

米国原子力発電所の運転認可更新 の不具合抑制への寄与の評価

Evaluation of the Contribution of License Renewal of Nuclear Power Plants to Fault Reduction in the U.S.

千葉 吾郎 (Goro Chiba)*

要約 米国の原子力発電所では、当初認可された運転期間は40年であったが、これまでに多くの発電所が運転認可更新により運転期間を20年延長している。一方、我が国の原子力発電所は、長期運転を想定した高経年化対策を行っており、電力会社は、運転開始30年に達する前およびその後10年毎に高経年化技術評価等報告書を作成し、国の評価を受けることとしている。本報では、原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）の海外原子力発電所不具合データベースを用いた傾向分析を行い、対象とされる経年劣化プログラムの状況を調査するとともに、運転認可更新申請の有無が機器等の経年劣化の抑制管理に及ぼす影響について、分析評価を行った。経年劣化プログラム適用状況調査からは、疲労、FAC、閉サイクル冷却系の損傷が多くを占めていることが明らかになった。また、ユニット毎の不具合件数を分析した結果、運転認可更新申請により発電所の経年劣化による不具合の件数が減少傾向になることがわかった。このことにより、米国の認可更新制度が発電所の高経年化対応に有効に機能しているものと考えられ、厳密には異なるが実質的には同等の制度を運用している我が国の高経年化対策の有効性を示唆するものである。

キーワード 原子力発電所、運転認可更新、高経年化対策、傾向分析

Abstract Although nuclear power plants in the U.S. were originally permitted to operate for 40 years, operating periods of many plants have been extended by license renewal for another 20 years. On the other hand, plant life management of nuclear power plants in Japan is carried out assuming long-term operation, and the licensee submits aging technology assessment reports before the plant has been operating commercially for 30 years, and then every ten years thereafter, and receives an evaluation by the authorities. In this paper, trend analysis using the INSS database on faults at nuclear power plants overseas, state of implementation of relevant aging management programs, and the effects of license renewal on preservation activities are examined. It is shown that the aging management program identified that many of the cases of fatigue, FAC, and a closed cycle cooling system have been addressed. As a result of analyzing the fault number for each unit, the number of aging faults tends to decrease after applying for license renewal. Therefore, the U.S. license renewal system is considered to be effective for plant life management, and hence the plant life management in Japan, which is substantially equivalent to the U.S. system, is valid.

Keywords nuclear power plant, license renewal, plant life management, trend analysis

1. はじめに

米国の運転中の原子力発電所において、合計104基中49基が運転開始以降30年を超えている（2008年5月末現在）。米国では、原子力発電所の運転認可期間を当初40年とし、運転認可更新により運転期間を最長20年延長することが可能である。

また、我が国においては、合計55基の原子力発電所のうち14基が運転開始以降30年を超えている

（2008年5月末現在）。我が国では、運転開始以降30年経過するまでに、60年間の運転を想定した高経年化評価を行い、以後10年毎に最新の知見等を踏まえた再評価を実施する必要がある。

1991年に米国原子力規制委員会（NRC）は、運転認可更新に対する安全要件を定めてパイロットプラントへ適用し、その結果を踏まえて規則（10 CFR 54）⁽¹⁾を制改定するとともに、申請と審査を効率的に行うための規制指針（Reg. Guide 1.188）⁽²⁾、標

* (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)

準審査計画 (SRP-LR) (3), 経年劣化知見報告書 (GALL 報告書) (4) を発行した。2000 年 3 月に, まず第一に Calvert Cliffs 1, 2 号機の運転の更新が認可され, その後これまでに表 1 に示すように 48 基 (PWR 32 基, BWR 16 基) が運転認可更新を受け, 17 基が審査中となっている。

前報(5)では, 米国の運転認可更新の状況と, 発電所の申請書や NRC の報告書等を調査し, 我が国の高経年化対策との比較検討を行った。また, INSS が入手した不具合情報に基づき, 2006 年の海外の経

年劣化に係る不具合が 260 件あり, うち 173 件が米国であることを示したうえで, 2006 年中の米国の発電所における運転認可更新申請の有無が機器等の経年劣化に及ぼす影響について, 分析評価を行った。

米国 NRC の経年劣化知見報告書 (GALL 報告書; NUREG-1801, Rev.1) では, 機械設備関係で 39 種, 電気設備関係で 6 種, 構築物関係で 8 種の標準的な経年劣化管理プログラム (AMP) を設定している。運転認可更新では機器・構築物を損傷メカニズムに細分し, AMP 適用の妥当性を評価していると

表 1 米国の原子力発電所運転認可更新の申請, 認可の状況

(2008 年 5 月末現在)

プラント名	炉型	申請年月日	認可年月日
Calvert Cliffs 1, 2 号機	CE-PWR	1998 年 4 月 10 日	2000 年 3 月 23 日
Oconee Nuclear Station 1, 2, 3 号機	B&W-PWR	1998 年 7 月 7 日	2000 年 5 月 23 日
Arkansas Nuclear One 1 号機	CE-PWR	2000 年 2 月 1 日	2001 年 6 月 20 日
Edwin I. Hatch Nuclear Plant 1, 2 号機	BWR	2000 年 3 月 1 日	2002 年 1 月 15 日
Turkey Point Nuclear Plant 3, 4 号機	WH-PWR	2000 年 9 月 11 日	2002 年 6 月 6 日
North Anna 1, 2 号機, Surry 1, 2 号機	WH-PWR	2001 年 5 月 29 日	2003 年 3 月 20 日
Peach Bottom 2, 3 号機	BWR	2001 年 7 月 2 日	2003 年 5 月 7 日
St. Lucie, Units 1, 2 号機	CE-PWR	2001 年 11 月 30 日	2003 年 10 月 2 日
Fort Calhoun Station 1 号機	CE-PWR	2002 年 1 月 11 日	2003 年 11 月 4 日
McGuire 1, 2 号機, Catawba 1, 2 号機	WH-PWR	2001 年 6 月 14 日	2003 年 12 月 5 日
H.B. Robinson Nuclear Plant 2 号機	WH-PWR	2002 年 6 月 17 日	2004 年 4 月 19 日
R.E. Ginna Nuclear Power Plant 1 号機	WH-PWR	2002 年 8 月 1 日	2004 年 5 月 19 日
V.C. Summer Nuclear Station 1 号機	WH-PWR	2002 年 8 月 6 日	2004 年 4 月 23 日
Dresden 2, 3 号機, Quad Cities 1, 2 号機	BWR	2003 年 1 月 3 日	2004 年 10 月 28 日
Farley 1, 2 号機	WH-PWR	2003 年 9 月 15 日	2005 年 5 月 12 日
Arkansas Nuclear One 2 号機	B&W-PWR	2003 年 10 月 15 日	2005 年 6 月 30 日
D.C. Cook 1, 2 号機	WH-PWR	2003 年 10 月 31 日	2005 年 8 月 30 日
Millstone 2, 3 号機	WH-PWR	2004 年 1 月 22 日	2005 年 11 月 28 日
Point Beach 1, 2 号機	WH-PWR	2004 年 2 月 26 日	2005 年 12 月 22 日
Browns Ferry 1, 2, 3 号機	BWR	2004 年 1 月 6 日	2006 年 5 月 4 日
Brunswick 1, 2 号機	BWR	2004 年 10 月 18 日	2006 年 6 月 26 日
Nine Mile Point 1, 2 号機	BWR	2004 年 5 月 27 日	2006 年 10 月 31 日
Monticello	BWR	2005 年 3 月 24 日	2006 年 11 月 8 日
Palisades	CE-PWR	2005 年 3 月 31 日	2007 年 1 月 17 日
Oyster Creek	BWR	2005 年 7 月 22 日	
Pilgrim 1 号機	BWR	2006 年 1 月 27 日	
Vermont Yankee	BWR	2006 年 1 月 27 日	
James A. FitzPatrick	BWR	2006 年 8 月 1 日	
Susquehanna 1, 2 号機	BWR	2006 年 9 月 15 日	
Wolf Creek	WH-PWR	2006 年 10 月 4 日	
Harris	WH-PWR	2006 年 11 月 16 日	
Indian Point 2, 3 号機	WH-PWR	2007 年 4 月 30 日	
Vogtle 1, 2 号機	WH-PWR	2007 年 7 月 29 日	
Beaver Valley 1, 2 号機	WH-PWR	2007 年 8 月 28 日	
Three Mile Island 1 号機	WH-PWR	2008 年 1 月 8 日	
Prairie Island 1, 2 号機	WH-PWR	2008 年 4 月 15 日	

ともに、事業者はAMPを管理要領書に展開し、抜けなく検査、保全を行っている。本稿では、米国の経年劣化不具合発生状況を評価するために、不具合のAMP対象要因毎の分類と傾向分析を行った。次に、運転認可更新制度の有効性を再確認するため、前報で1年間だった不具合データ抽出の期間を5年間に拡張し、損傷モード毎、ユニット毎に、認可更新申請前後の不具合発生状況を比較検討した。また、我が国の高経年化対策の有効性について考察を行った。

2. 経年劣化プログラム (AMP) の傾向分析

INSSでは、海外の不具合情報を分析し、PWRを保有する電力会社に対して提言活動を行っており(6)、その流れを図1に示す。

今回の分析に使用したデータベース(DB)には、米国の原子力規制委員会(NRC)と、原子力発電運転協会(INPO)、世界原子力発電事業者協会(WANO)などから入手した情報を蓄積している。2007年には1年間で約3,200件の情報をDBに入力している。

前報において、INSSのDBから抽出した2006年の米国の経年劣化事象173件について、運転認可更新の対象設備の不具合と、非対象設備の不具合に分け、米国事業者のAMP要因で分類した。その結果を図2に示す。運転認可更新の対象設備の不具合は73件で、動的機器等の理由により運転認可更新非対象設備の不具合が100件あった。

運転認可更新対象の73件について、図3に抜き出す。この図から、疲労損傷(19%)、FAC(16%)、閉サイクル冷却水系(10%)でほぼ半分を占めていることがわかる。残りの約半分については、多様な

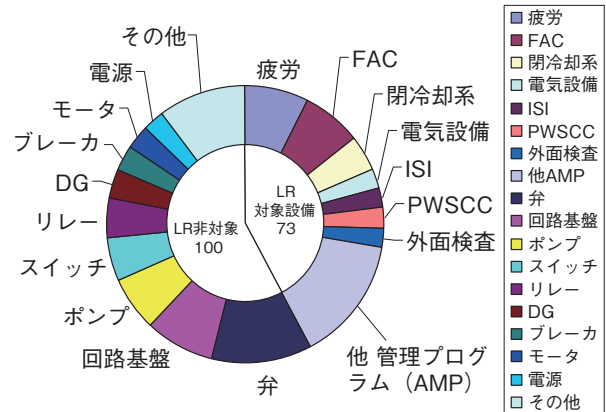


図2 米国の原子力発電所経年劣化事象の発生状況 (2006年, LR: 運転認可更新)

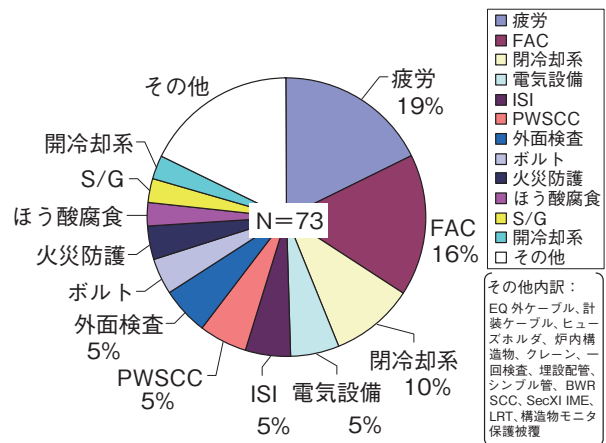


図3 米国の原子力発電所における管理プログラム別の経年劣化不具合発生状況 (2006年)

AMP対象の不具合が数件ずつ発生していて、高経年化対応の対象を広い範囲とすることの必要性和有効性を示すものであると考える。

3. 米国の運転認可更新の不具合傾向からの分析

3.1 米国の運転認可更新と経年劣化事象発生傾向の分析

米国の認可更新を受けたユニットは48基、申請・受理され、審査中のユニットが17基、未申請のユニットは39基である(2008年5月末現在)。前報では、INSSで2006年に入手した経年劣化情報を用い、これら運転中ユニット104基を、申請済・認可済のグループと未申請のグループとに分け、両者間において近年の不具合発生傾向に違いがあるのかど

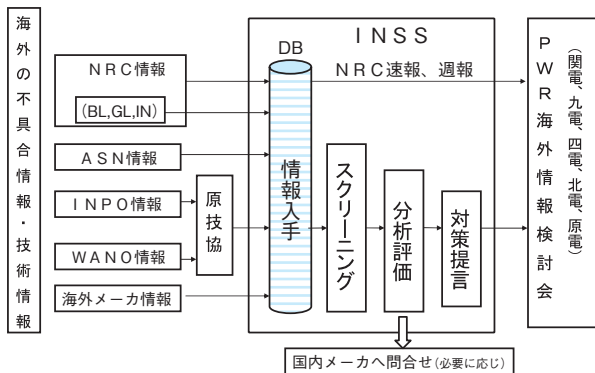


図1 INSSにおける海外情報分析の流れ

うかを分析した。その結果を図4に再掲する。この図で、あるユニットの1年間の不具合件数と、運転経過年数との相関は、申請済グループにはないが、未申請グループにはあることがわかる。

ここでは、この傾向の有意性を再確認するため、不具合データ抽出の対象を過去5年間(2003~2007年)に拡張し、同様の分析を行った。横軸をユニットの運転開始年とし、縦軸をユニット毎/年度毎の経年劣化不具合発生件数としてプロットした結果を図5に示す。ここで、F分布関数による検定を行った。その結果、認可更新申請済のデータの場合、F分布関数表から、自由度250の場合、危険率5%と1%の数値はそれぞれ3.90と6.80であり、計算により求めた分散比1.74はいずれよりも小さいので、発生件数は経過年数の影響を受けないと判断できる。

一方、認可更新未申請のデータの場合、同様に自由度250で、計算によって求めた分散比は4.53で、危険率5%の数値3.90よりも大きい。従って、未申請ユニットについては、経年劣化事象が経過年数と

共に多くなる傾向のあることが推定される。

この傾向は、前報⁽⁵⁾と同様であり、米国の運転認可更新の制度が、発電所の保守管理に有効に機能していると考えられる。

3.2 疲労とFACの発生傾向の分析

次に、損傷モード毎の影響を評価した。図2から頻度の高い損傷モードとして「疲労」と「FAC」を選定し、それぞれに、ユニット毎の不具合発生件数(5年分の年平均)をプロットした。2003~2007年に発生した経年劣化不具合のうち、米国の運転認可更新で時限経年劣化解析(TLAA)の対象とされる静的機器の疲労に係る83件の不具合を抽出し、ユニット毎の5年間の発生件数の年平均値をプロットした結果を図6に示す。

申請済では1970年代前半に運転を開始したユニット、一方未申請では1980年代後半に運転を開始したユニットで、発生件数の多いものが見受けられるが、

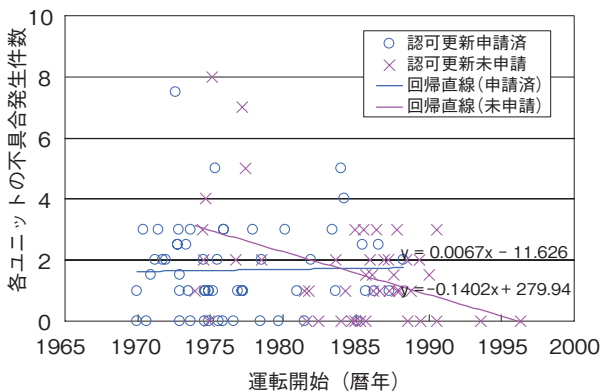


図4 経年劣化不具合の経年別発生件数(2006年)
(前報⁽⁵⁾の結果を再掲)

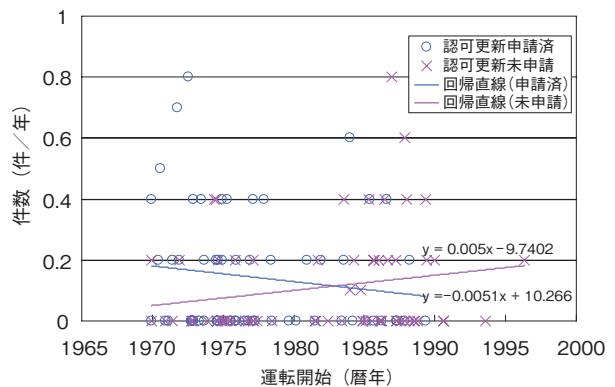


図6 ユニット毎の疲労損傷発生件数

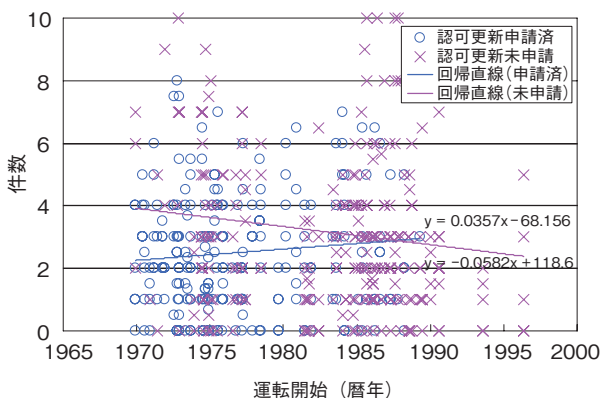


図5 経年劣化不具合の経年別発生件数
(2003~2007年の5年分)

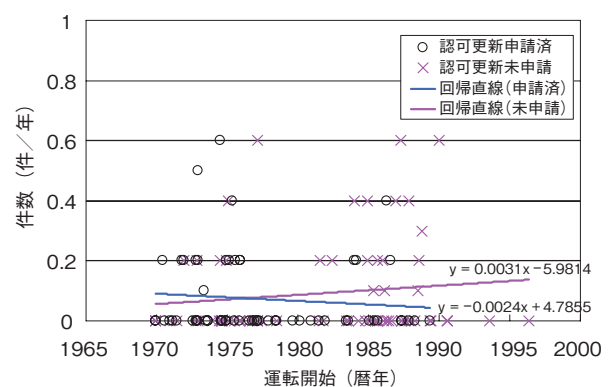


図7 ユニット毎のFAC報告件数

F 分布検定の結果、不具合発生件数は認可更新の有無やユニットの高経年化に係わらない、ばらつきの範囲内と判断された。

このことは、次のように解釈できる。すなわち、機器構造物の疲労は、設計の段階で振動や熱による加振力を選定し、支持設計と計画的な検査により発生防止が図られている。また、運転認可更新における TLAA 評価は、重要な機器について 20 年間の運転期間延長により健全性に影響のないことを確認するものである。一方、静的機器の疲労損傷は、設計、運用、保守の不具合によるものが多い。したがって、運転認可更新による抑制効果は少ないものと考えられる。

「FAC」について 55 件の不具合を抽出し、同様の検討を行った。結果を図 7 に示す。FAC についても、発生件数は認可更新の申請やユニットの高経年化の影響は認められなかった。このことは、以下の現状を考えれば妥当な結果と考えられる。FAC は、NRC の Generic Letter 89-01 等を受けて、既に全米の原子力発電事業者が FAC 管理プログラムを設定し、それに従い検査部位の抽出、検査、監視、補修等を行っている。また、運転認可更新では、FAC 管理プログラムの範囲等の妥当性を確認している。一方、事業者は EPRI の CHECWORKS ソフトウェア等により、抜けのない管理を行ってきた。

3.3 ユニット毎の経年劣化不具合発生傾向の分析

2003~2007 年の経年劣化不具合データに基づき、ユニット毎の評価を行った。横軸を運転開始時期、縦軸を不具合発生件数とし、米国の全 104 ユニットについて、認可更新申請済と未申請に分けたそれぞれの不具合件数の年平均値を色分けをしてグラフを作成した。結果を図 8 に示す。

F 分布関数による検定の結果、認可更新申請済のデータの場合、分散比が 0.87 (< 4.0) となり、発生件数は経過年数の影響を受けない。また、認可更新未申請のデータの場合、分散比が 3.21 (< 4.0) となり、図では線形補間曲線が勾配を持っているが統計的には有意なものではない。

表 2 図 8 に示した特異な経年劣化事象発生件数の 2 ユニットの年別経年劣化不具合発生件数

	2003	2004	2005	2006	2007
ユニット A	14	7	11	5	6
ユニット B	13	7	10	3	1

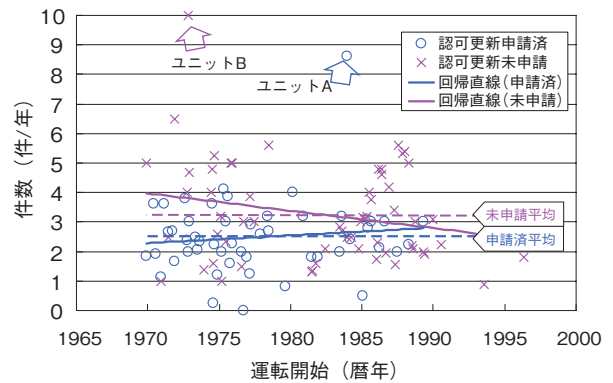


図 8 ユニット毎の経年劣化事象発生件数 (ユニット A と B は特異な件数)

また、平均の件数については、認可更新申請済のデータが 2.47、認可更新未申請のデータでは 3.26 であり、未申請のユニットの方が経年劣化不具合の発生件数が多いことがわかった。

ユニット毎に整理した場合、申請済データでユニット A (PWR)、未申請データでユニット B (BWR) の 2 つの特異点が認められた。各々の年毎の不具合発生件数を表 2 に示す。

ユニット A は、5 年間で 43 件の経年劣化に起因する不具合が報告されている。そのうち、原子炉自動トリップが 3 回、手動トリップが 2 回報告されている。米国原子力発電所の 7000 運転時間当たりの計画外自動トリップ回数は 0.31 回 (2006 年) (7) であり、経年劣化不具合に起因するトリップ回数はさらに低いものと考えられるが、ユニット A の自動トリップ回数は平均的なユニットよりもはるかに多い。米国では発電所の監視プロセス (ROP) が運用され、NRC は検査結果により問題の重要度を評価し規制活動を行っている。ユニット A についても、発電所のパフォーマンス向上のための活動が継続的に行われている。

ユニット B は、2006 年 1 月に運転認可更新が申請され、それまでの 3 年間で 10 件/年の経年劣化不具合が報告された。申請後の 2 年間については、不具合は 2 件/年に減少しており、その要因のひとつとして、認可更新の制度が寄与しているものとする。

表 3 運転認可更新申請前後の経年劣化不具合の分散分析による検定結果

グループ	平均	分散	分散比 F ₀	F 境界値	
				α = 5%	α = 1%
申請前	3.36	4.65	11.5	4.02	7.15
申請後	1.82	0.90			

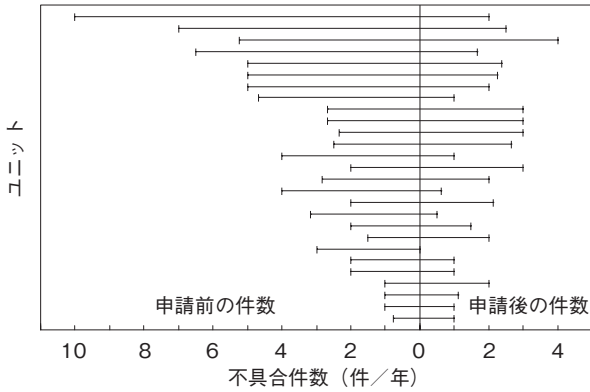


図9 認可更新申請前後の不具合発生件数の比較

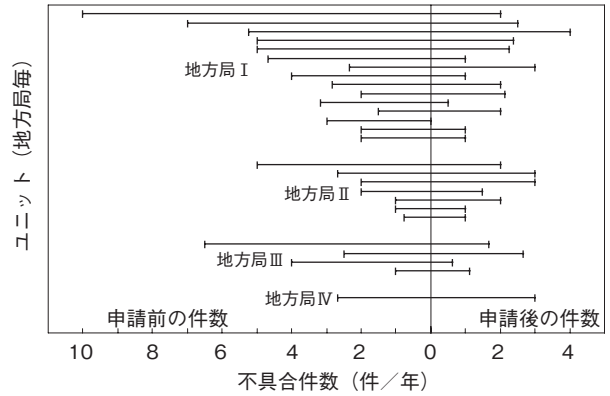


図11 認可更新申請前後の不具合発生件数の比較（地方局毎）

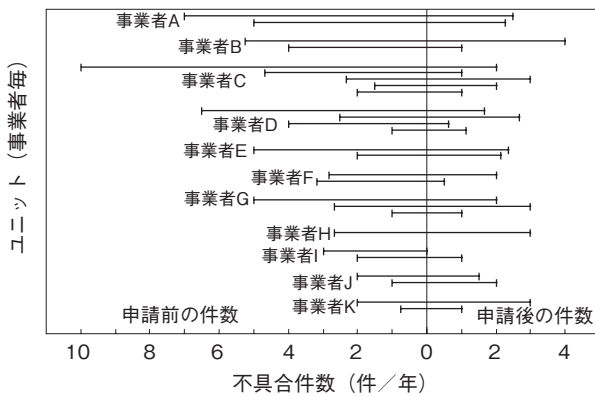


図10 認可更新申請前後の不具合発生件数の比較（事業者毎）

なお、ユニット B は、5 年間で経年劣化に起因する原子炉トリップは報告されていない。

ユニット B が申請後に不具合件数が減少したことに着目し、他のユニットの申請前後の不具合発生傾向の変化について比較検討した。今回不具合データの評価を行った 2003～2007 年の期間中に運転認可更新を申請したユニットが 27 基（2007.5 まで運転休止の Browns Ferry 1 号機を除く）あり、横軸に各ユニットの運転認可更新申請前の 1 年当たりの不具合発生件数を左側、申請後の件数を右側に示し、縦軸には申請前後の合計件数の長さの順に並べ、棒グラフを作成した。結果を図 9 に示す。

申請前後のデータを分散分析により検定した。結果を表 3 に示す。申請前には経年劣化不具合が多く発生し、ユニットによって報告件数は大きくばらついていた。申請後は、件数の平均は 3.36 が 1.82 に、分散も 4.65 から 0.90 に大きく減少している。

申請前後の検定結果では、グループ間の比較の計算により得られた分散比 F_0 は 11.5 であり、F 分布関数における危険率 $\alpha = 5\%$ と 1% の境界値 4.02 と

7.15 のいずれよりも大きく、両グループ間に有意な差があることが示された。

以上の検討から、運転認可更新を申請したユニットは、不具合の発生が抑制され、不具合発生件数の発電所間のばらつきが減少し、発電所の高経年化管理に係る品質が向上してきているものと考えられる。

2003～2007 年の期間中に運転認可申請されたユニット 27 基の運転者（事業者）は 11 社あり、事業者間の不具合件数のばらつきを評価した。申請前後の不具合件数を事業者毎にまとめ、図 10 に示す。分散分析による検定の結果、事業者間の分散比 F_0 は、申請の前（0.73）と後（0.83）のいずれの場合も F 境界値未満であり、事業者間の不具合発生件数は、ばらつきの範囲内であることが示された。

認可更新申請の過程において、各事業者は保全計画を具体化し、そのことが発電所の高経年化への対応に有効に機能し、不具合発生の抑制に寄与しているものと考えられる。

NRC は、米国内を北東部（Ⅰ）、南東部（Ⅱ）、中部北地域（Ⅲ）、西部地域（Ⅳ）の 4 つの地域に分け、それぞれに地方局を置き、発電所の検査等を管轄している。ここで、地方局毎の不具合件数のばらつきを評価した。図 11 に、申請前後の不具合件数を地方局毎にまとめて示す。地方局Ⅰのユニットが全体の半分以上を占め、地方局Ⅳのユニットは 1 基のみとなっているが、これは、特定の期間に着目した結果による偏りで、偶然のものであると考える。

分散分析による検定の結果、4 つの地方局間の分散比 F_0 は、申請の前（1.36）と後（0.66）のいずれの場合も F 境界値未満であり、地方局間の不具合発生件数は、ばらつきの範囲内であることが示された。

米国の認可更新制度では、発電所の高経年化対策

が、事業者の経年変化管理プログラムで網羅されていることの確認を行っている。一方、我が国においても細分化された機器・構造物に対して検査、評価、保守方法に抜けのないことの確認を行っており、今回の米国の分析結果は我が国の高経年化対策の有効性を期待させるものである。

4. まとめ

海外不具合情報から経年劣化不具合の傾向分析を行い、米国における運転認可更新の効果について評価し、以下のような結論を得た。

- (1) 2006年に入手した米国の経年劣化不具合データを経年劣化管理プログラム（AMP）毎に分類し、分析した。その結果、疲労損傷とFAC、閉サイクル冷却水系ではほぼ半分を占めていることがわかった。
- (2) 運転認可更新の申請有無による不具合発生状況の分析から、米国では認可更新の制度が、発電所の保守管理に有効に機能していると考えられた。
- (3) 経年劣化不具合データのうち、疲労とFACについての検討を行い、これら不具合の発生は、ユニットの高経年化とは関係しないことがわかった。
- (4) ユニット毎の不具合件数の分析の結果、認可更新申請により経年劣化不具合は減少する傾向があり、このことから認可申請の制度により不具合が抑制されたものと考えられた。
- (5) 我が国においては、実質的に米国と同等の高経年化対策の制度を運用していることから、今回の米国の分析結果は、我が国の高経年化対策の有効性を示唆するものである。

Nuclear Power Plants”, USNRC, (2005).

- (4) NUREG-1801 Rev. 1, “Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report”, USNRC, (2005).
- (5) 千葉吾郎, 「米国原子力発電所における運転認可更新に関する分析」, INSS JOURNAL, Vol. 14, p.337 (2007).
- (6) 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事象の傾向分析 (2004年)」, INSS JOURNAL, Vol.12, p.82 (2005).
- (7) 原子力安全基盤機構 (JNES), 「国外のトラブル情報」, <http://www2.jnes.go.jp/atom-db/jp/trouble/kaigai.html>, (2008.5 確認).

文献

- (1) 10CFR Part 54, “Requirements for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants”, 米国連邦規則, (1995).
- (2) Regulatory Guide 1.188 Rev. 1, “Standard Format and Content for Application to Renew Nuclear Power Plant Operating Licenses”, USNRC, (2005).
- (3) NUREG-1800 Rev. 1, “Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for