

原子力発電所における原子炉自動停止事象の傾向分析

Trend Analysis of Nuclear Reactor Automatic Trip Events at Nuclear Power Plants

小寺 良雄 (Yoshio Kodera)*

要約 原子力安全システム研究所の原子力情報データベースに登録されている海外原子力発電所不具合事象から、原子炉自動停止事象（2002～2006年）を抽出し、その発生傾向について分析した。また、国内における原子炉自動停止事象の発生状況についても原子炉施設情報公開ライブラリーにより調査した。その結果、以下の点が判明した。

- ①海外のPWRでは、原子炉自動停止事象が電気設備、タービン設備、計測制御系統設備においてほぼ同等な頻度で発生しており、BWRに比較して、給水系、制御棒駆動系、原子炉保護系設備が原因となるケースが多い。
- ②発生原因では、保守不良と運転不良によるものが多く、保守不良の中では、保守計画不良、作業者過誤が多い。
- ③運転不良の中では、給水系および制御棒駆動系設備の運転操作で発生しているものが多い。
- ④国内における原子炉自動停止事象の発生件数は米国に比較して少なく、これは、電気設備、計装設備の不具合の発生頻度が低いことによるものと考えられる。

キーワード 原子力発電所, 原子炉自動停止, 不具合事象, 傾向分析

Abstract The tendencies of trip events in nuclear power plants overseas (2002 to 2006) registered in the nuclear information database of the Institute of Nuclear Safety System were analyzed with the following results:

- (1) Nuclear reactor automatic trip events at PWRs have occurred with nearly equal frequency in electric facilities, turbine facilities, and instrument and control system facilities. Automatic trip events arising from the water supply system, the control rod drive system, and the nuclear reactor protection system have occurred more often at PWR plants than at BWR plants.
- (2) The main causes of automatic trip events are maintenance errors and operation errors. Among maintenance errors, maintenance plan errors and human errors by maintenance workers are prevalent.
- (3) Among operation errors, errors in the operation of the water supply system and rod drive system are prevalent.
- (4) Automatic trip events have occurred less frequently in Japan than in the United States presumably due to the lower frequency of adverse events of electrical components and instrumentation components.

Keywords nuclear power plants, nuclear reactor automatic trip, adverse event, trend analysis

1. はじめに

原子力発電所において原子炉が自動停止した場合、原子炉出力の異常、原子炉冷却能力の低下等原子炉の安全性に影響を与える状況が発生したということだけでなく、設備の急激な圧力、温度変化による不具合発生も懸念されることから、自動停止に至る不具合を未然に防止することは、原子力発電所を安全・安定に運転する上で重要である。原子炉自動停止事象は海外での発生件数が多いことから、本分析

では海外の原子炉自動停止事象発生傾向の分析、国内の発生状況の調査を実施し、国内の原子炉自動停止件数のさらなる低減のために教訓となる事項を抽出した。

2. 海外原子炉自動停止事象の調査

2.1 分析対象とその抽出（海外）

原子力安全システム研究所（以下「INSS」とい

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

う)で構築している原子力情報データベースには、1994年以降に発行された米国原子力発電運転協会(INPO: Institute of Nuclear Power Operation)、世界原子力発電事業者協会(WANO: World Association of Nuclear Operators)の運転経験情報、および米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)のEvent Notification Report, Licensee Event Report, 2001年以降に発行された仏国ASN(Autorité de Sûreté Nucléaire)のMAGNUC情報を登録している。このうち、INPO、WANOの情報は非公開情報であり、会員間の情報交換、共有を目的として作成・発行されている。一方、米国NRCのEvent Notification Report, Licensee Event Report, 仏国ASNのMAGNUC情報等は公開情報であり、一定の基準を超える事象が発生した場合に、公衆へ通知することを目的として作成・発行されている。

ここでは、INSS原子力情報データベースに登録されている2002年から2006年の5年間に海外原子力発電所(PWR, BWR)で発生した不具合事象で、原子炉が自動停止した事象を分析の対象とした。なお、INSS原子力情報データベースにおける登録対象基数(2007年12月時点)は、PWR248基、BWR66基である。

2.2 設備別の発生状況

INSS原子力情報データベースに登録されている2002年から2006年の不具合の設備別発生件数の分類を図1に示す。電気設備、タービン設備、計測制御系統設備で約半数を占めており、PWR、BWRともほぼ同様な傾向を示している。その中から、原子炉自動停止事象のみを抽出し、設備別に分類した結果を図2に示す。不具合全体の分類と比較して、電気設備、タービン設備、計測制御系統設備が多く、PWRでは、ほぼ同等な割合で発生しており、BWRと比較すると計測制御系統設備の割合が多い特徴がある。また、比較のため手で停止した事象の分類を図3に示す。自動停止の場合と比較して、電気設備、計測制御系統設備の割合が少なく、原子炉冷却系統設備が多くなっている。これは、電気設備、計測制御系統設備のような電気系の設備は、不具合の兆候段階がなく直ちに停止につながるが、原子炉冷却系統設備は、漏えい等の兆候段階があり、その状況を判断して原子炉の停止を行うケースが多いと考えられる。

電気設備の不具合事象(原子炉自動停止)の詳細内訳を図4に示す。PWR、BWRとも送電系、発電機・励磁機系、所内電源系設備の不具合事象が多い。

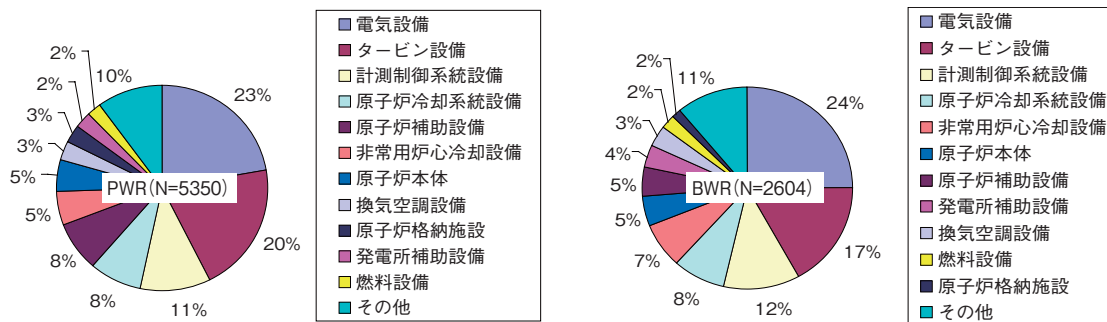


図1 設備別の不具合発生件数(原子炉自動停止以外の事象を含む)

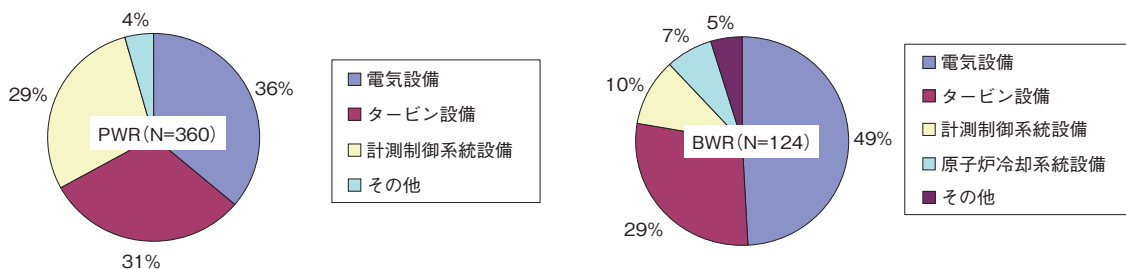


図2 原子炉自動停止発生件数

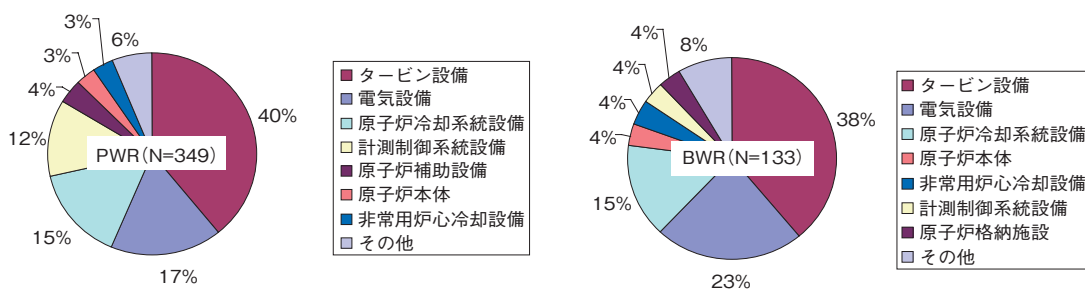


図3 原子炉手動停止発生件数

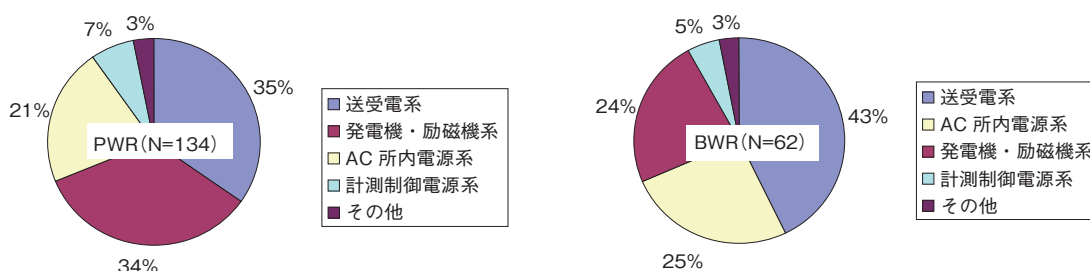


図4 電気設備不具合発生件数（原子炉自動停止）

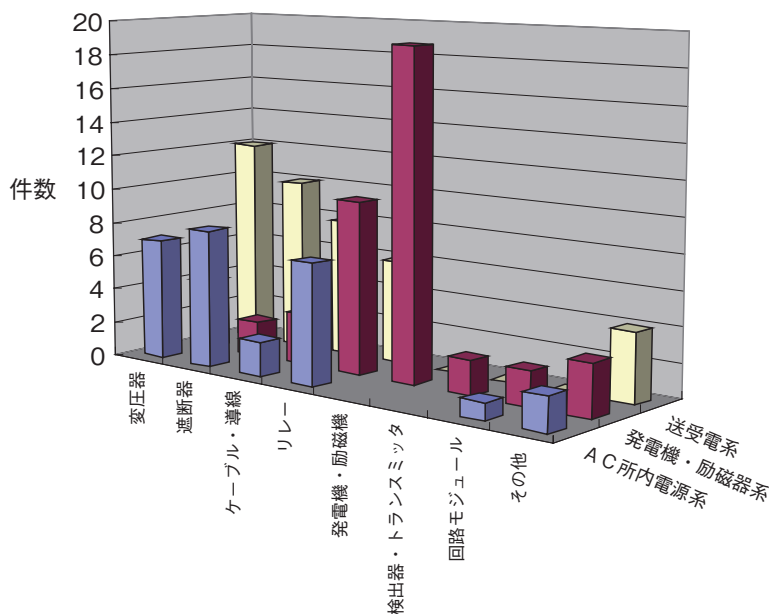


図5 電気設備機器別不具合発生件数（原子炉自動停止，PWR）

さらに、PWRの電気設備不具合を機器別に分類した結果を図5に示す。遮断器、リレー、変圧器、発電機・励磁機の不具合が多いことが分かる。発電機・励磁機系機器の不具合は、直接発電機の停止につながる他、送電系、所内電源系の遮断器、変圧器等の不具合についても送電電力の異常から、発電機の停止につながるため、最終的に原子炉自動停止に

至るケースが多いと考えられる。

タービン設備の不具合事象（原子炉自動停止）の詳細内訳を図6に示す。給水系、タービン制御系の不具合事象が多い。特にPWRでは、BWRに比較して給水系、主蒸気系設備が原因となって、蒸気発生器水位が変動し、原子炉自動停止となった事象が多い。これは、PWRの蒸気発生器は、BWRの原子炉

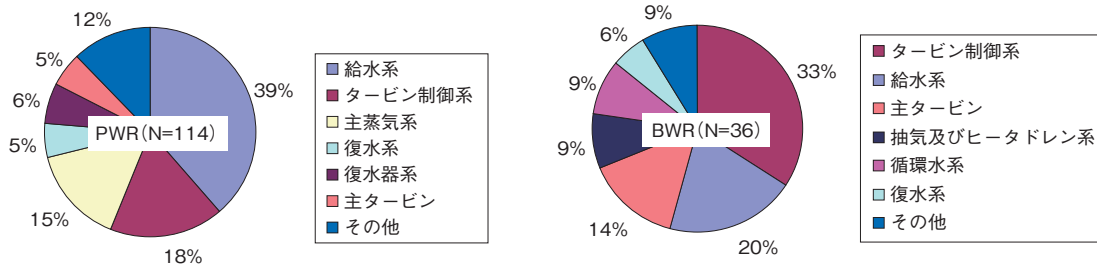


図6 タービン設備不具合発生件数（原子炉自動停止）

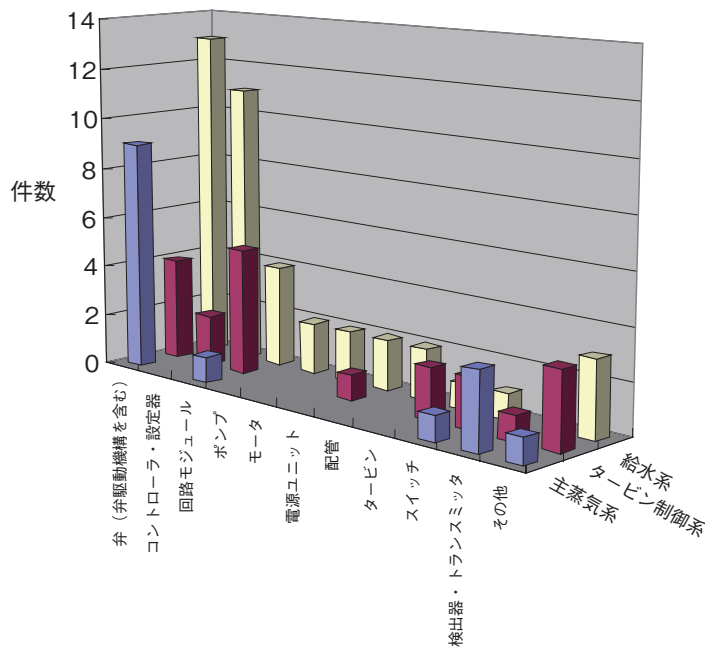


図7 タービン設備機器別不具合発生件数（原子炉自動停止，PWR）

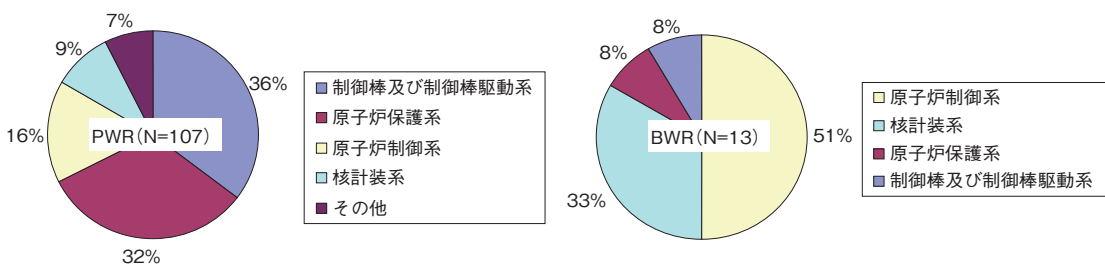


図8 計測制御系統設備不具合発生件数（原子炉自動停止）

容器に比較すると容量が小さく、また、接続される給水系、主蒸気系はそれぞれ1系統であることから、給水系、主蒸気系の不具合による給水流量、蒸気流量の変動が蒸気発生器の水位に与える影響が大きく、蒸気発生器の低水位、高水位による自動停止に至りやすいと考えられる。また、PWRのタービン設備

不具合を機器別に分類した結果を図7に示す。弁、コントローラ・設定器等、給水流量、蒸気流量の変動につながる機器の不具合が多いことが分かる。

計測制御系統設備の不具合事象（原子炉自動停止）の詳細内訳を図8に示す。原子炉保護系、制御棒及び制御棒駆動系、原子炉制御系等の不具合事象が多

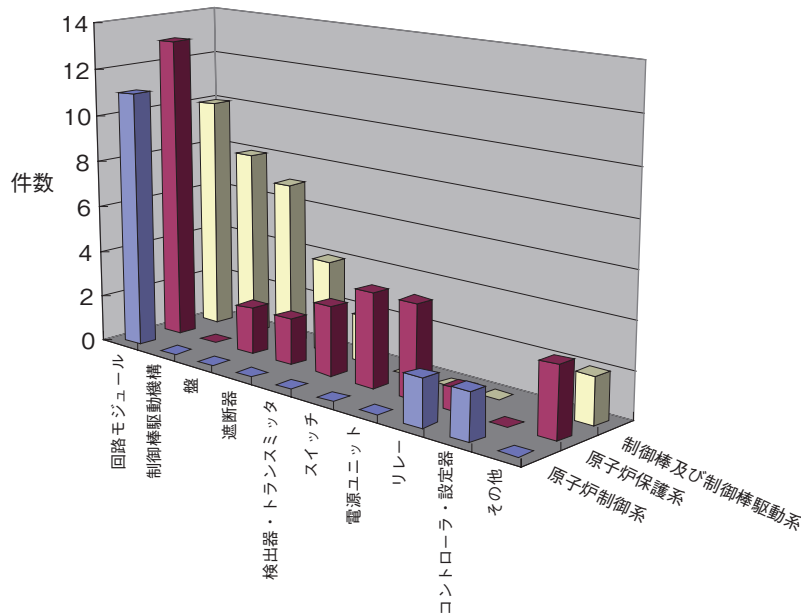


図9 計測制御系統設備機器別不具合発生件数（原子炉自動停止，PWR）

い。特にPWRでは、BWRと比較して、原子炉保護系、制御棒及び制御棒駆動系が多く、原子炉制御系が少ないという特徴がある。計測制御系統設備の不具合件数の割合は、不具合全体ではPWR、BWRに大きな差はないが（図1）、原子炉自動停止に至ったものではかなりの差があり（図2）、不具合の自動停止へのつながりやすさに違いがあると考えられる。両者の設備を比較⁽¹⁾すると、BWRの原子炉保護系は、独立した2系統の設備で構成され、2系統同時に停止信号が発信した場合に自動停止する設計であり、設備の単一故障が自動停止につながりにくいと言える。一方、PWRの原子炉保護系も主に独立した2系統の設備で構成されるが、どちらか一方の系統の作動で自動停止となる設計であり、BWRと比較して設備の単一故障が原子炉自動停止につながりやすい。また、制御棒及び制御棒駆動系に関しては、PWRでは、設備の故障により制御棒を保持している駆動機構の電源が喪失した場合には止め金が外れ、重力により制御棒が挿入されるフェイルセーフ設計となっている。この点については、BWRにおいても同様であり、故障が生じた場合には安全側に動作するようにフェイルセーフ設計となっている。例えば、停止信号発生時に制御棒を水圧で急速挿入するために動作するスクラム弁は、ソレノイド作動の常時励磁のスクラム・パイロット弁により空気圧がかかって閉止状態が保たれているが、スクラム・パイロット弁の電源が喪失した場合には動作して制御棒

を挿入する。しかし、スクラム・パイロット弁は、1台のスクラム弁に対して2台あり、両方が無励磁になった場合にスクラム弁が動作することから1台の故障では制御棒挿入とはならず、不必要な原子炉自動停止の防止という観点では信頼性が高いと言える。このようにBWRでは、設備の単一故障が制御棒の急速挿入につながりにくく、そのためPWRに比較して自動停止に至りにくいと考えられる。さらに、PWRの計測制御系統設備不具合を機器別に分類した結果を図9に示す。各系統とも回路モジュールの不具合が多いことが分かる。

2.3 原因別の発生状況

原子炉自動停止事象（2005～2006年）の原因を分類⁽²⁾した結果を図10に示す。保守不良、運転不良、経年劣化が多い。また、保守不良をさらに詳細原因で分類した結果を図11に示すが、保守計画不良、作業者過誤が多いことが分かる。

保守不良（原子炉自動停止）の設備別の分類（2002～2006年）を図12に示す。電気設備、計測制御系統設備、タービン設備が多い。また、機器別に分類した結果を図13に示す。リレー、弁、回路モジュールが多いことが分かる。原子炉自動停止防止のためには、これら系統、機器の保守計画、作業者過誤による保守不良に特に注意が必要である。

次に運転不良（原子炉自動停止）の設備別分類

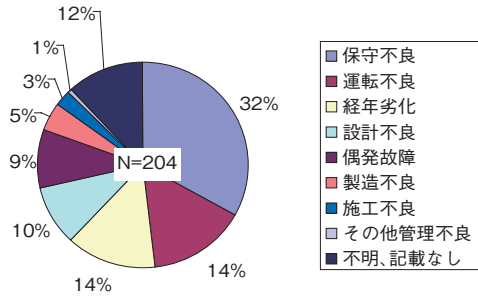


図 10 原因別不具合発生件数 (原子炉自動停止, PWR, BWR)

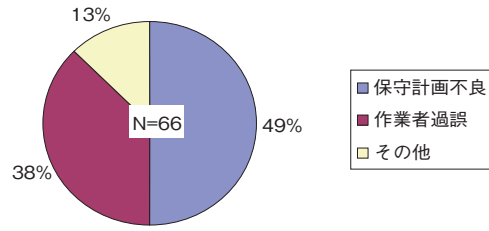


図 11 保守不良の詳細分類 (原子炉自動停止, PWR, BWR)

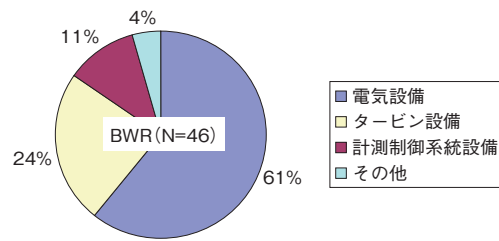
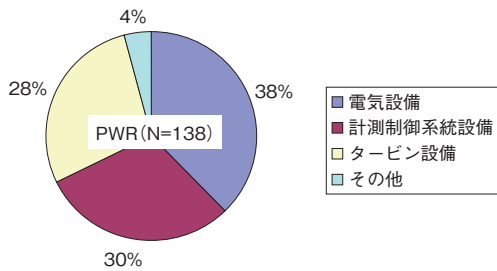


図 12 保守不良の設備別不具合発生件数 (原子炉自動停止)

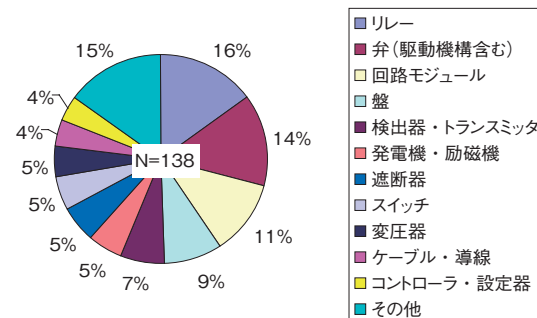


図 13 保守不良の機器別不具合発生件数 (原子炉自動停止, PWR)

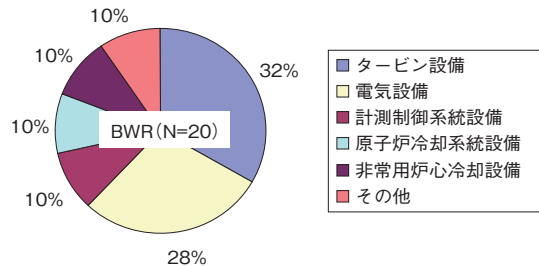
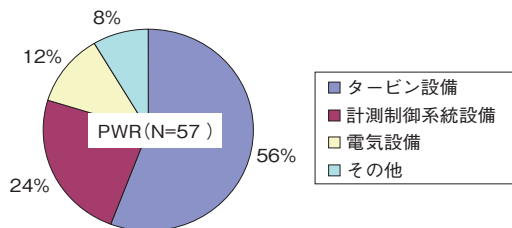


図 14 運転不良の設備別不具合発生件数 (原子炉自動停止)

(2002~2006年)を図14に示す。タービン設備, 計測制御系統設備, 電気設備が多く, PWRではタービン設備が過半数を占めている。さらに, PWR

タービン設備における運転不良の系統別分類を図15に示す。給水系設備が多く, 約半数を占めており, 給水系設備の中では弁装置が多い。

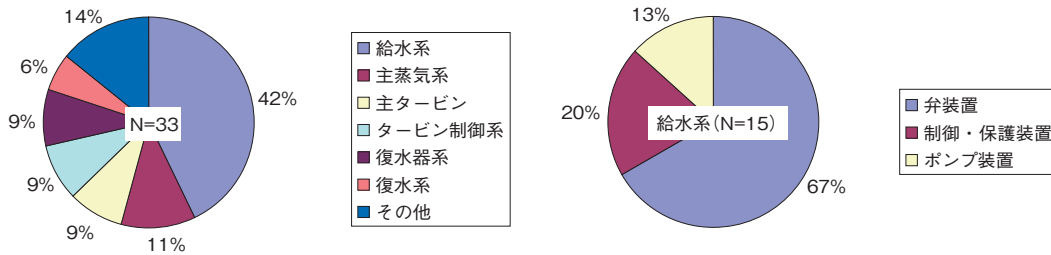


図 15 タービン設備運転不良の系統別発生件数 (原子炉自動停止, PWR)

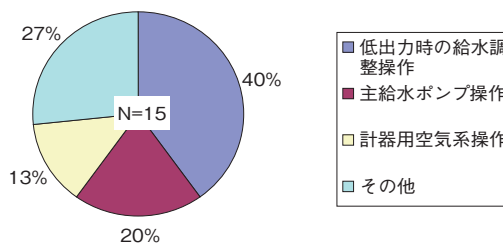


図 16 タービン設備の運転不良 (給水系) の運転操作別発生件数 (原子炉自動停止, PWR)

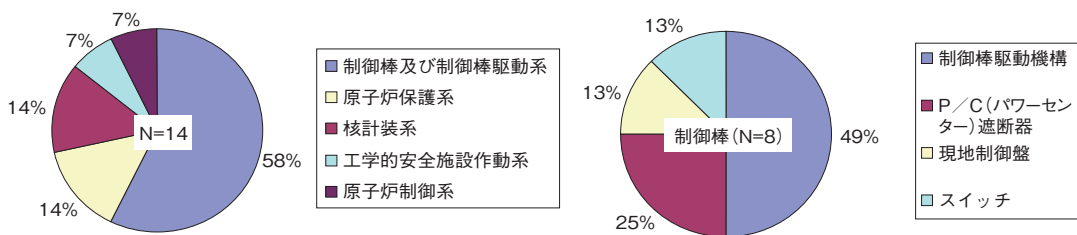


図 17 計測制御系統設備の運転不良の系統別発生件数 (原子炉自動停止, PWR)

PWR タービン設備 (給水系) における運転不良を運転操作別に分類した結果を図 16 に示す。プラント起動停止時等低出力時の給水調整操作、主給水ポンプ操作等が多い。特に起動停止時は、蒸気発生器の給水を主系統、バイパス系統間で切替える操作があり、蒸気発生器の水位調整には注意が必要である。国内においては、運転員はシミュレータにより給水切替え、給水調整操作の訓練を十分行っているが、海外と同様に蒸気発生器の給水切替え時に原子炉が自動停止した事例があることから、今後も継続して訓練を実施すると共に、設備の不具合等様々なケースを想定して訓練を行ない、運転操作技術のレベルアップに努める必要がある。また、定格出力運転中においては、給水の調整操作は基本的にないものの、計器用空気系統の隔離の誤操作等により給水制御弁の閉止となる可能性があることから、運転員はこのような危険性を十分認識した上で操作に当たる必要

がある。

また、PWR 計測制御系設備における運転不良の系統別分類を図 17 に示す。制御棒及び制御棒駆動系が多く、過半数を占めている。これら設備の運転操作において特に慎重な操作計画の作成、操作の実施が必要である。

これら制御棒及び制御棒駆動系運転不良を運転操作別に分類した結果を図 18 に示す。制御棒駆動系 (CRDM: Control Rod Drive Mechanism) 電源遮断器操作、制御棒操作等が多い。特に CRDM 電源の操作を誤り電源が喪失した場合、直ちに制御棒の落下につながることから注意が必要である。また、制御棒の挿入、引き抜き操作も原子炉出力に直接影響するものであり、原子炉自動停止につながりやすいことから、パラメータの監視を十分行い、慎重な操作が必要である。

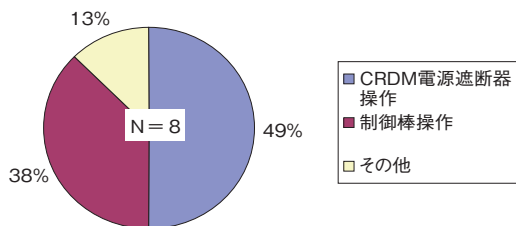


図 18 計測制御系統設備の運転不良（制御棒及び制御棒駆動系）の運転操作別発生件数（原子炉自動停止，PWR）

3. 国内原子炉自動停止事象の調査

3.1 分析対象とその抽出（国内）

国内事象の抽出には、原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）⁽³⁾を活用した。対象は海外と同様に過去5年間（2002～2006年）とし、原子炉自動停止事象を抽出した。

3.2 原子炉自動停止事象の発生状況

抽出した原子炉自動停止事象の件名リストを表1に示す。5年間で11件あり、その内、5件は、地震、送電系統の擾乱等発電所外の外部要因によるものである。1基当たりの発生件数も米国⁽⁴⁾の1/10程度と非常に少ない。また、件数が少ないため、発生傾向の特徴を見出すことは出来ないが、海外で件数が多かった給水系の運転操作時の不具合（高浜3号機2006.8.18発生）が国内においても発生している。

今回の海外における原子炉自動停止事象の分析結果から分かるように、原子炉自動停止事象の発生には電気、計装関係の機器の不具合が大きく影響している。また、INSSでこれまで実施してきた日米の不具合発生頻度の分析結果^{(5)～(7)}から、電気、計装関係の機器については、日本の不具合の発生頻度が米国の1/8以下であり、機械関係については、電気、計装関係に比較して日米の不具合発生頻度が接近していることが分かっている。このように日本の電気、計装関係の不具合発生頻度が低いことが原子炉自動停止事象の件数が少ないことにつながっていると考えられる。

今後、オンラインメンテナンス等、プラントの運用が米国の状況に近づいた場合には、原子炉自動停止の増加も懸念されることから、その点を踏まえて今後のプラント運用を行っていく必要がある。

4. まとめ

海外原子力発電所における原子炉自動停止事象の発生傾向の分析、国内における発生状況の調査を行った結果、設備の保守、運転操作上の留意点等以下の結論を得た。

- (1) 海外のPWRでは、原子炉停止事象が電気設備、タービン設備、計測制御系統設備においてほぼ同等な頻度で発生している。また、BWRと比較した場合、その設備の違いから、タービン設備の給水系、計測制御系統の制御棒及び制御棒駆動系、原子炉保護系設備が原因となって原子炉自動停止となるケースが多いという特徴

表1 国内の原子炉自動停止件名リスト（2002～2006年）

	発生日	ユニット	炉型	件名
1	02.03.31	東海2	BWR	原子炉自動停止における制御棒1本の不完全挿入について
2	03.05.26	女川3	BWR	女川3号機の地震に伴う原子炉自動停止について
3	03.12.19	敦賀1	BWR	送電系統の擾乱による原子炉自動停止について
4	04.06.08	敦賀1	BWR	原子炉自動停止について
5	04.07.09	柏崎刈羽発1	BWR	発電機地絡継電器動作による原子炉自動停止について
6	04.08.09	美浜3	PWR	二次系配管破損事故について
7	05.07.03	柏崎刈羽5	BWR	復水器真空度低下に伴う原子炉自動停止について
8	05.08.16	女川1, 2, 3	BWR	8・16宮城地震による女川原子力発電所全プラント停止について
9	05.12.22	大飯1, 2	PWR	送電系統事故に伴う大飯1,2号機原子炉停止及び大飯3,4号機所内単独運転について
10	06.06.15	浜岡5	BWR	5号機タービン振動過大によるタービン自動停止に伴う原子炉自動停止について
11	06.08.18	高浜3	PWR	「B-SG 水位異常低」警報発信による原子炉自動停止について

があり、PWRの原子炉自動停止防止という点では留意すべき重要な設備と言える。

- (2) 原子炉自動停止の発生原因では、保守不良によるものが多く、その中では、保守計画不良、作業者過誤が多い。また、それらを設備で分類すると、電気設備、タービン設備、計測制御系統設備が多く、機器では、リレー、弁、回路モジュール等が多い。原子炉自動停止の防止のためには、これらの設備、機器における保守計画、保守作業時の人的過誤防止に特に注意が必要である。
- (3) 発生原因では、運転不良によるものが次に多く、タービン設備の給水系、計測制御系統設備の制御棒及び制御棒駆動系における運転操作で発生している。原子炉自動停止の防止のためには、これらの設備における運転操作では特に注意が必要である。
- (4) 国内においては、現状では原子炉停止事象の発生件数は米国に比較して少ない。これは、原子炉停止事象への寄与が大きい電気設備、計装設備の不具合の発生頻度が国内の方が低いことによるものと考えられる。

文献

- (1) 原子力安全研究協会，“軽水炉発電所のあらまし，”（1992年10月）。
- (2) 宮崎 孝正，“経年劣化や人的過誤等を含めた原子力発電所不具合事象の新たな原因分類法とその適用結果，”日本原子力学会論文誌，Vol.6（No.4），pp.434-443（2007）。
- (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，<http://www.nucia.jp/>（2008年1月20日現在）。
- (4) NUREG-1350 Vol. 19，“Information Digest 2007-2008，”USNRC（2007）。
- (5) 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）。
- (6) 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）。
- (7) 嶋田 善夫，“原子力発電所の装置，機器毎の不具合発生頻度の日米比較，”INSS JOURNAL，Vol.14，p.316（2007）。