

最近の米国加圧水型原子力発電所の運転状況 —高い設備利用率の要因に注目した調査—

Recent Operation Status of Pressurized Water Reactors in the U.S.A.
—Investigation of the Cause of Their High Capacity Factor—

塚本 重信 (Shigenobu Tsukamoto)*

要約 米国原子力規制委員会が毎日ウェブサイトで公表している Power Reactor Status Report をベースにして、2003年から2007年の米国の加圧水型原子力発電所の運転状況を収集すると共に、米国原子力委員会が発行している NUREG 報告書のプラント毎の設備利用率をまとめて特徴を抽出した。その結果、米国原子力発電所では、燃料取替のための停止期間がわが国で燃料取替を実施している定期検査の停止期間より短く、自動トリップと手動トリップがわが国より多い割に復旧が早く、設備利用率が高水準で維持されていることが立証された。

キーワード 加圧水型原子力発電所、設備利用率、燃料取替日数、自動トリップ、手動トリップ、運転中補修

Abstract Operation conditions of pressurized water reactors in the U.S. were collected based on the Power Reactor Status Report released daily on the website of the U.S. Nuclear Regulatory Commission and capacity factors at each plant were collected from NUREG reports issued by NRC and their trends were analyzed.

The results showed that nuclear power stations in the U.S. have shorter refueling outage periods than those in the periodical inspections in Japanese plants. Moreover, U.S. plants are restored faster from both automatic and manual trips in spite of the higher frequency of such trips. These factors demonstrate the excellent capacity factor maintained in U.S. plants compared with Japanese plants.

Keywords Pressurized Water Reactors, Capacity factor, Days required for refueling, Automatic trip, Manual trip, Maintenance during operation

1. はじめに

原子力安全システム研究所では、継続的に海外の原子力発電所の不具合情報を入手し、その情報で述べられている内容から得られる教訓の中で、国内の原子力発電所（主に加圧水型炉：以下 PWR とする）で対策を必要とする項目がないか分析し、必要により提言を行うと共に、入手した不具合情報の傾向と推移等を分析して、機器の保全の一助となるべき活動を実施している^{(1)~(3)}。

最近の米国の原子力発電所では、1基当りの年間の平均自動トリップ率が0.423回、手動トリップ率が0.878回とわが国の1基当りの年間の自動トリップ率が0.033回、手動トリップ率が0.293回に比べて高いにもかかわらずプラント平均設備利用率はわ

が国の79.3%と比べて90.1%と格段に高い^{(4)~(8)}。

2002年のDavis Besse 発電所（PWR Babcock and Wilcox Co (B&W 社) 製の原子炉圧力容器上蓋損傷トラブル以降、米国の原子力発電所では大きなトラブルもなく、非常に良好な運転状態を維持しており、発電所の停止や負荷制限に至る要因とその復旧実績を詳細に調査・分析することは、わが国の原子力発電所の設備利用率向上に対しても大いに参考となるものと考えられる。なお、これまでに、「原子力発電所のパフォーマンス比較と改善への提言」⁽⁹⁾により、日本原子力発電技術協会から提言されているが、本研究では原子炉出力が定格出力を割ったすべての状況などの詳細な内容をプラント毎に調査した。

わが国を始め世界各国で運転されている軽水型発電所には、Westinghouse Electric Corp (W 社) 等

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 客員研究員

が開発した加圧水型 (Pressurized Water Reactor: PWR) と General Electric Company (GE 社) 等が開発した沸騰水型 (Boling Water Reactor:BWR) があるが、今回はプラント運用状態がよく把握できる PWR の運転状況を対象とした。

2. 米国 PWR 発電所の運転状況

2.1 調査対象の発電所

米国の商用原子力発電所の各プラントは、1985 年 3 月 3 日に事故停止していた Browns Ferry1 号機 (GE 社製 BWR 1155MWe, 3293MWt) が 2007 年 5 月 23 日に運転を再開したことにより現在 104 基が営業運転している。図 1 にその製造メーカー別の割合を示す。なお、今回の調査はその内で全 PWR プラント 69 基を対象とした。図 1 の B&W と CE はそれぞれ Babcock and Wilcox 社と Combustion Engineering 社の略である。

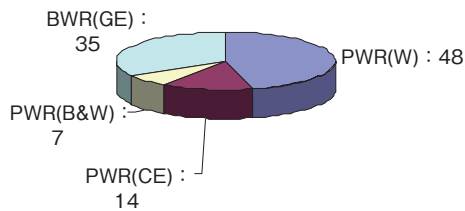


図 1 米国の原子力発電所 (基数)

2.2 利用率

米国 PWR プラントの設備利用率は、2003 年から 2006 年までの 4 年間は参考文献(6)により、2007 年の利用率は参考文献(7)によって集約した。

図 2 に 2003 年から 2007 年の 5 年間の全プラントの平均設備利用率の推移、図 3 に米国 PWR プラント全体とメーカー別平均とわが国の PWR プラントの平均設備利用率の推移を示すが、平均稼働率は 90.1%と 90%を超えており、製造メーカー別でも W 社製:91.3%、CE 社製:87.3%、B&W 社製:88.2%と大差はなく、最高設備利用率 97.4%のプラントは Braidwood 2 号機 (W 社製) で年間の平均停止日数は 10 日にも満たなく、次いで Byron 2 号機 (W 社製)、TMI 1 号機 (B&W 社製)、Braidwood 1 号機 (W 社製)、Calvert Cliffs 1 号機 (CE 社製)、Byron

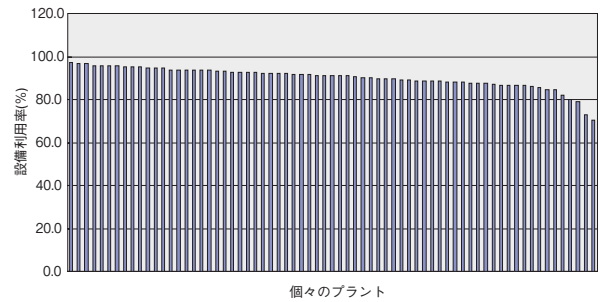


図 2 2003 年～2007 年米国 PWR プラント別平均設備利用率

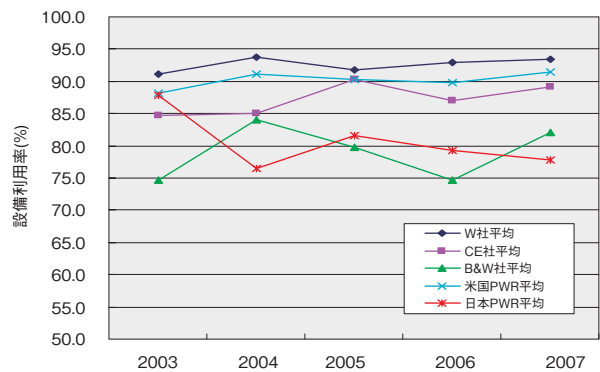


図 3 設備利用率の推移

1 号機 (W 社製)、Prairie Island 2 号機 (W 社製)、Indian Point 2 号機 (W 社製)、Vogtle 1 号機 (W 社製)、Robinson 2 号機 (W 社製) と 95%を超えているプラントが 10 もある。

一方、平均設備利用率の最も悪いプラントは、Davis Besse 1 号機 (B&W 社製) の 70.2%であるが、これは 2002 年の原子炉压力容器上蓋の損傷による影響で 2003 年度中停止していたことの影響であり、2003 年度を除いた平均設備利用率は 87.6%である。

また、平均設備利用率が 80%以下のプラントは Palo Verde 1,3 号機 (CE 社製)、Kewaunee 1 号機 (W 社製) の 4 プラントだけであり、全体的には高設備利用率で運転している。

わが国の PWR プラントの 2003 年～2007 年の 5 年間平均設備利用率は PWR 平均で 80.6%、最高プラントは関西電力高浜 1 号機で 87.9%、最低プラントは関西電力美浜 3 号機で 44.8%である。なお、美浜 3 号機は 2004 年 8 月 9 日に 2 次系配管破損事故があり、それ以来 2007 年 1 月 11 日まで運転停止していたので設備利用率は極端に低い。

2.3 燃料取替所要日数

以降のデータは米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission :NRC) がウェブサイト毎日公開している Power Reactor Status Report⁽⁴⁾記載の午前4時から午前8時(東部時間)までの原子炉出力と原子炉出力欠損時の状況をベースにして、個々の事象ごとに NRC 公表の Event Notification Report⁽⁵⁾, Licensee Event Report (LER) および米国の Institute of Nuclear Power Operations (INPO) 情報を基に調査を実施した。

わが国では、法律に基づく運転期間制限(原子炉の場合13ヶ月以内)と規制当局の定期的な機能確認検査(定期検査)があって、燃料取替はこの期間に実施している。一方、米国では、運転期間制限や規制当局の定期検査はなく、事業者が連邦規則の保守規則(10 CFR 50.65)に基づいて計画した保全計画により、プラントが停止しているときにのみ実施できる検査を燃料取替時に実施しており、規制当局は、

その実施状況を監視プロセス検査(Reactor Oversight Process :ROP 検査)等で確認している。

従って、米国の燃料取替とわが国の定検では設備の規制と運用が異なって単純比較できないが、わが国で、運転中点検、機器の予備品化等の運用改善や規制サイドの運用変更を考える場合には重要である。

米国プラントの燃料取替毎所要日数の全プラント5年間の平均は43.0日で、最も短い発電所はBraidwood-2の17.0日、次いでBraidwood-1の19.8日、Byron-2の24.3日、Comanche Peak-2の24.7日であった。最も長い発電所は、原子炉容器上蓋損傷で2003年の1年間を停止していたDavis Besse-1で128.5日、次いでFt Calhoun-1で72.3日、San Onofre-3の70.0日であり、半数のプラントが図4のとおり40日以下であり、2003年~2007年までに大きな変化は見られない。

一方、わが国の定検の所要日数は、電気出力ベースであり米国の原子炉出力ベースと異なるが、2003年度~2006年度の4年平均で、美浜3号機事故や大

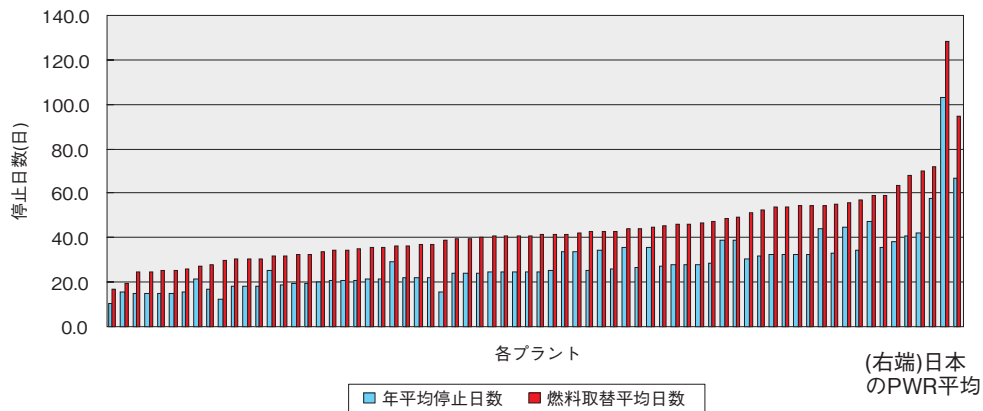


図4 2003年~2007年の燃料取替平均所要日数

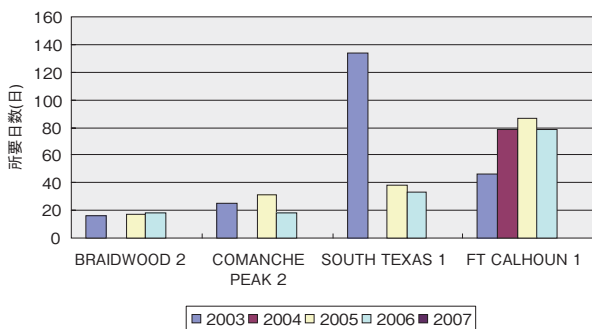


図5 米国PWRプラント毎の燃料取替日数

飯3号機原子炉上蓋損傷の影響もあり、94.8日/回と米国の2倍を越えている。

また、燃料取替所要日数が短いプラントであるBraidwood-2は、5年間で実施した3回の燃料取替はいずれも20日未満であり、通常の燃料取替が短い。その他のプラントは3回の内1回は25~31日程度の比較的長い燃料取替を実施している。

燃料取替所要日数が長いプラントは、図5に示すようにSouth Texas-1で燃料取替期間中に見つかった原子炉容器炉内核計装用管台損傷の影響による100日を越える極端に長い燃料取替がある場合や、

Ft Calhoun-1 のように通常的に燃料取替が長いプラントもあることが分かった。

2.4 自動トリップ

米国 PWR プラントの5年間の原子炉自動トリップ回数は146回、プラント1基当りの平均トリップ率は0.423回/プラント・年で、図6に示すように2003年から2005年にかけて減少し、その後横ばい状態といえる。一方、わが国 PWR プラントの自動トリップは2003年～2007年で3回だけで非常に少ない⁽⁸⁾。

自動トリップ後の復旧（原子炉起動まで）所要日数は図7に示すように1日以内が1/3強であり、3日以内が70%以上で、全体として非常に早く復旧している。一方、国内 PWR プラントの自動停止後の復旧は、美浜3号機事故トリップの873日が飛び抜けて長く、残りの2回は、4日と5日で復旧している。

また、自動トリップ事象を事象別に分類すると1番多い事象は蒸気発生器（Steam Generator :SG）水位低トリップで33回、次いで、タービントリップで28回、発電機トリップで20回、1次冷却材ポンプ（Reactor Coolant Pump :RCP）トリップで14回となっている⁽⁸⁾。この外にSG水位高が5回などSG給水、主蒸気に関するものが10回あり、SG関係合計で43回と4割弱を占めている。

更に、トリップに至った原因機器を調査したところ、発電機が17件と一番多く、続いて、給水制御弁で16件、原子炉保護系で15件、給水制御系で15件、タービンで15件、送電系で11件と続く。ここでも安全関連機器でない機器の影響による事象を含むSG関係事象が多く、給水制御弁とその制御系で

31件を占めており、そのほかにも2次系ポンプトリップによる自動トリップも10回ある。図8と図9に各々の状況を示す。なお、事象別、原因機器別の復旧所要日数はSG水位低トリップ33回の内、2日以内での復旧が29回とほぼ2日以内で起動しており、更にこの内の原因機器がSG水位制御弁とその水位制御系では18回中17回が2日以内に起動している。

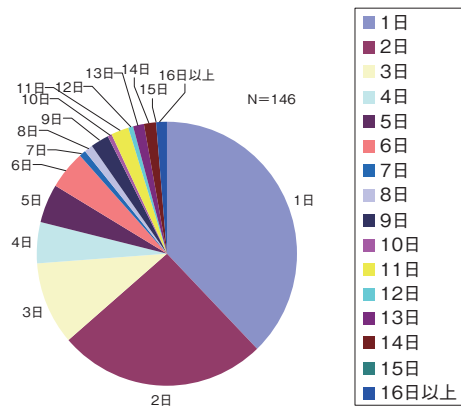


図7 米国 PWR 自動トリップ後の復旧日数

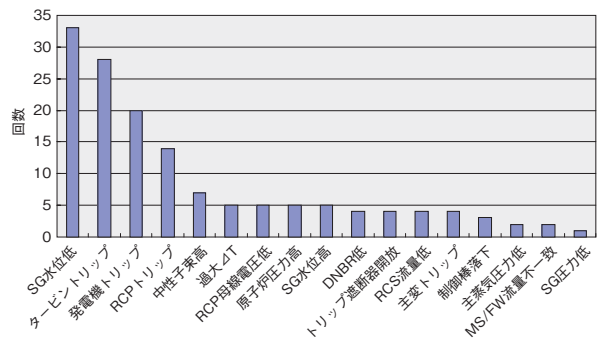


図8 米国 PWR 自動トリップ事象一覧

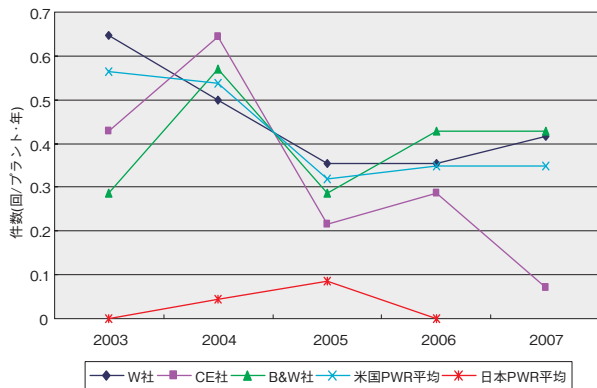


図6 自動トリップ回数の推移

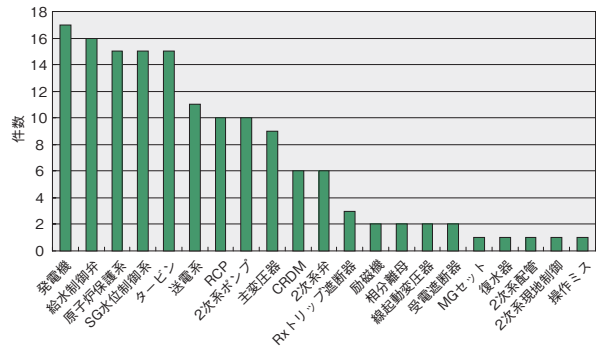


図9 米国 PWR 自動トリップ原因別機器一覧

2.5 手動トリップ

米国のPWRプラントで計画的に実施される補修停止、Technical Specification (TS)の規定による停止および運転継続に支障をきたす等により、運転中原子炉を停止する手動トリップは5年間で303回発生しており、プラント1基当たりの平均トリップ率は0.878回/プラント・年で、その状況を図10に示す。自動トリップの場合は年毎に大きな変化はないといえるが、手動トリップの場合は年間で見ればPWR全体でも、製造メーカ別でも、2倍-半分の変化がありその傾向に特徴はない。

一方、わが国の2003年～2007年の手動トリップは27回あり、平均は0.293回/プラント・年で、米国PWRプラントの1/3しかない⁽⁸⁾。

米国PWRプラントの原子炉手動トリップ後の復旧(原子炉起動)所要日数は図11に示すように1日以内が20%強で、3日以内で50%を越え、自動トリップと比べると長いが、短時間で復旧している。

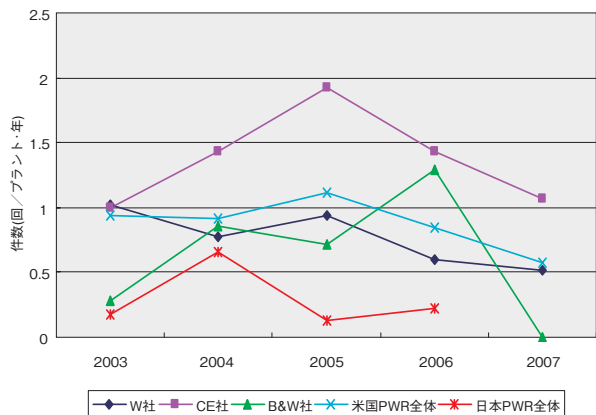


図10 手動トリップ件数の推移

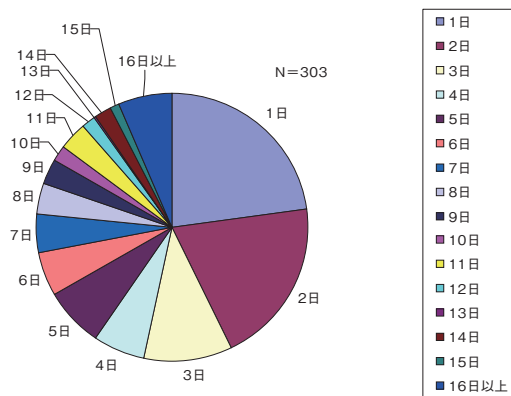


図11 米国PWR手動トリップ後の復旧日数別割合

一方、わが国PWRプラントの復旧所要日数は、1日から107日と幅が広く、3日以内の復旧は27回中4回に過ぎず、2週間以内の復旧が半数程度である。

米国においては、プラントで機器の補修が必要となり、停止してもほとんどの場合2週間で復旧していることから、異常があれば直ぐに補修して復旧する早目の対応が実施されている。

また、原子炉を停止することが必要となった事象を要因別に分類してみると図12に示すように最も多い要因は、プラント機器に何らかの損傷がある補修要求が143件で、これらが全体のほぼ半分を占め、次いで、TSの規定に基づく停止が44件、給水喪失が15件、SG水位低が14件、RCS漏えいが10件と続いている。

また、プラント停止を必要とした機器は、図13に示すように、取水口機器から制御棒まで幅広く、2次系ポンプや発電機等の非安全系機器の多さが目立つ。図13で最も多い機器不明は、早急にプラントを停止する必要のない案件で計画保全停止を実施したと考えられ、機器名や状況等の詳細な情報のない件数である。

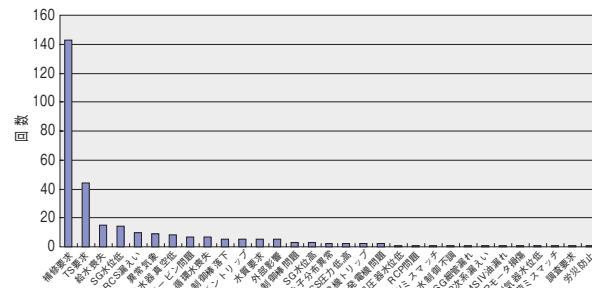


図12 米国PWRプラント手動トリップ要因一覧

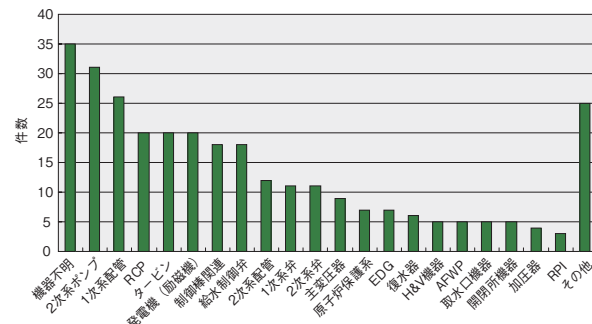


図13 米国PWR手動トリップ原因別機器一覧

2.6 原子炉出力制限に至った運転中機器補修

NRCは、ウェブサイト上で毎日各プラントの原子炉出力を公表して、100%出力でない場合には理由、状況や法律に基づく事象番号を記載しているの、各発電所の状況がある程度把握できる。そこで、こうした状況から運転中機器補修状況を整理したものを図14に示す。原子炉を停止せずに出力を下げて、原子炉運転中に機器の補修を行った件数は5年間で730回記録されており、補修機器としては制御棒駆動装置関連機器、核計装機器、1次系および2次系計装機器から復水器、給水ポンプなどの2次系ポンプや発電機など多岐にわたっている。最も多い補修機器は復水器で101回、次いで、給水ポンプで92回、タービンで79回実施されている。この傾向は、2003年から2007年で特別な変動は見られていない。

わが国のPWRプラントでは、2003年～2006年度の4年間で電気出力を低下させた補修が10回だけ見られ、その内訳は復水器5回、取水口と循環水系各1回と2次系配管の3回あるだけで、米国と比べると極めて少ない⁽⁸⁾。

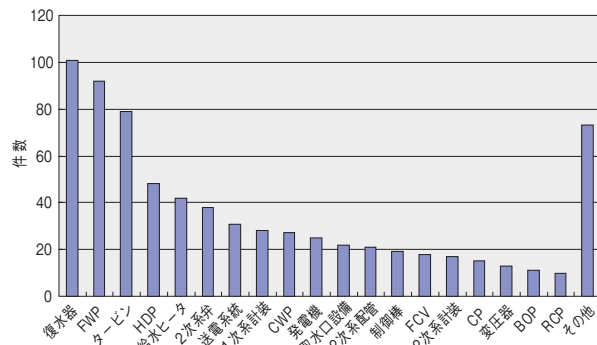


図14 米国PWR運転中に出力低減に至った機器一覧

3. まとめ

本報は、2003年から2007年5年間の米国PWR型原子力発電所の運転状況について、自動トリップ率や手動トリップ率がわが国と比べて高いにもかかわらず、高設備利用率を維持している要因について調査を行ったものである。これによって判明した主なことは以下の2点である。

(1) 燃料取替停止期間が非常に短い。

米国PWRプラントの燃料取替の原子炉停止期間は、全プラント5年間の平均で43日であり、日本の場合(2003年から2006年の平均で95日(発電機の停止日数))の半分以下であり、これは規制法規の違いや発電所運用方針の違いによるものと考えられる。

(2) 自動トリップ、手動トリップ後の復旧が非常に早い。

米国PWRプラントのプラント1基当たりの年間自動トリップ率はわが国の10倍程度あり、プラント1基当たりの年間手動トリップ率もわが国の3倍弱と多いが、それらの復旧所要日数は自動トリップの場合には、3日以内の原子炉運転開始が70%を越え、手動トリップの場合は、自動トリップの場合よりは長くなるものの、3日以内の原子炉起動が半分を超え、わが国の復旧所要日数より大幅に短い。

以上のように、米国とわが国では、定期検査の有無以外は法体系に大きな差異はないが、このように設備利用率として大差が出てくるのは、米国の場合は法規制どおりの運用がなされているのに対し、わが国では法規制を遵守した上で、国民世論を受け、より安全側に発電所を運用するという日米の国情の違いが大きく影響しているものと考えられる。

文献

- (1) 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の傾向分析 (2003年)” INSS JOURNAL, Vol.11, p.79, (2004).
- (2) 宮崎孝正, 佐藤正啓, 高川健一, 伏見康之, 島田宏樹, 日本原子力学会 “2005年春の年会”, B21, (2005).
- (3) 宮崎孝正, 西岡弘雅, 佐藤正啓, 千葉吾郎, 高川健一, 島田宏樹, “海外原子力発電所における不具合の傾向分析 (2004年)” INSS JOURNAL, Vol.12, p.82, (2005).
- (4) NRC Current Power Reactor Status Report, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/reactor-status/ps.html>. (2008.7.1)
- (5) NRC Event Notification Report, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/en.html>. (2008.7.1)
- (6) NRC NUREG-1350, Vol. 19 「2007-2008 In-

formation Digest」.

- (7) The McGraw-Hill Companies, Nucleonics Week Vol. 49 / Number 7 /Feb. 14, 2008.
- (8) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報, 平成 19 年度版 (平成 18 年度実績)”.
- (9) 百々 隆, “原子力発電所のパフォーマンス比較と改善への提言”, 日本原子力技術協会, 平成 19 年 3 月 9 日