

PWR原子力発電所の想定火災時における安全停止電気回路損傷 解析の調査および弁誤動作時の保有水喪失事象の防止対策

Review and Analysis for Events of Damage of Electric Circuits for Safe Shutdown in Postulated
Fires at PWR Power Plants and Countermeasures for Preventing Loss of Inventory Water Caused
by Malfunction of Valves

島田 宏樹 (Hiroki Shimada)*

要約 米国の原子力規制委員会 (NRC) では、原子力発電所の火災防護の観点から、想定火災に関する事象の報告を集めている。本研究では、まず第一にこれまでに報告された米国の原子力発電所の想定火災に関する事象報告書から、その内容を詳細に調査し、それらの火災発生箇所、不具合部位および原因等を分析した。その結果、想定火災は、中央制御室、ケーブル処理室等のケーブル密集区域での事例が多く、ケーブル火災による地絡と短絡による不具合事象が主に発生していることが判明した。次に、こうした電気回路の火災時損傷解析の項目および内容について、米国と国内のPWRについて比較検討した結果、国内のPWRでは米国で考慮している「火災による弁誤動作時の保有水喪失」事象について考慮していないことが判明したので、この事象についての防止対策を提示した。

キーワード 原子力発電所, 想定火災, ケーブル火災, 弁誤動作, 保有水喪失

Abstract The United States Nuclear Regulatory Commission (NRC) has been collecting reports on events concerning postulated fires from the viewpoint of fire protection for nuclear power plants. First of all, We reviewed these reports on the US nuclear power plants and analyzed (1) location of a fire, (2) part where the fire occurred and (3) the cause of the fire. The results revealed that the postulated fires had often occurred in areas dense with cables, such as central control rooms and cable connecting rooms, and the events caused by ground faults and short circuits resulting from cable fires had been predominant. Then, a comparison was made between PWRs in the United States and those in Japan in terms of the items and details of analysis on fire-caused damage of the electric circuits as described above. The comparison revealed that “the event of loss of inventory water resulting from malfunction of valves caused by a fire” was given consideration at the PWRs in the United States but not for those in Japan. Accordingly, countermeasures against this event were proposed.

Keywords nuclear power plant, postulated fires, cable fires, malfunction of valves, loss of inventory water

1. はじめに

国内外の軽水型原子力発電所 (軽水炉) の事故・故障状況から教訓を学び、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。われわれは、これまで「重要事象に関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⁾⁽²⁾、「原子力発電所における水撃事象の分析」⁽³⁾、「軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析」⁽⁴⁾、「原子力発電所における伸縮継手不具合事象の分析」⁽⁵⁾等を実施してきたが、これま

での調査、分析とは異なり、本稿では、従来注目されることの少なかった火災防護要件違反に着目し、米国原子力規制委員会 (以下NRCという) が収集している想定火災に関する事象を対象に設計・施工不良等による不具合事例の調査を実施し、火災発生箇所、部位および原因等を分析した。さらに、主たる異常事象要因となった安全停止設備の電気回路損傷解析項目および内容の調査を行った。さらに、日本の火災防護設計との違いを抽出し、「火災による弁誤動作時の保有水喪失」事象に特に注目し、その影響を1970年代に運転開始した1 PWRプラントについて

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

評価した。そして、それをもとに対策を検討した。

2. 不具合事象の調査対象情報および調査項目

2.1 調査対象情報

米国の原子力発電所における火災防護規則違反、具体的には全てのプラントの規制に利用されている「1979.1.1以前に運転開始した原子力発電施設に対する火災防護計画」(10CFR50-Appendix R)⁽⁶⁾(以下「付則R」という)によってNRCへ報告される原子力発電所設置者事象報告(Licensee Event Report: LER)(以下LERという)を調査の対象とした。付則Rの規制内容は「安全停止状態の達成と維持に必要な設備の火災による損傷を制限する」ことを目的として、設計、管理、運用等について定められ、不具合事象内容は想定火災(火災は発生していない)時に設計要件を満たさない事が主要因となっており、必ずしも火災が実際に発生したことを意味するものではない。

2.2 調査項目

1995年から1999年までのLERに関し、以下の項目を調査した。

- (1) 不具合発生プラント名および不具合発生年月日
- (2) 違反した規制要件および設備名
- (3) 想定火災発生区域
- (4) 原因および対策

3. 調査結果

3.1 概要

3.1.1 事象発生状況および規制要件別件数

火災防護関連LER報告件数の推移を図1に示す。1995年から1999年までに火災防護の不具合事象に係る合計190件の事象が継続的に報告されている。NRCが求めた火災防護機能検査が実施された1997年に不具合事象の報告が多くなっている。

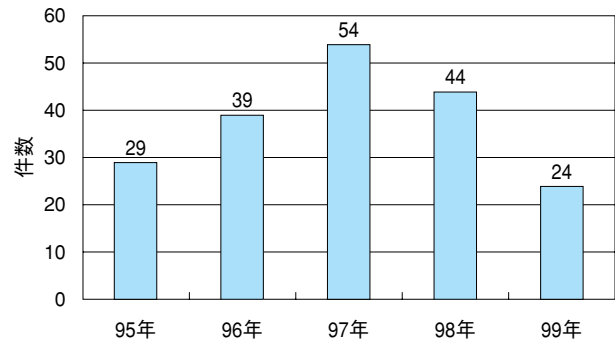


図1 米国の原子力発電所の火災防護関連LER報告件数

付則R火災防護規則違反内容別件数を図2に示す。「安全停止設備1トレン確保不可」という、安全停止能力の火災防護違反が190件中122件を占め全体の64%に達する。

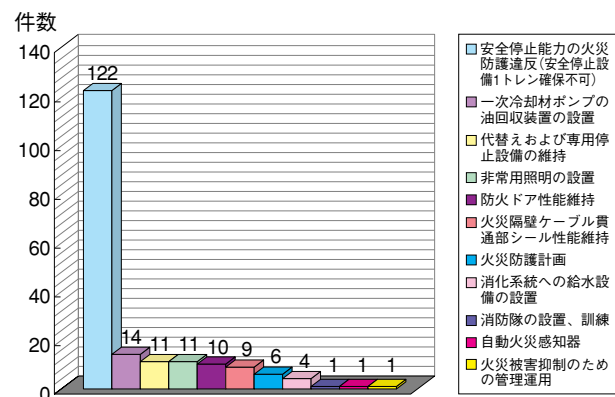


図2 付則R違反の分類

3.1.2 安全停止能力の違反事象及び原因

安全停止能力の火災防護違反事象の内訳を図3に示す。また、ケーブル火災事象の原因別内訳を図4に示す。安全停止能力の火災防護違反事象のうち、75件(61%)をケーブル火災が占める。また、このケーブル火災事象75件のうち、違反に至るプロセスの原因はケーブルの接地、短絡が42件(56%)を占めることが分かる。安全停止設備のケーブル火災(全体の約40%)による接地、短絡等の電気回路損傷影響が主たる違反原因となっており、安全停止電気回路の火災時損傷解析項目および内容の調査が火災防護設計比較を行う上で、重要なファクターであることが確認できた。

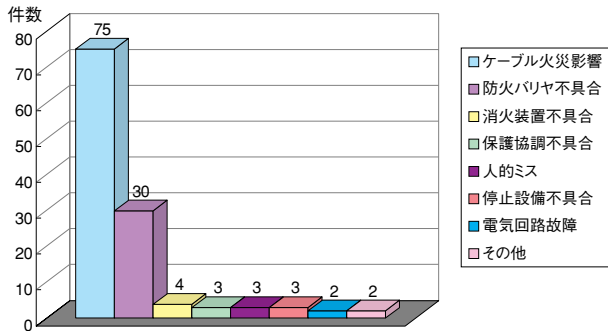


図3 安全停止能力の火災防護違反事象の内訳

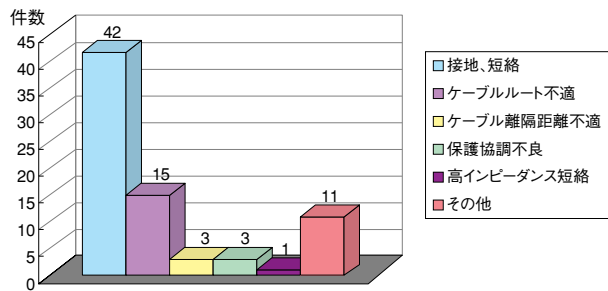


図4 ケーブル火災事象の原因別の内訳

3.1.3 ケーブル想定火災区域

LER報告全体のうち、ケーブル想定火災の区域別件数を図5に示す。想定火災区域はケーブル密集区域である中央制御室、ケーブル処理室、開閉器室で全体の62%を占める。

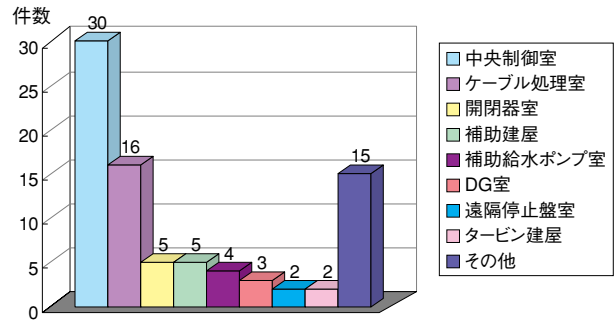


図5 ケーブル想定火災の区域別による分類

3.2 原子力発電所安全停止電気回路の火災時損傷解析項目および内容の調査

3.2.1 米国と日本の火災時における安全停止電気回路の解析項目および内容の比較

表1に、米国と日本の原子力発電所安全停止回路解析項目および内容の比較を示す。調査資料は米国のものが「NFPA805 実績ベースの軽水炉発電用火災防護基準」⁽⁷⁾であり、日本は「JEAG4607 火災防護指針」⁽⁸⁾に基づいて比較し、差異のある解析項目および内容を抽出した。

表1 米国と日本の原子力発電所火災時における安全停止回路解析項目および内容の比較（差異のあるところ）
（○：解析する ×：解析しない）

		米 国	日 本
火災により想定する一般回路の損傷形態例	動力回路にて3相が各々混触し、電動機が誤動作	○	×
火災により想定する特定回路の損傷形態例	変流器回路の火災による損傷(断線)で変流器の2次発火	○	×
	電源盤しゃ断器の保護協調不適切による共通電源喪失	○	×
	トレイ内ケーブル火災による他トレイでの2次発火	○	×
	中央制御盤回路の地絡等によりヒューズが作動して、EP盤切替後も電源断による制御回路機能不能	○	×
解析・評価内容	火災解析での確認項目	火災時に、少なくとも下記の1系列のサクセパスを確保し、低温停止機能を確保できること・反応度制御・インベントリ及び圧力制御・余熱除去機能・補助系統機能・プロセス計装機能	安全評価指針の過渡変化及び事故が火災により発生する恐れがある場合、単一故障を想定しても必要な対処機能が確保でき高温停止達成可能である。また、火災時は低温停止機能を確保できる。
	低温停止設備の分離性評価	安全停止設備1系列は火災影響を受けないよう、分離対策状態を確認。安全停止回路解析にて損傷が安全停止設備機能に悪影響を与えなければ対応策不要	安全停止設備1系列は火災影響を受けないよう分離対策が施されていることを決定論的評価、あるいは性能評価で確認。
	単一故障を想定した上での高温停止設備の分離性評価	実施せず	単一故障を仮定しても高温停止機能が確保できることを確認する。
	弁誤動作による弁体損傷の評価	過負荷保護がない状態で、制御回路の短絡が発生すると、弁動作信号が継続し弁自体が破損する	評価せず
	弁誤動作によるバウンダリ開放で安全停止に必要な保有水喪失又は、安全停止に必要な設備の溢水	高圧/低圧系境界隔離弁が誤開した場合LOCAが引き起こされる可能性等について問題提起	高圧/低圧系境界隔離弁の安全停止についての評価のみ実施

この表から、火災による損傷形態例として5項目が異なっていることが分かる。また、解析評価内容では、表に示すように(1)「火災解析での確認項目」、(2)「低温停止設備の分離性評価」、(3)「単一故障を想定した高温停止設備の分離性評価」、(4)「弁誤動作による弁体損傷の評価」、および(5)「安全停止に必要な保有水喪失、又は溢水評価」の5項目において解析項目および内容が異なっている。

3.2.2 影響評価項目の選択

米国と日本の解析内容が異なる項目について、1970年代に運転開始した1PWRプラントで影響評価を行うための準備として、実施の要否を検討した。その結果を表2に示す。

表2 実機プラントでの影響評価項目の検討表

米国解析内容との差異項目	影響評価実施の要否	理由
動力回路にて3相が各々混触し、電動機が誤動作	×	火災防護指針では、動力回路の混触は範囲外になっている。また、発生の可能性は他に比べて非常に低い。
変流器回路の火災による損傷(断線)で変流器の2次的発火	×	比較的新しいPWRプラントでは火災を考慮した異トレン間の分離が実施されており問題ない。
電源盤しゃ断器の保護協調不適切による共通電源喪失	×	国内PWRでは遮断器等の保護協調設計を適切に行っており、米国で指摘されているような事例は発生する恐れはない。
トレイ内ケーブル火災による他トレイでの2次発火	×	関連回路の多重の安全系トレン間の渡り配線はおこなわれておらず、解析・評価手法として取り入れる必要はない。
中央制御盤回路と遠隔停止盤の切り替え機能の火災影響	×	米国では中央制御室全損を想定しているが、日本では局所火災を想定して異トレン間は火災悪影響はないとしている。
制御回路火災による弁誤動作時の弁体損傷評価	×	火災発生を考慮しても、トレン分離されているため片系列は健全であり問題ない。
バウンダリ弁誤動作による漏洩影響評価	○	国内PWRプラントでの評価未実施項目
火災解析、分離性評価	×	手法としては概ね同じであり、日本の方が保守的(米国手法を包括している)

×印の項目は、現状の設計で問題ないもの及び火災防護指針上、考慮しなくてもよいと考える。○印の項目は、国内PWRプラントにおいて評価未実施項目である。米国での事例が報告されている「火災時のバウンダリ弁誤動作による保有水の喪失事象」について調査することにした。

3.3 火災時の弁誤動作による保有水の喪失事象の検討

3.3.1 火災による保有水喪失の可能性のある弁の抽出

1970年代に運転開始した1PWRプラントの各対象系統の弁として以下の3項目に属するものがある。(1)安全停止に使用する保有水喪失につながる恐れのある弁、(2)LOCAにつながる恐れのある弁、(3)事故時に使用する保有水の喪失につながる恐れのある弁。そこでこれらの弁についてケーブルトレイ内火災、補機火災、盤内火災に際し、保有水喪失が発生する可能性を検討した結果、4つの事象を抽出した。それらを表3に示す。これらについて対策を検討したところ、同じ対策項目になることから、代表として(2)LOCAにつながる恐れのある弁について対策を示す。

表3 火災により保有水喪失の可能性のある弁

抽出の観点	事象の説明
1 安全停止に使用する保有水喪失につながる恐れのある弁	電動弁の直列2弁構成であるが同トレンのため、2弁とも誤開した場合、燃料取替用水が再循環サンプへ流出する
2 LOCAにつながる恐れのある弁	電動弁の直列2弁構成であるが同トレンのため、2弁とも誤開した場合、RCS保有水が低圧系に流出する(誤開防止のための運用を前提として設計)
3 事故時に使用する保有水の喪失につながる恐れのある弁	<p>手動制御弁と空気作動弁のいずれか、あるいは全てが誤開した場合、アキュムレータ圧力が低下する</p> <p>単一電動弁が誤開した場合、燃料取替用水が再循環サンプへ流出する</p>

3.3.2 LOCAにつながる恐れのある弁に対する対策

LOCAにつながる恐れのある弁の系統を図6に示す。

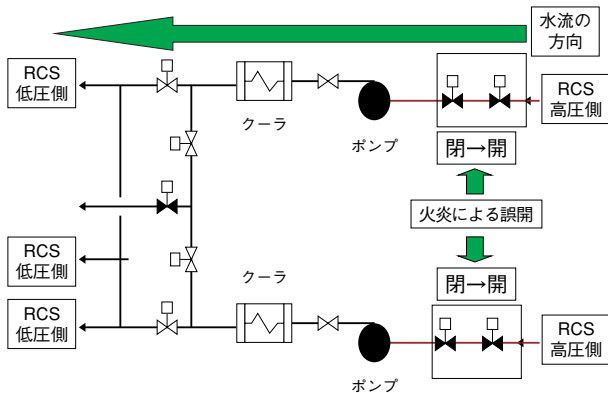


図6 LOCAにつながる恐れのある弁の系統

図6の例では、同トレン電動弁の直列2弁構成であるため、2弁とも誤開した場合、RCS保有水が低圧系に流出する。図6の例を含めた同トレン電動弁

の直列2弁構成の場合の対策を以下に示す。

- (1) 直列の2弁のうち、1弁について運用を弁全閉位置でノーヒューズブレーカ(以下NFBという)開とし、閉ロックとする。この対策は、ケーブルトレイ内火災、補機火災、盤内火災全てに有効である。ただこの欠点として、弁の状態表示が通常時に分からなくなり、弁開操作時には閉ロック解除の操作が必要となることがある。
- (2) 直列の2弁のケーブル・配線を分離する。何れか1弁のケーブルを別ルートとし、ケーブルトレイ内火災及び補機火災に対し2弁のケーブルが同時損傷しないようにする。また、盤内での配線分離を行い、盤内火災時に2弁が同時誤開しないようにする。なお、ケーブルトレイ内火災についてJEAG4607・1999と同様に1ケーブルの損傷のみを想定する場合には、ケーブルルート全てを別ルートとする必要はなく、補機火災の影響を受ける範囲のみ別ルートとすればよい。
- (3) 補機火災が2弁のケーブルを損傷する可能性が有る場合の対策として、ケーブルトレイに耐火ボードを設置する。あるいは、補機火災の影響範囲を限定するために補機の油止めを強化(漏洩油の液面面積を縮小)する。
- (4) 上記のLOCAにつながる恐れのある弁の系統の対策ではないが、逆止弁の設置により事象の発生を防止できる場合は、同一の弁構成のケースで、直列2弁のうち1弁を逆止弁に変更する。本案は比較的新しいプラントの系統構成と同じとなるが、弁の圧力損失増加等の系統上の成立性を別途検討する必要がある。

対策項目検討内容を表4に示す。このうち米国でも運用実績のある「NFB開」(弁全閉位置で電源切)という対策がケーブルトレイ内火災、補機火災、盤内火災の全てに対して有効であり、他の対策に比べてコストがかからず、簡単な操作で実現できるので

表4 火災時の弁誤動作防止のための対策項目と検討

対策項目	適応性			コスト	実現性	運用管理
	トレイ火災	補機火災	盤火災			
NFB開	○	○	○	○	○	△
ケーブルルート変更	○	○	×	△	△	○
トレイへの耐火ボード設置	×	○	×	△	△	○
油止めの強化	×	○	×	△	△	○
盤内配線分離	×	×	○	△	△	○
逆止弁に変更、又は追加	○	○	○	×	×	○

(コスト) ○:安価 △:比較的安価 ×:高い
 (実現性) ○:容易 △:比較的容易 ×:困難
 (運用管理) ○:容易 △:比較的容易 ×:困難

これが最適な対策と考える。

4. まとめ

- (1) 米国における火災防護に係る不具合事象を調査分析した。その結果、設計要件に対する違反事象が多く、安全停止設備のケーブル火災（全体の約40%）による接地、短絡等の電気回路損傷影響が主たる要因となっており、安全停止電気回路の火災時損傷解析項目および内容の詳細調査が必要であることが分かった。
- (2) 米国と日本の安全停止電気回路の火災時解析項目および内容の比較検討を行うことにより、米国では評価されている「火災時の弁誤動作による保有水の喪失」事象について、日本では評価されていない。
- (3) 1970年代に運転開始した1 PWRプラントについて「火災時の弁誤動作による保有水の喪失」事象の可能性のある弁(1)安全停止に使用する保有水喪失につながる恐れのある弁、(2)LOCAにつながる恐れのある弁、(3)事故時に使用する保有水の喪失につながる恐れのある弁についてケーブルトレイ内火災、補機火災、盤内火災に際し、保有水喪失が発生する可能性を検討した結果、4つの事象で発生する可能性があることが判明した。
- (4) 4つの事象について対策項目の検討を行なった結果、米国でも運用実績のある「NFB開」（弁全閉位置で電源切）という対策がケーブルトレイ内火災、補機火災、盤内火災全てに対して有効であり、他の対策に比べてコストがかからず、簡単な操作で実現できるので最適であると言える。
- (5) 国内の火災防護に関する不具合事象は少ないが、今回の調査により米国と日本の安全停止電気回路解析内容が一部異なっており、米国の内容を参考にした評価から安全上考慮すべき事象発生の可能性があると判明したことから、今後このような事象を考慮して設計および対策がなされることが重要であると考えられる。

文献

- (1) 麻坂 顕一，加藤 啓之，木田 正則，熊田 雅充，非常用炉心冷却系（ECCS）作動事象の分析，日本原子力学会誌36，501(1994)。
- (2) 麻坂 顕一，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 Vol. 2， pp.169-179（1995）。
- (3) 佐藤 正啓，柳 千裕，原子力発電所における水撃事象の分析，INSS JOURNAL Vol. 6， pp.103-112（1999）。
- (4) 奥田 恭令，軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析，INSS JOURNAL Vol. 7， pp.88-99（2000）。
- (5) 佐藤 正啓，原子力発電所における伸縮継手不具合事象の分析，INSS JOURNAL Vol. 8， pp.219-229（2001）。
- (6) 連邦規制10CFR（Code of Federal Regulation）50. Appendix R 1979年1月1日以前に運転した原子力発電所の火災防護プログラム。
- (7) NFPA Code/NFPA-805:Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants（2001 Edition）。
- (8) JEAG 4607-1999 原子力発電所の火災防護指針 日本電気協会（1999）。