

経年劣化と人的過誤を取り入れた 原子力発電所不具合事象の新しい原因分類法

New Method of Classifying Causes, including Aging and Human Error, of Events Which Occurred at Nuclear Power Plants

宮崎 孝正 (Takamasa Miyazaki) *

要約 原子力発電所の不具合事象を分析する際の原因分類の方法には幾つかあるが、ここでは、最近関心が高まっている経年劣化と人的過誤を取り入れて体系化した新しい原因分類法を提案し、その考え方と内容を示す。更に、この原因分類法により2005年に入手した海外の原子力発電所で発生した不具合事象の傾向分析を行った。その結果、不具合の原因は、運用面の不具合が約6割を占めその中でも保守不良が約6割を占めることが判り、保守不良の発生防止の重要性が判明した。

キーワード 原子力発電所, 不具合事象, 事故・故障, 傾向分析, 原因分類

Abstract There are several methods of classifying the causes of events which occurred at nuclear power plants. This paper proposes a new cause classification method that includes aging and human error, recently of concern to people, as factors which we have started to use in our analyses. The concept of the method and typical analysis results are described. By applying the method to events which occurred at overseas nuclear power plants in 2005, it is shown that operation errors account for about 60% of all errors, of which approximately 60% are maintenance errors. This result shows that it is crucial to prevent maintenance errors.

Keywords nuclear power plant, event, accident and incident, tendency analysis, cause classification

1. はじめに

原子力安全システム研究所(以下「INSS」という)では、原子力発電所の安全性と信頼性(安定運転)の向上をねらいとして、海外の原子力発電所で発生した不具合事象(以下「不具合」という)に関する米国の原子力規制当局(NRC)の情報、原子力発電運転協会(INPO:Institute of Nuclear Power Operations)の情報、世界原子力発電事業者協会(WANO:World Associations of Nuclear Operators)の情報、仏国原子力安全規制当局(ASN:Autorite de Surete Nucleaire)の情報、等を収集し、これらを分析して同種不具合の発生防止のための改善点を国内PWR電力会社に提言している。2005年には約2800件の不具合情報を入手して分析評価しているが、同時に、これらの不具合分析結果をデータベース(DB)化し、毎年さまざまな観点からの傾向分析を行っている。(1)~(5)

近年は設備の経年劣化や人的過誤(ヒューマンエラー)に関心が高まっているので、INSSの原因分類には経年劣化の項目がなかったことから経年劣化の項目を追加し、人的過誤についてはその背景要因も分析できる体系を考慮し、新しい原因分類法を考案し適用を始めた。本稿では、傾向分析の際に重要となる原因分類法について、その考え方、内容および適用例を示す。

2. 不具合分析の枠組み

2.1 分析の流れ

INSSでは、PWR海外情報検討会(電気事業連合会)の事務局として、海外不具合情報の分析を行い、同種不具合発生防止のための改善提言をPWR電力会社に行っている(図1参照)。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

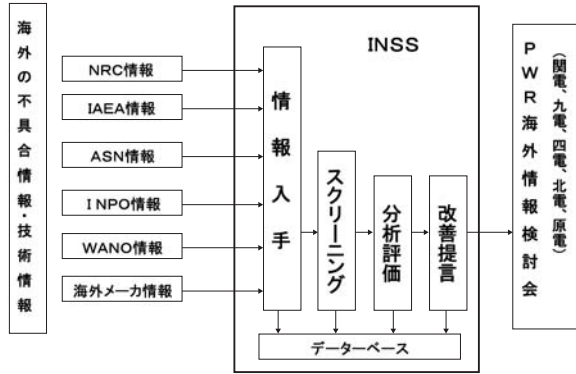


図1 海外情報の入手・分析の流れ

また、同時に、海外の不具合情報に、職能、発生原因、発生機器、発生部位、対策内容、等の分類コード付けをしてデータベース (DB) 化を行っているので、このDBを基に、海外の不具合事象の発生傾向を分析することができる。

同種不具合の発生防止は、海外における個々の不具合の原因と対策を参考にしながら国内発電所での改善点を抽出することである。一方、傾向分析は、不具合全体の中でどの様なタイプの不具合が多く発生しているかを抽出することであり、分析結果が直ちに改善提言に結びつく訳ではないが、注意すべき点がどこにあるのか、また、改善すべき範囲を絞り込む際に役立てることができる。

2.2 分析のねらい

原子力発電所で発生し報告される不具合には、発電所設備の安全性と信頼性 (安定運転) に影響した不具合と、そこに働く従事者の安全性 (労働災害) に影響した不具合がある。分析の目的は、不具合を教訓として同種および類似の不具合を発生させないようにすることであり、これらの確保すべき安全性と信頼性を整理すると次のようになる。

(1) 原子力安全

原子炉安全

- ・原子炉事故 (放射能放出) による公衆被ばくを防止。(シビアアクシデントに繋がる起因事象、緩和系や深層防護設備の故障・誤操作の発生防止)

放射線防護

- ・原子力施設からの異常な放射能放出による公衆被ばくを防止。
- ・作業従事者の過剰被ばくを防止。

核物質防護

- ・核燃料物質の盗難・紛失を防止。
 - ・テロ等による原子力施設の破壊による放射能放出を防止。
- (2) 一般産業安全
- ・火災、爆発、薬品流出、等による公衆への悪影響を防止 (原子力安全に関するものは (1) に含む)
- (3) 労働安全
- ・作業従事者の傷害を防止 (原子力安全に関するものは (1) に含む)
- (4) 信頼性 (安定運転)
- ・計画的な運転・停止を確保し、計画外の電気出力変動やプラントトリップを防止。

なお、INSSでは、効率性の観点から、全ての情報を詳細分析するのではなく、重要性を勘案して詳細分析する情報や事象を選別している。

3. 原因分類法の変更

3.1 従来分類法

発電所の不具合の原因分類法には特に標準化されたものはないが、電力会社が国へ不具合を報告する際や原子力施設情報公開ライブラリー (NUCIA) へ掲載する際には、電気工作物で発生した電気事故を電気保安年報に掲載する際の原因分類法⁽⁶⁾が準用されている。海外ではINPOとWANOがそれぞれ独自の原因分類法を採用しているが公表されていない。NRCの報告書に原子炉トリップに繋がった事象の原因分類を扱ったもの⁽⁷⁾があるが、全般的な原因分類法は見当たらない。

INSSでは、当初、旧原子力情報センター (電力中央研究所) が採用していた分類方法に近い分類体系を採用していたが、時代の変遷に合わせて変更してきた。

3.2 変更の背景

美浜3号機事故の原因の一つが経年劣化による2次系配管破断であったことや、国内外の多くの原子力発電所が運転期間30年を越えつつあることから、経年劣化による不具合の発生増加が懸念されている。また、美浜3号機事故のもう一つの原因が、配管の検査対象箇所が長年対象から洩れていたという品質管理システムの不良であり、組織要因や人的要因に

対する取り組みが求められてきている。このように、経年劣化や組織要因に対する社会的な関心が高まってきていることから、組織要因を構成する要素である個人の人的過誤を分析する必要性が生じている。これら「経年劣化」と「人的過誤」に対して的確な対策を検討するためには、INSSの原因分類法にこれらを反映する必要があった。

3.3 新分類法

新しい原因分類法を表1に示す。原因分類を考える上で、どの様な視点で原因を分類するのかが重要なことである。安全審査は発電所単位で実施され、安全性や信頼性は発電所単位で管理されていることから、発電所を基軸として、発電事業者の立場と視点で不具合を分類しておくことが、対策検討上で重要になる。

発電事業者の視点で不具合原因を見るときは、対策を考えて、発電所の設備（ハード）に原因があった場合と発電所員の運用（ソフト）に原因があった場合の二つに大別するのが便利であり、これに外部要因を加えて三大分類とした。

表1 新原因分類法

設備	設計不良	設計時の基準不備、設計時の人的過誤、現時点の基準に照らして不備、その他
	製造不良	工場製造時の人的過誤、不可抗力、その他
	施工不良	建設施工時の人的過誤、不可抗力、その他
	経年劣化	機器・コンクリートの経年劣化、原因不特定
	偶発故障	機器の偶発故障
運用	運転不良	計画不良（要領書、運転手順書の不備） ヒューマンエラー（操作段階における個人要因による人的過誤） 周辺状況不良（機器不備、環境不備、指示・連絡の不備） 不可抗力（想定外事象への対応不十分による運転結果） その他（労働安全不備、他）
	保守不良	計画不良（要領書、作業手順書の不備） ヒューマンエラー（作業段階における個人要因による人的過誤） 周辺状況不良（機器不備、環境不備、指示・連絡の不備） 不可抗力（検査合格した暇疵） その他（労働安全不備、他）
	その他の管理不良	運営不良、性能管理不良、燃料管理不良、放射線管理不良、廃棄物管理不良、水質管理不良
外部要因	外部要因	想定内（地震、雷、送電線事故、等） 想定外（妨害行為、テロ）

更に、それぞれを中分類、小分類と細部に展開する体系としたが、運用面は発電所内の管理単位で整理し、更に人的過誤とその背景要因を分析しやすい区分体系とした。

なお、実際の不具合報告書には原因が不明や記載がない報告書があるので、実務上は「不明」という分類項目が必要になるが、分類表上では省略している。

その他に考慮した点は次項で詳しく述べる。

3.4 変更で特に考慮した点

(1) 不具合内容と原因分類の関係

発電所で発生し報告される不具合は、前述したように、安全性に影響した不具合、信頼性に影響した不具合の2種類に分類されるが、これらの不具合を発生させた原因分類を考えると、不具合発生防止のためにとる措置として、設備の改善、運用方法の改善の観点から、設備と運用に2大別するのが都合がよい。更に、自然現象や送電線事故のように外部要因も不具合の発生原因となるので、設備、運用、外部要因の3分類で整理する体系とした。（図2参照）

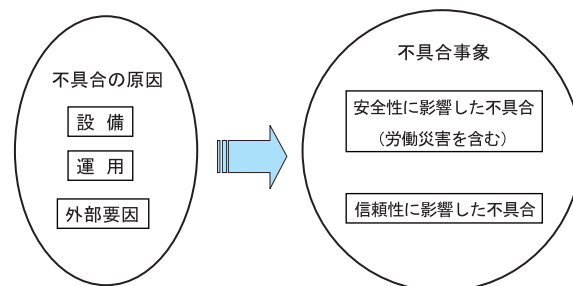


図2 不具合事象と原因の関係

(2) 運転保守を中心した体系に整理

従来の分類体系は、建設時を中心にした分類体系であり、発電所供用後の運転保守が中心の分類方法にはうまく合致しない点がある。従来の体系を踏襲しながらも、運転保守を中心にした時代に合致した体系とした。「設計不良」や「製造不良」を「保守不良」の一部と見る方法もあるが、従来の分類で既になじみがありこれらの用語を残した。

また、原因分類の細分化は、分析時に悩まないで分類できる程度とし、後で必要な時に必要に応じて細分化を行うという考え方にした。

(3) 運用面は各種管理の不良で整理

この分類法は、発電所の管理監督者の視点で原因

表2 各種管理の内容

種類	管理の内容	
個別	運転管理	運転課長（当直課長）は、必要な知識・資格のある運転員を適正配置し、操作手順書に従って、運転制限を守るようにプラントの運転操作を行わせる。また、設備に対する巡視点検を行わせる。
	保守管理	保守課長（係長）は、必要な知識・資格のある保守員を適正配置し、設備の保全計画（保守時期、保守方式、保守内容、要領書、作業手順書、等）に従って設備の保守作業（点検、試験、補修（溶接、等）、部品交換、改造、調整、検査、等）を行わせる。 （*）保守作業は、発電所内で行われる作業で、直営作業と委託作業の両方を含む。
	燃料管理	燃料課長（係長）は、燃料員に、要領書に基づき、燃料の受入、保管、炉心管理、使用済燃料の払出、等を行わせる。
	放射線管理	放射線管理課長（係長）は、放射線管理員に、従事者の被曝管理（被曝量測定、等）、発電所内作業環境の線量率管理（汚染測定、線量率測定、等）、放射線モニター（系統・環境の線量率、等）を行わせる。
	廃棄物管理	放射線管理課長（係長）は、放射線管理員に、放射性廃棄物（気体、液体）の外部放出量を基準内に管理させる。また、固体の放射性廃棄物を基準（要領書）に従って保管させる。
	水質管理	放射線管理課長（係長）は、放射線管理員に、一次系、二次系の水質が基準（要領書）に従っていることを確認させる。
	性能管理	技術課長（係長）は、技術員に、プラントの電気出力や熱出力等の性能が適正であることを確認させる。
	方針管理	発電所長は、発電所の基本的な運用方針を各課長に示し、方針が守られていることを確認する。
共通	人事管理	各課長は、課員の能力を評価し、人事異動による適正配置を図る。
	教育管理	各課長は、課員を教育・訓練し、知識や技能の維持と向上を図る。
	労務管理	各課長は、就業規定に基づき、課員の就業時間、休暇、等を適正に行う。 また、労働安全（労働災害の発生の可能性を検討し防止策を講ずる）を図る。
	品質管理	各課長は、文書管理、記録管理、変更管理、等を行う。

を分類し対策に繋げやすくすることをねらいにしたものであり、管理監督者を含む発電所員の運転管理や保守管理等の各種の管理不良という形態で運用面の不具合を整理した。発電所内における各種の管理の内容を表2に示すが、各管理監督者の所掌内での不具合発生をそれぞれの管理不良として整理してい

る。したがって、運転課長が管理すべき範囲での不良を「運転不良」、保守課長が管理すべき範囲での不良を「保守不良」とし、その他の担当課長が管理すべき範囲での不良をまとめて「その他の管理不良」として整理した。

なお、「保守不良」は、発電所内で不具合原因が発

原因	設備不良	運用不良	外部要因
	<ul style="list-style-type: none"> 設計不良(建設時, 機器取替時) 製造不良(建設時, 機器取替時) 施工不良(建設時) 経年劣化(腐食, 疲労, 他) 偶発故障 	<ul style="list-style-type: none"> 保守管理の不良 運転管理の不良 その他の管理不良 	<ul style="list-style-type: none"> 想定内(落雷等の異常気象, 送電線事故, 等) 想定外(妨害行為, テロ)

により、

直接原因	<ul style="list-style-type: none"> 設備の機械的故障(変形, 破損, 破断, 漏洩, 閉塞, 機能低下, 溶接欠陥, 亀裂, 等) 設備の電氣的故障(短絡, 過熱, 過電圧, 誤信号) 系統の機能低下(圧力低下, 流量低下, 等)や異常挙動(振動, ウォータハンマ, 等) 火災, 爆発, 冠水
------	--

が発生し、

不具合事象	<ul style="list-style-type: none"> 異常な運転状態(S I 信号発信, D G 起動) 異常放射能放出(施設内外) 出力変化(トリップ, 出力低下, 計画外停止) その他(社会的影響を与えた事象) 	<ul style="list-style-type: none"> 安全機能低下(D G 不起動, 保安規定要求機器の故障) 異常被ばく(従事者) 人身障害 火災, 爆発, 冠水による設備損壊
-------	---	---

という不具合を起こした。

図3 不具合事象・直接原因・原因の関係

生した不具合（保守員の直営作業とメーカ・協会社への委託作業の両方）であり、その原因がメーカ内や工場内で発生しておれば「設計不良」や「製造不良」となる。

(4) ヒューマンエラーの定義を明確化

人的過誤を一般的にはヒューマンエラー（HE）と呼ぶことが多いが、発電所の不具合を遡ると、設備の不具合であっても最終的には殆どの不具合は人間が関与した人的過誤が原因となってしまう。原因分類上で「ヒューマンエラー」と呼ぶのは、人的過誤のうち「実施段階における個人要因による人的過誤」と定義し、これを狭義のHEとした。この定義ではHEとなる不具合範囲は広がるが、保守作業不良となる調整不良、部品取替間違いなどは、すべて個人の判断行為の誤りの結果であることから、実施段階における個人要因による人的過誤が原因で運転操作不良や保守作業不良になった場合は、その人的過誤のみをHEと呼称して分類することにした。

運転操作不良や保守作業不良については、計画不良（手順書不備）や周辺状況不良（作業設備、作業環境、上司同僚からの指示連絡）が影響している場合、これらも人的過誤に関係していることから、原因として重複して関連付けておくことにより、これら背後要因とHE発生の因果関係を詳細分析することができる。また、背後要因の分析から、HEが起こる組織風土や安全文化との関連性を追求してゆくことが可能と考えられる。

(5) 不具合原因は根本原因で整理

不具合というのは、安全関連事象（一次系冷却水漏洩、等）、出力関連事象（原子炉トリップ、出力低下、等）、人身傷害、といった形態で顕在化し報告されるが、これら不具合を引き起こす直接原因は、機器故障、運転操作、系統機能低下、火災、爆発、等であり、一般的には、この直接原因を引き起こした原因を遡って究明することになる。原因究明で判明した原因（根本原因）を分類したのが表1の原因分類表である。

これら不具合事象・直接原因・原因の因果関係は図3のように表わすことができる。

(6) 原因は重複して計上

従来から、一つの不具合事象に対して原因が一つとは限らず、重複して計上しているが、新分類法で

の不具合原因の重複性は図4の模式図で示される。

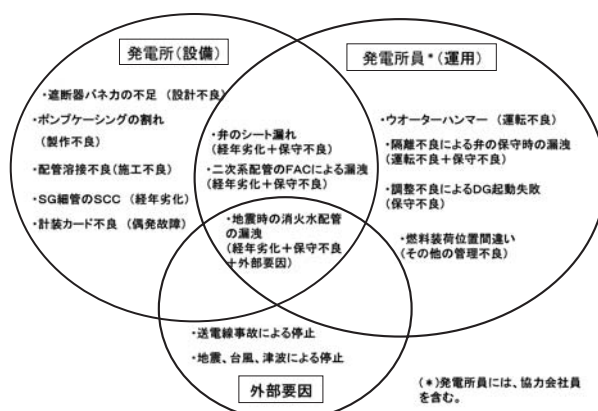


図4 不具合原因の重複性

3.5 旧分類との比較

今回の原因分類の変更で考慮した点は前述したが、新旧比較の形でこれらを整理すると図5に示すようになる。

(旧)	(新)	
設備不良	設計不良	4分類
設備劣化	製造不良	3分類
疲労損傷	施工不良	3分類
設備不良(設計不良)	経年劣化	3分類
設備不良(製作不良)	偶発故障	1分類
設備不良(施工不良)	保守不良	計画不良 ヒューマンエラー(HE) 周辺状況不良 不可抗力 その他
保守不良	運転不良	5分類
保守不良(マニュアル不備)	その他の管理不良	運営不良 性能管理不良 燃料管理不良 放射線管理不良 廃棄物管理不良 水質管理不良
保守不良(人的ミス)	外部要因	想定内(地震、雷、等) 想定外(テロ、等)
運転不良		
運転不良(マニュアル不備)		
運転不良(人的ミス)		
管理不良		
外的要因(地震、等6分類)		
外的要因(テロ)		

図5 原因分類法の新旧比較

4. 新分類法の適用例

新しい分類法は2006年に入手した不具合から全面適用しているので、適用例はまだ少なく、今後の傾向分析で活用する予定である。ここでは、旧分類法で分類した2005年に入手した海外原子力発電所の不具合に対して、新分類法を適用した場合の分類結果を図6に示す。この図からは、以下の傾向が判る。

(1) 不具合のうち、運用面の不具合が約6割を占める。

- (2) 設備面の不具合では経年劣化が最も多い。
 (3) 運用面の不具合では、保守管理不良が最も多く約6割を占める。

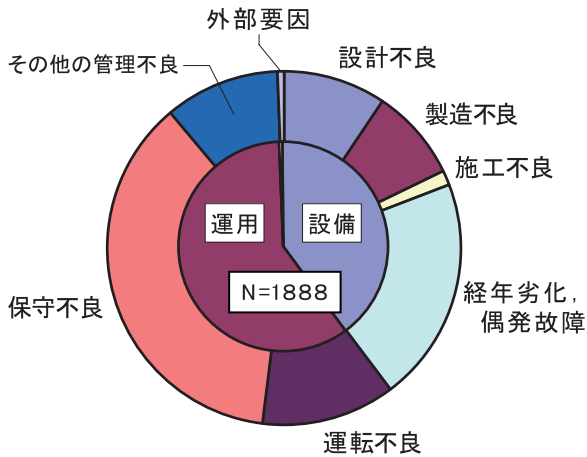


図6 海外原子力発電所における不具合の原因分類結果 (2005年)

この他にも、INSSで実施した傾向分析の中に幾つかの適用例があり、別途報告する。(8)~(11)

5. まとめ

傾向分析において重要となる原因分類法について、設備面と運用面を中心に、経年劣化と人的過誤を考慮した分類体系を作成した。また、これを海外原子力発電所の不具合原因の分類に適用し、運用面、特に保守管理の不具合が多いという傾向を把握した。今後、この分類法を適用して、国内外の不具合の傾向分析を進めていく予定であり、また、現状にとどまらず分類法の改善を進めていきたいと考える。

文献

- (1) 宮崎孝正, 佐藤正啓, 高川健一, 伏見康之, 島田宏樹, 「海外原子力発電所で発生した不具合事象の傾向分析 (2003年)」, 日本保全学会「第1回学術講演会」要旨集 pp.83-88, (2004).
- (2) 宮崎孝正, 佐藤正啓, 高川健一, 伏見康之, 島田宏樹, 嶋田善夫, 「海外原子力発電所における不具合事象の傾向分析 (2003年)」, INSS Journal, Vol.11, p.79, (2004).
- (3) 宮崎孝正, 佐藤正啓, 高川健一, 伏見康之, 島田宏樹, 「海外原子力発電所の不具合事象の発生傾向」, 日本原子力学会「2005年春の年会」, B 21, (2005).
- (4) 宮崎孝正, 佐藤正啓, 高川健一, 島田宏樹, 「海外原子力発電所の不具合事象の発生傾向 (2004年)」, 日本原子力学会「2005年秋の年会」, M2, (2005).
- (5) 宮崎孝正, 西岡弘雅, 佐藤正啓, 高川健一, 千葉吾朗, 高川健一, 島田宏樹, 「海外原子力発電所における不具合事象の傾向分析 (2004年)」, INSS Journal, Vol.12, p.82, (2005).
- (6) (社)日本電気協会, 保安院電力安全課他編, 「電気関係報告規則の解説」, (2005)
- (7) NRC,NUREG/CR-5750, "Rates of Initiating Events at U.S. Nuclear Power Plant: 1987-1995", (1998)
- (8) 島田宏樹, 「米国の原子力発電所における遮断器不具合事象の傾向分析」, INSS Journal, Vol.13, p.286, (2006).
- (9) 嶋田善夫, 「信頼性ブロック図による発電機の不具合事象分析」, INSS Journal, Vol.13, p.281, (2006).
- (10) 伏見康之, 「原子力発電所における空気作動弁ポジションの不具合発生傾向」, INSS Journal, Vol.13, p.276, (2006).
- (11) 高川健一, 「海外および国内の原子力発電所運転員の人的過誤の発生傾向と両者の比較」, INSS Journal, Vol.13, p.267, (2006).