

米国原子力発電所の出力増強に伴う不具合事象分析

Analysis of Events related to Power Uprates in Nuclear Power Plants in USA

佐藤 正啓 (Masahiro Sato)*

要約 米国原子力発電所で1995年から2004年までの10年間に発生した不具合事象の内、出力増強に伴う不具合事象84件を抽出し、不具合発生傾向を分析した。その結果、①事象件数は2002年に最も多い、②出力増強規模が大きい程不具合の発生が多い、③PWRよりBWRの方が事象発生割合は大きい、④給水系や主蒸気系等のいわゆる二次系の事象が大半である、といった傾向が明らかになった。

さらに日本のPWRで出力増強を将来実施する際には、超音波給水流量計の不具合の再発防止など、および給水系、主蒸気系等における振動疲労や流量増加の影響に配慮すべきであることが明らかになった。

キーワード 米国原子力発電所, 不具合事象, 傾向分析, PWR, 出力増強

Abstract Eighty-four events related to power uprates were extracted from the adverse events occurred at the nuclear power plants in USA for ten years between 1995 and 2004, and the trend analysis of them was performed. As a result, the following trends are confirmed: (1) the number of the events is the largest in 2002. (2) the higher the power uprate, the more the number of events. (3) the rate of the events related to the power uprates in BWRs is larger than in PWRs. (4) most of the events are related to the so-called secondary system such as feedwater system, main steam system etc.

In addition, it is confirmed that the corrective actions against the malfunction of ultrasonic feedwater measurement systems, as well as the effects of vibration/fatigue and increase in flow rate of feedwater system and main steam system etc. should be considered if power uprates are implemented at PWRs in Japan in future.

Keywords nuclear power plants in USA, adverse events, trend analysis, PWR, power uprate

1. はじめに

米国では1977年から出力増強が実施されており、2001年以降に急増し、現在までに全体の8割強のユニットで、①計測精度向上による出力増強、②中規模出力増強、あるいは③大規模出力増強が実施されている。

一方出力増強を実施したユニット数の増加に伴い、不具合情報件数も増加してきている。日本では現在出力増強は実施されていないものの、発電所の新設・増設によらない発電電力量増加の方策として有力な候補の一つである⁽¹⁾。このため、米国原子力発電所の出力増強に伴う不具合事象発生傾向を分析し、将来日本の加圧水型軽水炉 (pressurized water reactor,

PWR) で出力増強を実施する際に配慮すべき事項を明らかにすることを目的とした。

2. 米国における出力増強の状況

2.1 出力増強の種類

米国では3種類の出力増強タイプ⁽²⁾があり、以下にそれぞれの特徴を示す。

①計測精度向上による出力増強 (measurement uncertainty recapture power uprates, MU型) 出力計測の精度向上により、2%までの出力増強を行うものである。出力計測の精度向上技術として、Caldon社およびCE Nuclear Power社それぞれの超音波流量計を使

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

用した精度向上技術について原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) が安全評価書⁽³⁾⁽⁴⁾を発行しており、どちらかの技術が出力増強に使用されている。

2000年6月1日に、連邦規則 10CFR50 附則 K「非常用炉心冷却系評価モデル」が改訂され⁽⁵⁾、冷却材喪失事故解析において2%未満の出力測定誤差の使用が許されたことから、従来必要であった免除申請は不要になるとともに、審査が容易になっている。

- ②中規模出力増強 (stretch power uprates, S型) 7%台までの出力増強であり、通常計装設定点の変更が行われる。一般に主要設備の改造を伴わない。このことは特に沸騰水型軽水炉 (boiling water reactor, BWR) にあてはまる。ただし出力増強以前の運転が発電所設備能力に近いようなケースでは、より大きな変更が必要となることもある。
- ③大規模出力増強 (extended power uprates, E型) 中規模出力増強より大きく、20%までの出力増強である。通常、高圧タービン、復水ポンプおよびモータ、主発電機、あるいは変圧器といった主要設備の改造を伴う。

2.2 出力増強の承認状況

米国における出力増強にかかる運転認可の変更の承認状況を表1に示す。3種類の出力増強のうち少なくとも1種類の出力増強について承認されたユニットは、米国内103ユニット中84ユニットで80%を超えている。

炉型別で見ると、承認ユニット数はPWRでは80%弱、BWRでは90%弱とBWRの方が約10%上回っている。また出力増強規模では、中規模の出力増強の件数が最も多くなっており、PWRの中規模出力増強が35件と最も多いが、ユニット数に占める割合ではBWRの21件がBWRの約62%に相当し、最も大きい。即ちPWRに比べてBWRの方がより大きい割合のユニット、かつより大きい規模で出力増強が行われていることが分る。

一方出力増強の承認を全く受けていないユニット数は19ユニットあり、このうち2ユニットは申請中である。

表1 米国の原子力発電所出力増強の承認状況

(2004年末)

出力増強の種類	全体	PWR	BWR
承認ユニット数(割合%)	84(82%)	54(78%)	30(88%)
審査中又は未申請ユニット数	19	15	4
計測精度向上による出力増強(~2%)の承認数	35	25	10
中規模出力増強(~7%)の承認数	56	35	21
大規模出力増強(~20%)の承認数	12	1	11

注：同一の出力増強の種類で2回承認を受けたユニットは重複計上。計測精度向上による出力増強承認後元の出力に戻した1ユニット (Fort Calhoun) も承認数に含む。

2.3 出力増強の実施状況

出力増強%と出力増強運転実施日を図1に示す。大規模出力増強の内、15%を超える出力増強はBWRに限られており、実施時期は2001年末以降である。中規模出力増強が1977年から実施されているが、1990年台に入るまで1ユニットを除き全てPWRであった。計測精度向上による出力増強は1999年に初めて1%の出力増強が実施され、その後集中的に実施されている。

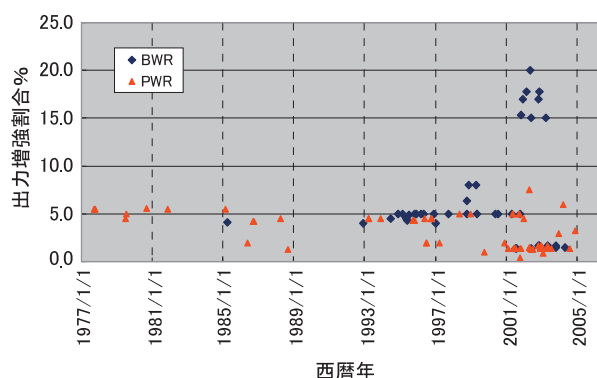


図1 出力増強の割合と実施日

(注：出力増強実施日は事業者がNRCに提出する運転月報 (Monthly Operating Reports) により調査)

3. 不具合事象の選定

3.1 対象情報と対象期間

法律に基づき NRC への報告が義務づけられている原子力発電所設置者事象報告 (Licensee Event Report), NRCが重要な問題について発行する Information Notice, Bulletin および Generic Letter, 並びに米国の原子力発電運転協会 (Institute of Nuclear Power Operation, INPO) および世界原子力発電事業者協会 (World Association

of Nuclear Power Operators, WANO) が発行する事象報告を対象とした。事象発生日の対象期間は、1995年1月1日～2004年12月31日の10年間である。

3.2 選定基準

出力増強に伴う事象の選定基準を以下のとおりとした。

- ①出力増強を目的とした作業を実施した際に発生した事象
出力増強のための改造工事や設定値変更等の作業時に発生した不具合事象。これには改造ミスなどの直接的な事象を含む。
- ②出力増強への対応に不備があった事象
事前の出力増強の評価が誤っていたり、実施しなかったなど対応の不備による不具合事象。
- ③出力増強の影響、寄与により発生した事象
出力増強を実施後の振動・疲労による劣化や流量増加の影響などの不具合事象。

上記の基準に従って、出力増強プロジェクトの開始から完了までの段階の不具合事象および出力増強運転実施後の不具合事象を選定することとした。

3.3 選定結果

選定した事象を整理した結果を表2に示す。ここで選定した84事象を対象に傾向分析および課題整理を行った。なお、選定した事象は、「3.2 選定基準」の①および②にかかる事象が大半であった。

表2 出力増強に伴う事象の発生件数

	計測精度向上	中規模	大規模	計
PWR	3	14	2	19
BWR	5	24	36	65
計	8	38	38	84

4. 事象の傾向分析

4.1 暦年の事象発生状況

暦年の事象発生状況を図2に示す。事象件数が2002年に最も多いのは、出力増強実施ユニットが2001年に急増したことによると考えられる。その後は減少傾向にあるものの、NRC や産業界で対策検討中の課題も残っている。

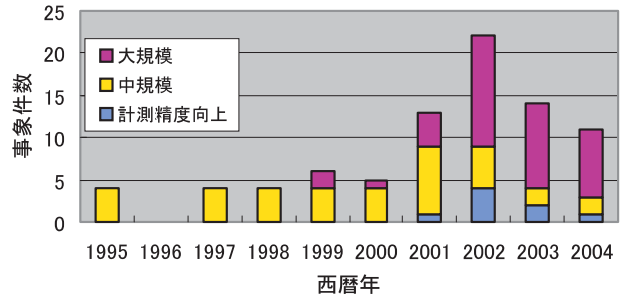


図2 出力増強に伴う事象発生状況

4.2 事象発生までの期間

事象発生までの期間を図3に示す。出力増強の割合が15%以上の出力増強ユニットについては出力増強開始から3年程度しか経過していないこともあって、2年程度以内に集中しているものの、短期間に多数発生している。また出力増強規模が10%以下においても短期間での発生が多く、出力増強の影響は比較的短期間で現れることを示している。

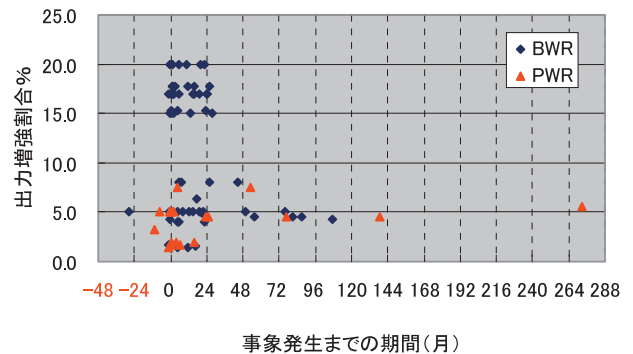


図3 出力増強後事象発生までの期間

4.3 炉型と出力増強規模

炉型と出力増強規模別の事象発生状況を図4に示す。事象発生割合（事象件数／承認件数）は出力増強規模に比例して大きくなっており、出力増強の規模が大きいほど不具合が発生し易いことを示している。

またBWRがPWRよりかなり大きいのは、BWRが出力増強の経験が浅いこと、特に15%以上の出力増強が多いことが考えられる。一方計測精度向上による出力増強に関しても、BWRがPWRより事象発生割合が大きい。ただし計測精度向上による出力増強の承認後中止した Fort Calhoun 発電所や出力計測の

精度向上技術を採用しているものの出力増強には使用していない Byron 発電所などの PWR でも、重要な精度問題が発生しており、炉型にかかわらず計測精度向上による出力増強を実施しているユニットでは注意が必要である。

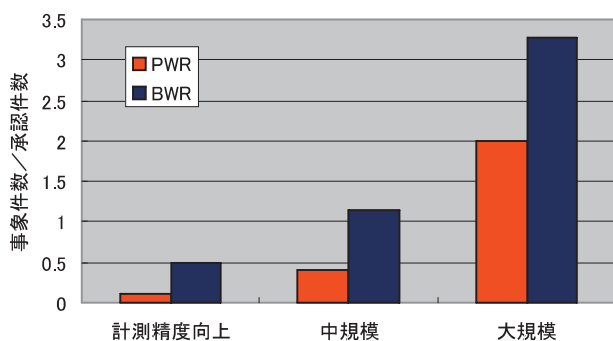


図4 炉型と出力増強規模に対する事象発生件数

4.4 職能と出力増強規模

「機械」、「計装」、「電気」、「原子燃料」、「発電」といった職能分類と出力増強規模別の事象発生割合を図5に示す。職能は、発電所の係単位に相当する区分であるが、これは設備と運用の両方の不具合を対象に扱うのに便利な分類方法である⁶⁾。

計装では各出力増強規模の事象が同程度あるが、その他の職能ではほとんど中規模と大規模の出力増強だけである。計測精度向上による出力増強では、計測精度の向上技術として計装設備である超音波給水流量計が使用されていること、また出力増強規模にかかわらず計装設備が関係していることにより、各出力増強規模で計装の事象が発生しているものと考えられる。

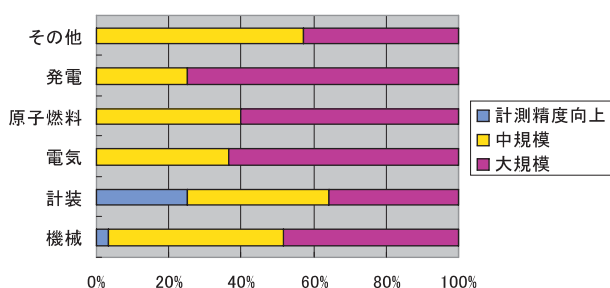


図5 職能別と出力増強規模別に見た事象発生割合

4.5 事象原因と出力増強規模

出力増強規模別の事象原因の割合を図6に示す。全ての出力増強規模で設備不具合の割合が大きいことが分る。

さらに出力増強規模別の設備不具合の内訳を図7に示す。出力増強の規模が大きいほど設備劣化と設計不良の割合が大きくなっている。一方出力規模が小さい計測精度向上による出力増強では製作不良の割合が大きい。

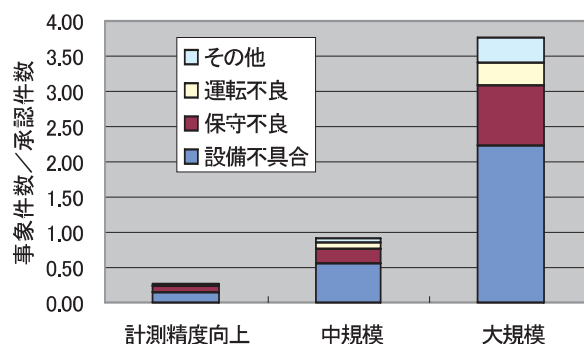


図6 事象原因

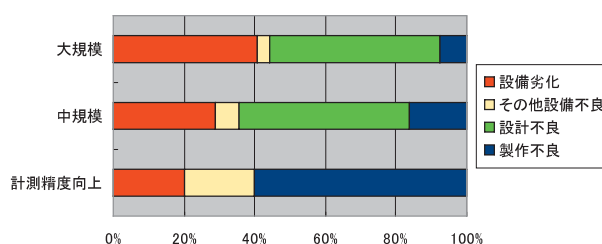


図7 設備不具合の内訳

4.6 系統別の事象発生状況

系統別炉型別の事象件数と系統別出力増強規模別の事象件数を、それぞれ図8と図9に示す。系統別の分類で事象件数の多いのは、給水系、主蒸気系、タービン制御系、抽気およびヒータドレン系の順になっており、いわゆる二次系設備の事象が大半である。

炉型別では PWR の件数は少ないものの、PWR と BWR でほぼ同じような割合で事象が発生している。なお BWR の蒸気乾燥器の損傷は原子炉炉内構造物に分類されている。

出力増強規模別では、計測精度向上による出力増強の事象は給水系中心に発生しており、一部主蒸気系と原子炉保護系に見られるだけである。それ以外では中規模と大規模の出力増強の事象である。

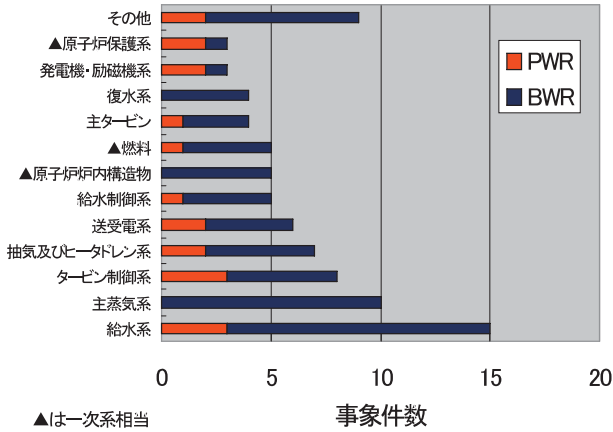


図8 系統と炉型

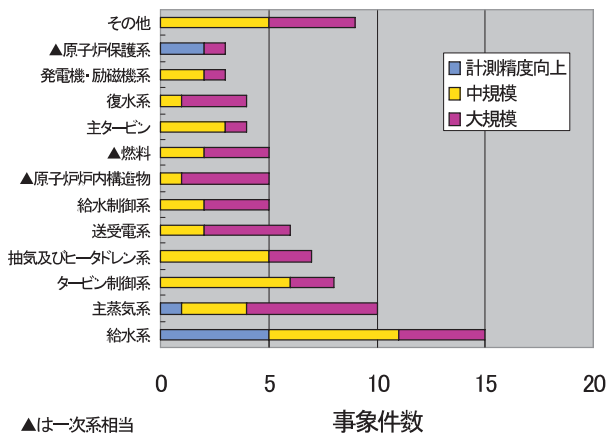


図9 系統と出力増強規模

5. 米国の不具合内容と日本のPWRで出力増強する際の課題

選定した84事象に記載された不具合内容を系統、炉型、機器に分類して整理し、それぞれに対するPWRにおける課題を表3に整理した。

米国における不具合内容の一例として、給水系を見ると、「給水流量の測定・計算にかかる事象が大半であり、特に超音波流量計の取付不良、製造不良、および精度不良が多い」という状況が分った。

また将来日本のPWRで出力増強を実施する際の主な課題は以下のとおりである。

- ①超音波給水流量計を採用する場合には、取付不良や製造不良にかかるメーカーの再発防止対策および品質管理に留意する必要がある。さらに精度問題についてはNRCおよびメーカー・タスクフォースの状況フォローが必要である。
- ②給水系と主蒸気系では、振動疲労による機器劣化や部品脱落、流量増加に伴う圧力低下の影響等があり、配慮が必要である。

- ③抽気系では、流量増加に伴い、給水加熱器の細管損傷、胴部の流体加速腐食が発生しているため、出力増強に配慮した点検が必要である。
- ④燃料において反応度管理が不適切であった事象が発生している。炉心設計に当たって十分な計画が必要である。

6. まとめ

過去10年分の米国における出力増強の不具合事象84件を抽出し、傾向分析を実施した結果、以下が明らかになった。

- ①出力増強実施ユニットが2001年に急増し、事象件数が2002年に最も多い。
- ②出力増強の影響は比較的短期間で現れる。
- ③出力増強の規模が大きいほど不具合が発生し易い。
- ④出力増強規模が大きく、経験の浅いBWRがPWRより事象発生割合が大きい。
- ⑤系統別の分類で事象件数の多いのは、給水系、主蒸気系等の、いわゆる二次系設備の事象が大半である。
- ⑥計測精度向上による出力増強の事象は給水系中心に発生している。それ以外はほとんど中規模と大規模出力増強の事象である。

また将来日本のPWRで出力増強を実施する際に配慮すべき点として、以下が明らかになった。

- ①超音波給水流量計の不具合の再発防止対策と品質管理ならびに精度問題
- ②給水系や主蒸気系等における振動疲労や流量増加の影響
- ③炉心設計にかかる十分な計画

本研究で選定した事象は、出力増強を目的とした作業時の不具合事象や、出力増強への対応の不備による不具合事象が大半であったが、米国でのこのような経験から明らかになった課題に配慮して、今後の出力増強に取り組んでいくことが望ましい。

文献

- (1) 綾野輝芳, 佐藤正啓, 伏見康之, 島田宏樹, 行政勝裕, 高川健一, 嶋田善夫, 「米国原子力発電所の高稼働実績と不具合事象の分析」, INSS Journal, Vol.10, p.82, (2003).
- (2) US NRC, "Power Upgrades," <<http://www.>

nrc.gov/reactors/operating/licensing/power-uprates.html#definition>, (2005年6月27日アクセス)

- (3) Safety Evaluation of Caldon ER-80P, "Improving Thermal Power Accuracy and Plant Safety While Increasing Operating Power Level Using the LEFM System, "March 8, (1999).
- (4) Safety Evaluation of CENPD-397-P, Rev-01-P, "Improved Flow Measurement Accuracy Using Crossflow Ultrasonic Measurement Technology," March 20, (2000).
- (5) US NRC, 10 CFR Part 50, RIN 3150-AG26, "Emergency Core Cooling System Evaluation Models, " Federal Register, Vol.65, No.106, June 1, (2000) .
- (6) 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」, INSS Journal, Vol.11, p.79, (2004).

表3 米国の不具合内容整理と日本のPWRで出力増強を実施する際の課題（1/2）

系統	米国の不具合内容整理	日本のPWRで出力増強を実施する際の課題
給水系	<p>1.給水の流量(密度および温度を含む)の測定・計算にかかる事象が大半であり、特に計測精度向上による出力増強に使用される超音波給水流量計の取付不良、製造不良および設置条件の変化に伴う精度不良が多い。</p> <p>2.流量増加の影響による劣化事象として、給水サンプルプローブの疲労、脱落異物による蒸気発生器伝熱管の摩耗がある。</p> <p>3.劣化以外の出力増強の影響による事象としては、復水流量増加による主給水ポンプシール水の圧力低下、一時的な給水流量の増加等である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 超音波流量計を採用する場合は、メーカーの再発防止対策および品質管理に留意する必要がある。 超音波流量計については計測精度向上による出力増強や校正用に多くのユニットで問題なく使用されていると考えられる。しかし一方で NRC のタスクグループや WH 社のタスクフォースで精度問題の対策が検討されているので、これらの状況を十分フォローする必要がある。 給水流量増加による振動等による二次系機器の損傷、その脱落異物による蒸気発生器伝熱管の摩耗損傷の可能性が高まることに注意する必要がある。 流量の増加による影響としては、シール水圧力低下のような影響もあるので、中規模及び大規模出力増強時には配慮が必要である。
主蒸気系	<p>1.事象は全て BWR であり、大規模出力増強の事象が半数以上となっている。</p> <p>2.蒸気流量の増加による劣化事象として、主蒸気逃がし安全弁振動による部品脱落や漏えい、主蒸気ドレンラインの疲労による破断、主蒸気電動逃し弁および配管支持構造物の流体励起振動による破損がある。</p> <p>3.劣化以外の出力増強の影響による事象として、蒸気流量増加に伴う圧力低下による設定値裕度低下などがある。</p>	<p>—</p> <ul style="list-style-type: none"> 発生事象は BWR のものであるが、出力増強で蒸気流量が増加すると PWR においても同様に振動による疲労損傷が発生する可能性があるため、配慮が必要である。 給水系と同様に流量増加の影響として、蒸気流量増加に伴う圧力低下の影響もあるので、中規模・大規模の出力増強においては配慮が必要である。
タービン制御系	<p>1.中規模出力増強による事象が大半を占める。</p> <p>2.劣化事象として、主蒸気加減弁アキュムレータ配管溶接部の疲労損傷がある。</p> <p>3.BWR に固有の事象として主蒸気圧力信号のノイズの除去不良がある。</p>	<p>—</p> <ul style="list-style-type: none"> 主蒸気系と同様であり、蒸気流量の増加により、小口径配管の疲労損傷等が発生する可能性があるため、配慮が必要である。 BWR 固有の事象である。
抽気およびヒータドレン系	<p>1.中規模出力増強による事象が大半を占め、また製造不良以外は劣化が関係している。</p> <p>2.給水加熱器の劣化事象として、細管損傷、胴部の流体加速腐食がある。なお細管損傷では設計・製作・保守不良も関係している。また他には、水位制御弁の振動による破損、給水加熱器ドレン配管の液滴衝突エロージョンがある。</p>	<p>—</p> <ul style="list-style-type: none"> 抽気系の蒸気流量増加により、給水加熱器の細管の振動による損傷、胴部の流体加速腐食等が発生する可能性が従来より高くなるため、出力増強に配慮した点検等が必要である。 また出力増強のために暫定的に設置した配管の影響で既設配管が減肉することから、配管改造に当たっては暫定的なものであっても確実な設計を行う必要があることを示している。

表3 米国の不具合内容整理と日本のPWRで出力増強を実施する際の課題 (2/2)

系統	米国の不具合内容整理	日本のPWRで出力増強を実施する際の課題
送受電系	1.主変圧器, 発電機相分離母線, 送電線にかかる事象であり, 原因は設計不良あるいは製造不良である.	・出力増強への対応に当り通常通り確実な設計検討が重要である.
給水制御系	1.劣化によるものではなく, 機器の初期故障, 設計時出力増強の影響の考慮不足, 出力増強による試験時の条件変化などが原因である.	・出力増強への対応に当り通常通り確実な設計検討と作業実施および設備改造後の変更管理が重要である.
原子炉 炉内構造物	1.全て BWR の蒸気乾燥器の疲労, あるいは製作・設計不良等に伴う疲労である. 疲労損傷によってルースパーツが発生し, 原子炉容器で発見された事象, あるいは再循環ポンプインペラを破損させた事象も発生している.	・発生事象は, いずれも BWR 固有の事象である.
燃料	1.出力増強に反応度管理が不適切であった事象が大半である. また炉心設計の変更の影響として, 原子炉容器内部構造物加熱や運転裕度の低下があり, 変更管理の問題も含まれている.	・出力増強時の炉心設計にあたっては事前に十分な計画が必要である. また運転制限値等への影響が考えられる場合もあることから, 変更管理の実施も重要である.
主タービン	1.改造工事の作業不良, ロータ取替後の運転手順書不備, 主蒸気加減弁ボルトの疲労といった種々の事象である.	・出力増強への対応に当り通常通り確実な設計検討と作業実施および設備改造後の変更管理が重要である.
復水系	1.復水器の真空低下の事象として, 復水器の性能不足, あるいは出力増強による温度上昇の寄与に伴う水質管理の効果不良による有機・無機物堆積がある. 2.トリップ用と監視用のタービン排気圧力計位置の相違による測定値の差異が, 出力増強で増大する事象が発生している.	・発生事象はいずれも当該プラント固有の問題と考えられる. ・発生事象はいずれも当該プラント固有の問題と考えられる.
発電機・ 励磁機系	1.全て発電機固定子冷却系の事象であり, 流量増加に伴うストレナ閉塞, 出力増強による裕度低下, および流量設定不良である.	・出力増強に当っては発電器固定子冷却系の性能について評価が必要である.
原子炉保護系	1.PWR において出力増強の影響による事象として, 一次冷却材温度の変動および過大出力温度設定値の裕度低下に伴う事象が発生している. 2.BWR ではメーカーの一般解析の誤りによる事象が発生している.	・出力増強の際には一次冷却材温度設定値, 過大圧力温度設定値等について検討が必要である. ・BWR 固有の事象である.
その他の系統 (運転監視補助装置 核計装系 原子炉隔離時冷却系 非常用復水器系 ほう酸注入系 補助給水系 余熱除去系 炉心スプレイ系他)	1.知識不足, 考慮不足等に伴う設定値の誤りが多い 2.出力増強の影響として, 中性子束モニタの指示値差異拡大や試験条件の変化に伴う事象が発生している.	・人的ミス防止や変更管理の確実実施等が重要である. ・人的ミス防止や変更管理の確実実施等が重要である.