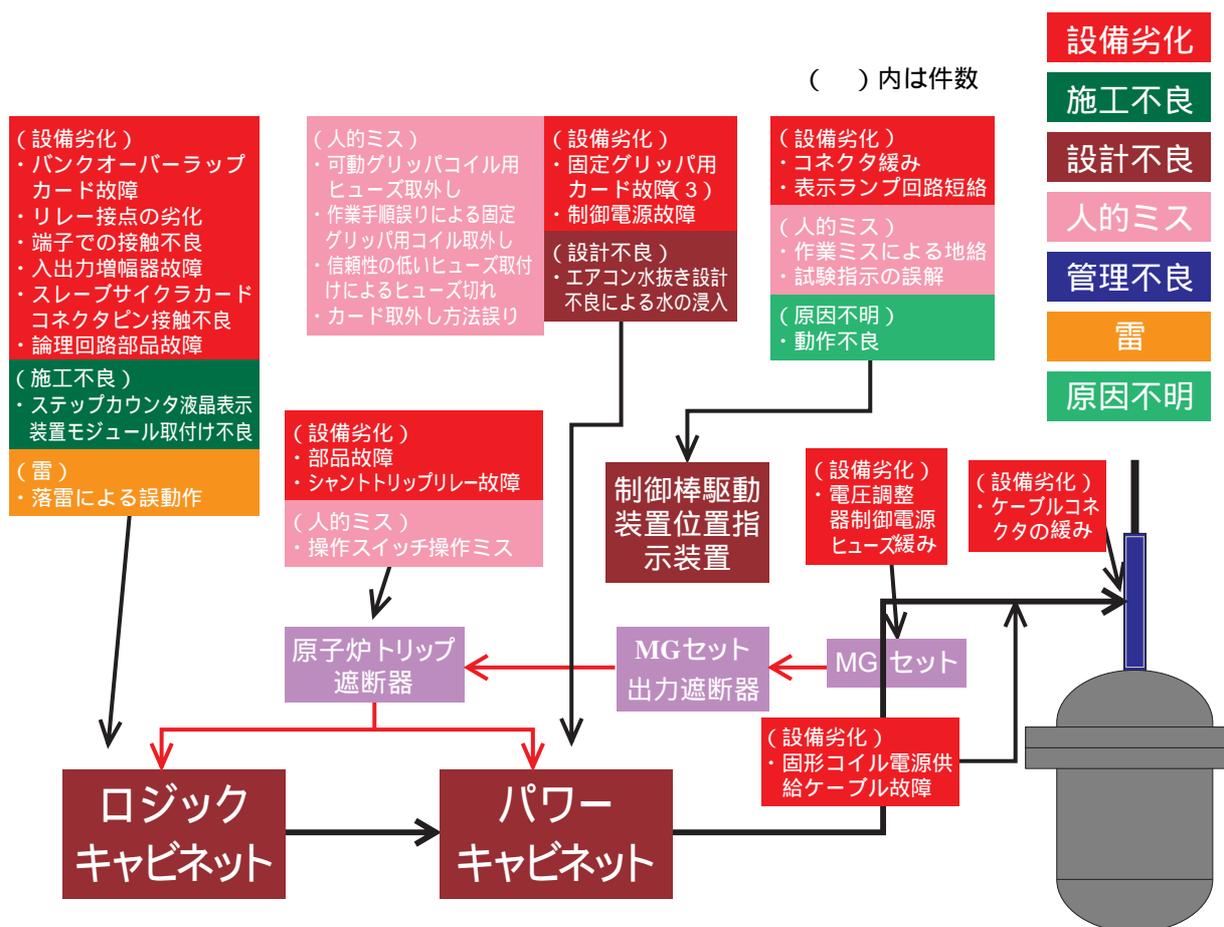


図7 不具合状況図 (制御棒制御系)

上記の抽出された米国の不具合事象47件全てについて、課題と対策案の検討およびプラントへ反映の要否を記載した。

米国規制関連文献の調査では、NRCが安全上重要な問題について発行するIN(Information Notice)⁽⁶⁾、BL(Bulletin)⁽⁷⁾及びGL(Generic Letter)⁽⁸⁾を情報源とした。そのなかで1991年から1996年の6年間に発行され、PWRプラントに関係するもの92件を対象とした。

3.2 再発防止対策

3.2.1 CRDMケーブルコネクタの点検

1994年米国で、制御棒駆動装置(CRDM)用ケーブルコネクタの緩みから接触不良が起き、CRDM作動不能で原子炉手動停止という事象について検討した。過去国内プラントでCRDMのコネクタの緩みなどにより原子炉停止したことはないが、コネクタシール部にはシリコンゴムを使用しており、使用環境が高温下にあることから、このシリコンゴムの経年劣化による硬化が原因の接触不良が懸念される。

従って、点検を実施してコネクタシール部の劣化

状況を把握し、万一劣化兆候が見られた場合は、コネクタシール部の取替などの保守方法を確立することが望ましい。また、CRDMコネクタと同様の環境下にあるコネクタについても同様の対策が必要と考えられる。

3.2.2 海水ポンプ軸受冷却水流量低自動停止インターロック削除

1995年に米国で、落雷により制御棒が落下し原子炉停止した事象について検討した結果、海水ポンプ軸受冷却水流量計は屋外に設置されており、その信号処理を行う計器ラックは屋内設置であることから、落雷による誘導サージの影響を受ける可能性がある。一方、最新のプラントでは、海水ポンプ軸受冷却水流量低自動停止インターロックの誘導サージによる誤作動を考慮し、このインターロックを設計段階で削除している。従って、他のプラントでも、海水ポンプ軸受冷却水流量低自動停止のインターロック削除を推奨する。

3.2.3 号機間電源融通の改造案の策定

米国では、全交流電源喪失事象の経験に基づいて、プラントにおける非常用電源の強化が求められてお

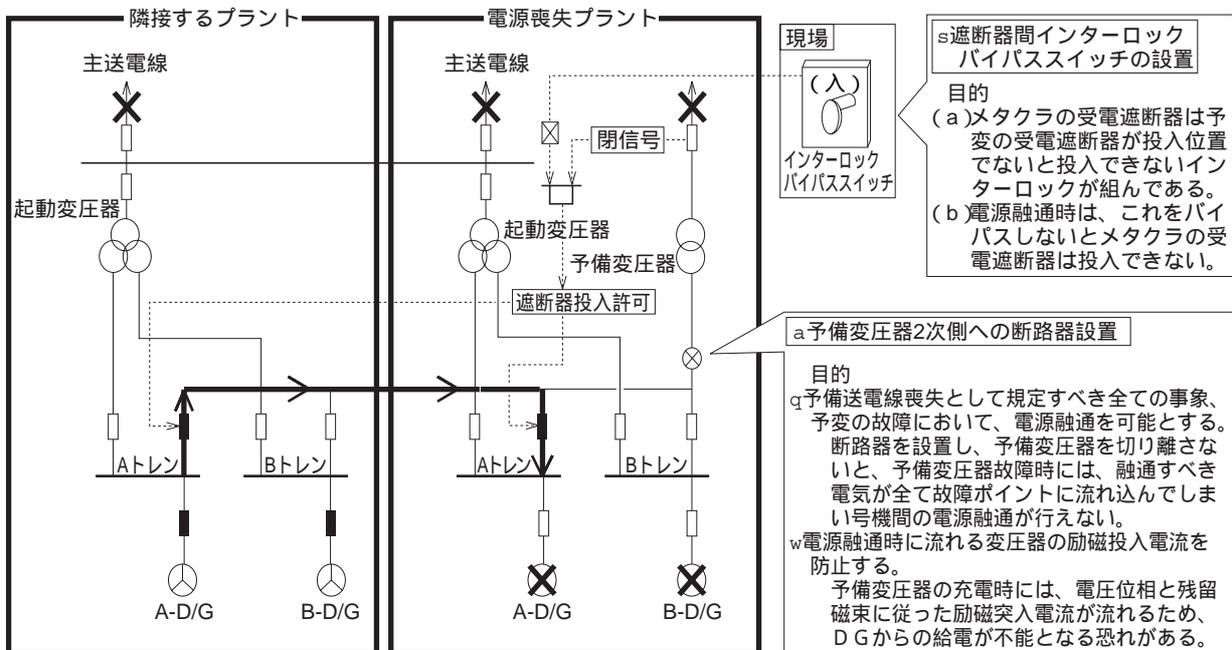


図8 号機間電源融通の改造

り、近年、4トレン構成の採用や代替交流電源設置等の設計強化を実施しつつある。この問題に対する対応策の1つとして、アクシデントマネジメント策で検討されている号機間電源融通が考えられる。しかしながら、全交流電源喪失事象および停止時に考えられる事象に対応するには、予備変圧器2次側の断路器の設置と、遮断器インターロックバイパススイッチの設置が有効である(図8)。

3.2.4 RCP UV/UF 検出回路用電源の分離

米国では、一次冷却材ポンプ(RCP)電源のUV/UF(低電圧/低周波数)検出回路が非安全系であり、出力接点信号を分離しないでソリッドステート原子炉保護系(SSPS)に入力している。そのため、地震時に複数のUV/UF検出回路側で地絡が発生すると、安全系であるSSPSの電源が2トレンとも機能喪失する可能性があるという指摘が1991年にINによってなされたが、国内プラントでは、UV/UF検出回路と内部電源回路は分離しており問題はない。

しかしながら、安全系直流電源2系統より給電しているプラントでは、信頼性向上の観点から、UV/UF検出回路用電源をそれぞれ異なる電源から供給することを推奨する。

3.2.5 過大温度 Tトリップ回路のスケーリング変更

米国では、過大温度 Tトリップ回路の設定値演算回路において、 T_{avg} 信号に関する計器のスケーリング(ゲイン設定)が不適切であり、場合によってはトリップ設定値がトリップに必要な値まで下がる前に飽和するという非安全側の動作に関する通知が1991年にINによってなされた。補足として1992年に「安全解析の想定事象については問題ないが、計器の再設定によって、非安全側の動作は回避できるとの結論を得ている。」というWH社の検討結果が通知された。

本事象は直ちにプラントの安全性に影響するものではないが、安全保護系の計測制御回路が、設計で考慮していない非安全側の動作があることは好ましくないため計器の再設定を実施することを推奨する。

3.2.6 直流電源系の監視

直流電源系の機能喪失はプラントの運転に重大な影響を与えることから、その徴候を事前に的確に把握し事故を未然に防止する必要がある。

米国では、安全系直流電源の設計妥当性に関し、NRCは評価検討を一旦完了したが、1991年のGLでは更にその問題に関する追加対策等の要否を明らかにするため、発電所に質問を投げかけ回答を求めた。

その結果に基づいて、直流電源の監視性および保守・管理について、国内プラントの実態調査を実施した結果、信頼性向上の観点から以下の2点を推奨する。

(a) 中央制御室からの母線状態の監視

通常運転中に均等充電等の蓄電池の保守を実施しており、「充電器出口端の電圧監視」および「母線電圧の監視」が重要となるが、外部電源喪失を想定した場合に、母線電圧が定格に維持されていることを確認しておく必要がある。従って、中央制御室における「充電器出口端の電圧監視」および「母線電圧の監視」ができないプラントについては監視計器設置等の対策を推奨する。

(b) 均等充電時のドロップ盤使用状態の監視

均等充電時の外部電源喪失を想定した場合、母線電圧の低下を招くため、ドロップ盤が電圧を定格に維持する制御機能の追加、または、ドロップ盤使用状態の中央制御室での表示が必要と考えられる。

3.2.7 遮断器の全分解点検の実施による経年劣化の把握

米国では、General Electric社製磁気遮断器が機構部のグリス硬化が原因で動作しなかった事象に関する通知が1996年にINによってなされた。

遮断器を設置してから長期間経過するプラントもあり、グリス硬化が懸念されるものの、現状の遮断器の保守は、定期的な分解点検で、主に各部の状態確認と、機構部は分解せずに注油のみを行っている。長年、注油を一切行わず運用した場合には、経年劣

化によりグリス固化し動作不能が懸念されるが、定期点検で注油を行っている場合の経年劣化状況が把握されておらず、また、各部品の摩耗状況等についても把握されていない状況にある。

従って、経年変化状況を確認するため、代表遮断器で、駆動部を含めた全分解点検を実施し、経年劣化状況調査を行い、その結果に基づいて、最適な保守計画の策定を推奨する。

4. まとめ

電気計装設備はプラントの安全で効率的な運転に重要な役割を担っている。この電気計装設備の信頼性向上を図るため、国内および米国の電気計装設備不具合事象データベースを構築し、傾向把握などの分析を行った。その結果、不具合の多くが「試験」で検出されていることから、「国内における試験のあり方を作業平準化や定検短縮の観点から見直す」という今後の新たな調査課題がクローズアップされた。

電気計装設備の不具合が原子力プラント出力に与える影響を勘案して評価を実施し、国内プラントへの反映の要否について検討し、再発防止対策7件を策定した。

文献

- (1) 麻坂顯一 加藤啓之 木田正則 原信一 熊田雅充, 非常用炉心冷却系 (ECCS) 作動事象の分析, INSS Journal No.2, 1995
- (2) 木田正則 橋場隆, 原子力発電所における弁不具合事象の分析, INSS Journal No.3, 1996
- (3) Code of Federal Regulation (CFR) Title 10 Part 50.73(a)(2)(iv)
- (4) 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
- (5) Code of Federal Regulation (CFR) Title 10 Part 50.36
- (6) NRC 原子炉規制局が適宜発行する通知
- (7) NRC が 1954 年原子力法第 182 条 a 項に基づき発行する通達
- (8) NRC 原子炉規制局が Code of Federal Regulation (CFR) Title 10 Part 50.54(f) に基づき発行する文書