

信頼性ブロック図による発電機の不具合事象分析

Events Analysis of the Main Generator Using Reliability Block Diagram

嶋田 善夫 (Yoshio Shimada)*

要約 海外および国内の原子力発電所の発電機で発生した不具合事象を信頼性ブロック図により詳細に分析した。ここでは機器と部品の故障について総発生件数のみならず、経年劣化事象にも注目した。その結果、故障発生件数の多い機器または部品として、「固定子冷却装置 - 配管」、「固定子冷却装置 - 弁」、「自動電圧調整装置」および「交流励磁機」を抽出した。これらの機器または部品については、事象報告書にさかのぼって1件毎に内容を再吟味したが、それら機器または部品は十分な点検が実施されていることなどから、国内の加圧水型原子炉 (PWR) 発電所に反映すべき追加の保全対策はないことを確認した。また、発生頻度を日米比較したところ、国内は米国より一桁程度低く、国内の現在の保全水準が高いと考えられる。

キーワード 信頼性ブロック図, 不具合事象分析, 発電機, 原子力情報データベース

Abstract Generator failure events at overseas and Japanese nuclear power plants were analyzed in detail through a reliability block diagram. This analysis not only took note of the total number of component failures and part failures but also focused on age-related degradation phenomena. Components or parts that were found to have failed most frequently included stator cooling system pipes, stator cooling system valves, automatic voltage regulators, and alternating-current exciters. Event reports on these components or parts were reexamined one by one. Because these components or parts have been adequately inspected, it was confirmed that there are no additional maintenance measures that should be reflected in Japanese pressurized water reactor (PWR) power plants. A comparison of the frequency of failures between Japanese and American power plants revealed that Japanese power plants suffered approximately one-tenth of the frequency of failures experienced in American plants, suggesting that higher levels of maintenance work are achieved at Japanese plants.

Keywords reliability block diagram, events analysis, generator, nuclear information database

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、米国原子力規制委員会 (USNRC)、原子力発電運転協会 (INPO: Institute of Nuclear Power Operations)、世界原子力発電事業者協会 (WANO: World Association of Nuclear Operators) などから原子力発電所の不具合情報を毎年2,800件前後入手し、これらを分析評価し、その結果を国内で加圧水型原子炉 (PWR) を所有する電力会社へ改善提言を行っている。

発電機の不具合分析を行った理由は、2003年に海外で発生した電気関係の不具合の中で、その発生割合の多い機器は、遮断器 (17%)、モータ (13%)、制御・保護装置 (13%)、発電機 (10%) の順となっており、発電機の不具合発生

割合は多い。

これら4つの機器のうち、発電機の不具合は、原子炉自動停止や原子炉手動停止となる可能性が高く、発電所の運転信頼性および安全性に影響する。さらに、発電機の重大な損傷は、発電所が長期間停止し、経済的な損失も大きくなる。

以上のことから、発電機の不具合を図1に示す信頼性ブロック図⁽¹⁾により再評価した。

2. 不具合の分析対象データおよび分析方法

原子力情報データベース⁽²⁾に登録されている1993年から2005年の13年間に海外の原子力発電所で発生した不具合事象数30,803件およびニューシア⁽³⁾に登録している1966年から2005年の40年間に国内の原

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

子力発電所で発生した不具合事象数2,505件の中から、発電機に関する不具合事象を抽出するとそれぞれ246件と48件となった。そこでこれらの事象について信頼性ブロック図を使用して分析した。発電機の信頼性ブロック図は、第一階層の発電機を第二階層の発電機本体、励磁装置、付属装置の3つの装置に展開し、さらにそれぞれの構成要素を第四階層まで展開した。さらに各構成要素について、海外と国内の不具合発生件数/割合および経年による不具合発生件数/割合を記載した。経年の不具合と判断した事象は、不具合原因が経年であると報告書中に明記された事象および専門家の技術的判断によりバスタブ曲線の磨耗故障期における故障と判定したものである。

なお、信頼性ブロック図は、確率論的安全評価で用いられるフォールトツリーと同様にシステムの構成機器がシステム全体を機能喪失させる条件を論理的に表現したものであるが、ここで用いた信頼性ブロック図は、システムを次第に細かい構成機器へ展開することにより、システム全体を分かりやすく表現する道具として用いており、構成機器の故障によってシステム全体が機能喪失にいたる論理関係を正確に表現したものではない。

3. 分析結果

信頼性ブロック図の第二階層を図2に示す。この図から見ると、海外では発電機本体の不具合発生割合が多く、国内では励磁装置の不具合発生割合が多い。また、経年劣化による不具合発生割合も、海外では発電機本体、国内では励磁装置の発生割合が多い。

海外に比べて国内では励磁装置の不具合発生割合が多い理由は、海外で交流励磁機の不具合割合が4%であるのに対して、国内ではそれが21%となっていることが寄与している。さらに、交流励磁機の中で沸騰水型原子炉(BWR)発電所の発電機に特有の設備

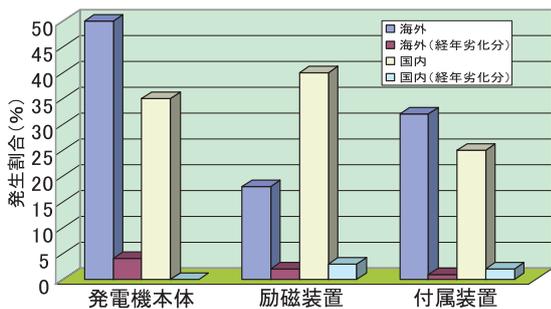


図2 第二階層の不具合発生割合の比較

であるブラシの不具合が13%であり、この不具合が国内の励磁装置の不具合発生割合を大きくしている。なお、国内PWRはブラシレス励磁機を採用し、ブラシがないことから、国内PWR発電所に対する反映事項はない。

次に信頼性ブロック図の最下層にあたる第四階層の不具合に注目して発生件数を比較した結果を図3に示す。ここでは海外または国内において8件以上の不具合が発生した機器を示す。ここに示す機器の中で、海外と国内の両方で発生件数が多い「固定子冷却装置 - 配管」、「自動電圧調整装置」および「交流励磁機」については、個別の事象報告書までさかのぼって次項で詳細に検討する。

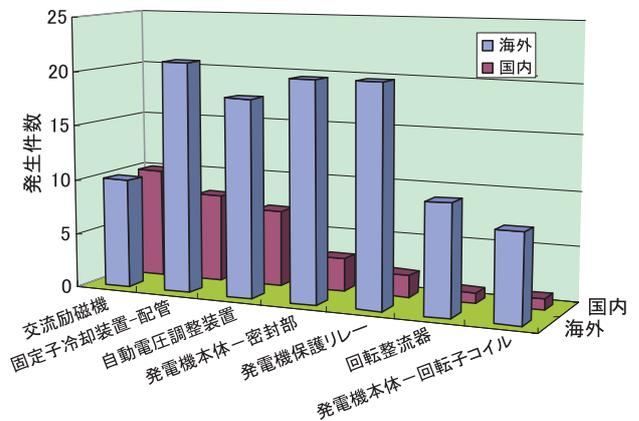


図3 第四階層の不具合件数の比較 (海外または国内において8件以上の不具合が発生した機器)

海外および国内において2件以上の経年の不具合が発生した機器を図4に示す。ここに示す機器の中で、海外と国内の両方で発生件数が多い「自動電圧調整装置」に注目して次項で詳細に検討する。また、国内では1件も発生していないが、今後国内でも経年により発生する可能性がある「固定子冷却装置 - 配管」および「固定子冷却装置 - 弁」についても次

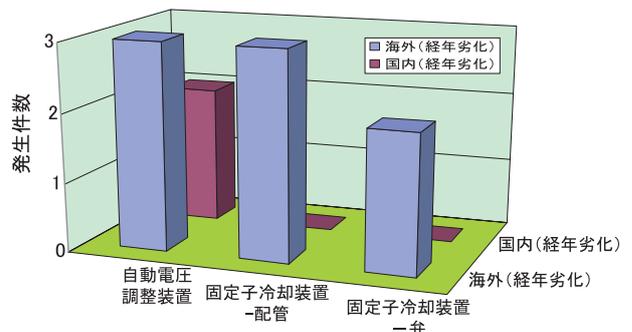


図4 第四階層の経年の不具合件数の比較 (海外または国内において2件以上の不具合が発生した機器)

項で検討する。

図5は2000年～2004年の発電機の不具合の発生頻度を日米比較したもので、米国および国内の不具合の発生頻度は、それぞれ0.29件/炉・暦年、0.04件/炉・暦年であった。また、影響なしを除いた出力に影響があった米国および国内それぞれの不具合の発生頻度は、0.15件/炉・暦年、0.02件/炉・暦年であった。この結果からして、国内は米国より発生頻度が1桁程度低く、国内の保全水準は米国に較べて高いと考えられる。国内との比較において対象を米国に絞った理由は、INSSは発電機以外の機器についても別途分析を行っており、発生頻度については米国と国内の比較を実施している。従って対象を米国に絞ることにより不具合の発生頻度については、発電機と他の機器の意味のある比較が可能である。

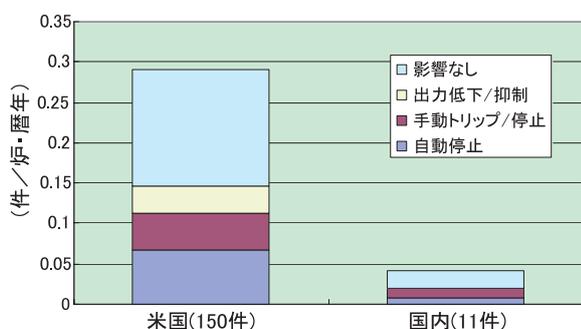


図5 主発電機の不具合発生頻度の日米比較 (2000年～2004年)

4. 詳細検討

ここでは、前項の分析によって抽出した「固定子冷却装置 - 配管」、「固定子冷却装置 - 弁」、「自動電圧調整装置」、「交流励磁機」について、個別の事象報告書にさかのぼり、詳細に分析した。

(1) 固定子冷却装置 - 配管

固定子冷却装置 - 配管の不具合は、海外と国内において、それぞれ21件と8件発生している。海外で発生した21件は、「冷却水配管に酸化銅などの異物が堆積して閉塞」、「冷却水配管の腐食などによる漏洩」が主であり、国内PWRでは「定期点検毎に通水試験及び流量特性試験、漏洩試験、運転中の溶存酸素の監視」を実施していることから、追加の保全対策は不要と判断される。国内で発生した8件は、いずれも冷却水配管が漏洩した事象であり、根本原因は工場での溶接不良や共振周波数など設計検証が不十分なことである。

また、経年劣化が原因と判断した不具合は、海外においてそれぞれ3件発生している。それらの原因は「流体加速腐食による減肉」、「タック溶接部での亀裂」、「ロウ付け接続部におけるすきま腐食」であり、国内PWRでは「定期点検毎に通水試験及び流量特性試験、漏洩試験、運転中の溶存酸素の監視」を実施していることから、追加の保全対策は不要と判断される。

(2) 固定子冷却装置 - 弁

固定子冷却装置 - 弁の経年劣化が原因と判断した不具合は、海外においてそれぞれ2件発生している。それらの原因は、「20年間手動弁の保守を行わなかったこと」、「温度制御器のリンク機構の疲労損傷」であり、国内では「手動弁の点検は少なくとも1回/10年の周期で計画的に実施していること、当該発電所のような発電機冷却水入り口温度を自動制御する装置を取り付けていない」ことから、追加の保全対策は不要と判断される。

(3) 自動電圧調整装置

自動電圧調整装置の不具合は、海外と国内においてそれぞれ18件と7件発生している。海外で発生した自動電圧装置の故障原因は、回路基板や可変抵抗器などの部品の故障が主であり、国内PWRでは、自動電圧調整装置の2重化が実施され、単一故障では機能喪失しない設計とし、さらに定期取替や定期点検を実施していることから、これについての追加の保全対策は不要と判断される。国内の7件の故障原因は、海外と同様に、回路基板や可変抵抗器などの部品の故障が主であることから、上記と同様の理由により追加の保全対策は不要と判断される。

また、経年劣化が原因と判断した不具合は、海外と国内においてそれぞれ3件と2件発生している。海外で発生した経年劣化の不具合は、固定抵抗器の故障(34年間使用)、スイッチの接触子が経年による変形、可変抵抗器の酸化が原因であり、国内PWRでは、自動電圧調整装置の2重化が実施され、単一故障では機能喪失しない設計とし、さらに定期取替や定期点検を実施していることから追加の保全対策は不要と判断される。国内で発生した経年劣化の不具合は、可変抵抗器のグリス酸化、電解コンデンサ故障であり、国内PWRでは、自動電圧調整装置の2重化が実施され、単一故障では機能喪失しない設計とし、さらに電解コンデンサは定期取替を実施していること、可変抵抗器は定期点検を実施していることから追加の保全対策は不要と判断される。

(4) 交流励磁機

交流励磁機の不具合は、海外と国内においてそれぞれ10件と10件発生している。海外で発生した交流励磁機に係る不具合は、ブラシやダイオードの取り付け手順書の記載事項の不備、運転手順書の不備、GE社の発電機固有の問題、回転子巻線保持リングの損傷などが原因であり、国内PWRではブラシレス励磁機を採用していること、手順書類は整備されていること、定期点検で確認されていることなどから追加の保全対策は不要である。国内の10件は、国内BWR発電所固有の励磁装置に係る不具合およびブラシの不具合であり、いずれの不具合も、ブラシレス励磁機を採用している国内PWRでは発生しないことから、国内PWRの追加の保全対策は不要である。

5. まとめ

信頼性ブロック図により海外および国内の原子力発電所の発電機に関する不具合事象を詳細に分析し、機器と部品について総発生件数だけでなく、経年劣化事象にも注目して故障発生件数の多い機器と部品を抽出した。このような方法で抽出した機器と部品は、(1)「固定子冷却装置 - 配管」、(2)「固定子冷却装置 - 弁」、(3)「自動電圧調整装置」および(4)「交流励磁機」であるが、事象報告書にさかのぼって1件毎に内容を再吟味した結果、十分な点検と検査が実施されていること、設計が異なることなどから、国内PWR発電所に追加の保全対策は不要であることを確認した。また、発生頻度を日米比較したところ、国内は米国より一桁程度低く、国内の現在の保全水準が高いと考えられる。

文献

- (1) NORMAN J. McCORMICK, "RELIABILITY AND RISK ANALYSIS; Methods and Nuclear Power Applications," pp.91-116, ACADEMIC PRESS, INC, (1980).
- (2) 宮崎孝正, 西岡弘雅, 佐藤正啓, 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).
- (3) 日本原子力技術協会, "原子力施設情報公開ライブラリー「ニューシア」運用手引き," (2006年).

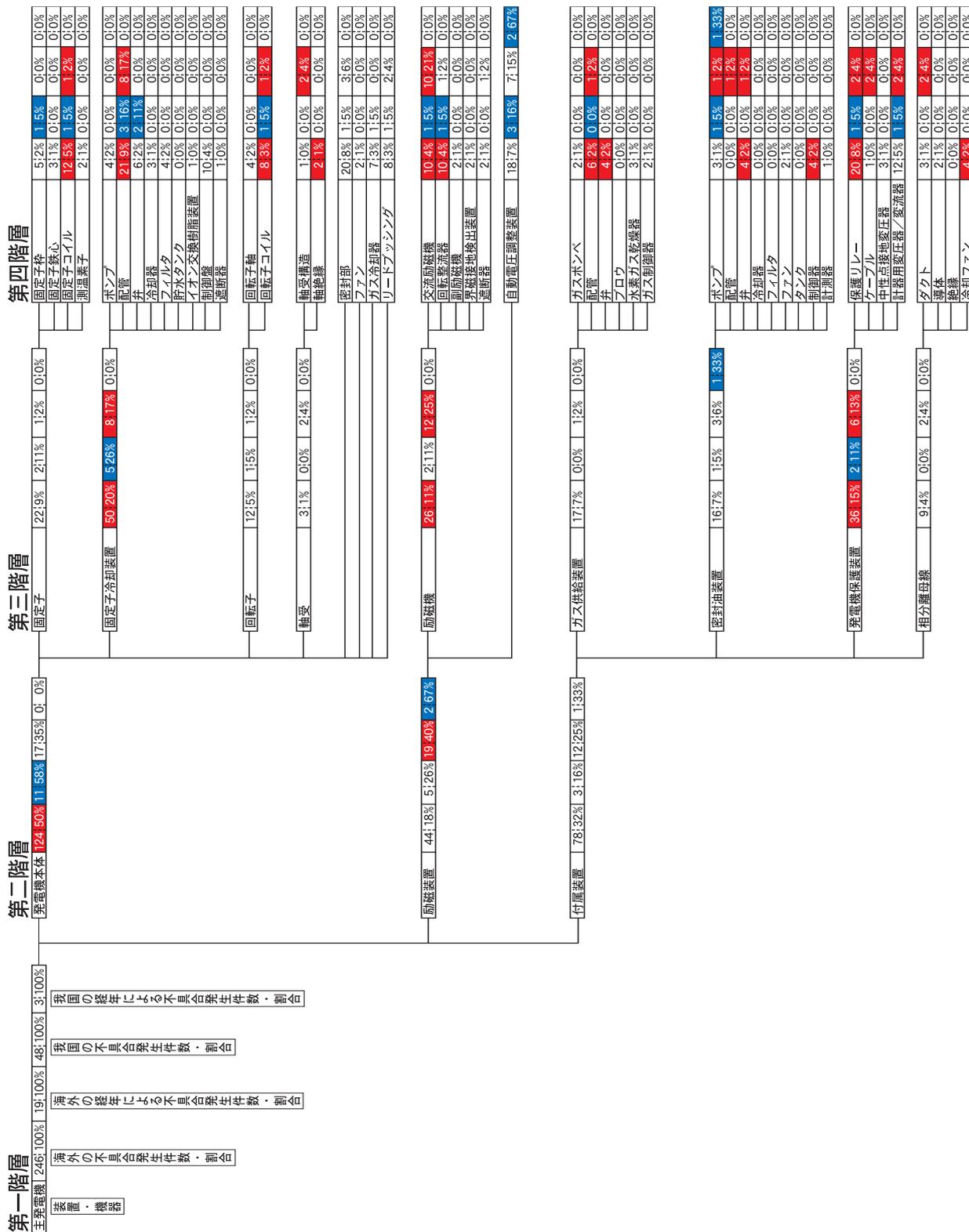


図1 発電機の信頼性ブロック図による不具合分析結果