

米国原子力発電所の異常事象報告書（LER）に関する傾向分析

Analysis of License Event Reports at U.S. Nuclear Power Plants

永山 統啓 (Munehiro Nagayama) *1

要約 海外原子力発電所で発生した事故・故障には、わが国の原子力発電所の安全性や安定運転の向上に参考となる事象がある。原子力安全システム研究所では、米国を中心に欧州、アジアを含む海外の事故・故障情報を入手して分析評価し、類似の不具合事象が国内の加圧水型軽水炉（PWR）発電所で発生することを防止するための改善提言を行ってきた。

本稿では、米国原子力発電所の異常事象報告（LER：License Event Report）を用いて傾向分析を行った結果を紹介する。この傾向分析は、機械、電気、計装、発電の職能毎に不具合の原因および影響を分析した。また、安全に影響を与える要因と考えられる内部火災および外部事象について分析した。

キーワード 海外原子力発電所, 異常事象報告, 傾向分析, 内部火災, 外部事象

Abstract Incidents that occur at overseas nuclear power plants (NPPs) include events that can be used as references for improving the safety and stable operation of NPPs in Japan. We have obtained information on incidents in other countries, analyzed and evaluated them, and have proposed recommendations to prevent similar events from occurring at domestic NPPs. This paper introduces the results of trend analysis using license event reports (LERs) of US NPPs. This trend analysis shows influence and cause of the incidents by cutting to each division of machinery, electricity, instrumentation, and operation. We also analyzed internal fires and external events among the LERs that are thought to be major factors that affect safety of NPPs.

Keywords nuclear power plant, license event report, incident, trend analysis, internal fire, external event

1. はじめに

原子力安全システム研究所では、米国を中心に欧州、アジアを含む海外の事故・故障情報を入手して分析評価し、類似の不具合事象が国内のPWR発電所で発生することを防止するための改善提言を行ってきた。

これら個別の事故・故障情報の分析に加えて、傾向分析を活用することにより、更に有効な教訓を引き出すことができる可能性がある。傾向分析に用いる情報ソースは、①公開情報であること、②国内の商用原子力発電所と型式（PWRおよびBWR）が同じであること、③記載内容が充実していることから、米国原子力発電所の異常事象報告（LER）を採用した。

本稿では、LERの概要分析としてプラント運転への影響、安全機能への影響、発電所要員への労働

安全的な影響、職能（発電所の課や係の単位）別に分類した。更に、機械、電気、計装、発電の4職能別に傾向分析を行った。また、安全に影響する重要な要因である火災および外部事象についても傾向分析を行った。

2. LERとは

LERは、米国連邦規則10CFR50.73 “License event report system”に定める報告基準に基づき事業者から米国原子規制委員会（NRC）に提出される異常事象報告である。

以下に報告基準の例を示す。

- ・技術仕様書（T-spec）要求による発電停止
- ・安全障壁の劣化
- ・安全に脅威を与える外部事象（自然現象）
- ・手動／自動装置の作動（補助給水など）

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

- ・安全機能（原子炉停止，崩壊熱除去，放射性物質放出抑制，事故緩和）の喪失
- ・計画外の放射性物質の放出
- ・発電所の安全対策要員の傷害

LERには，事象概要，対象設備（ヒューマンエラー起因の事象は作業や操作），影響度，原因，対策などが記載されているのでこれらの情報を活用した。

3. LERの概要分析

(1) 対象としたLERとLER件数の推移

a. 対象としたLER

2010年から2018年の2779件のデータを対象とした。

b. LER件数の推移

LER件数の推移を図1に示す。単年あたり概ね300件前後で推移しているが，最近はやや減少傾向にある。これは，米国での発電停止事象の減少⁽¹⁾と傾向が一致することから，リスクインフォームド規制導入の成果とも考えられる。

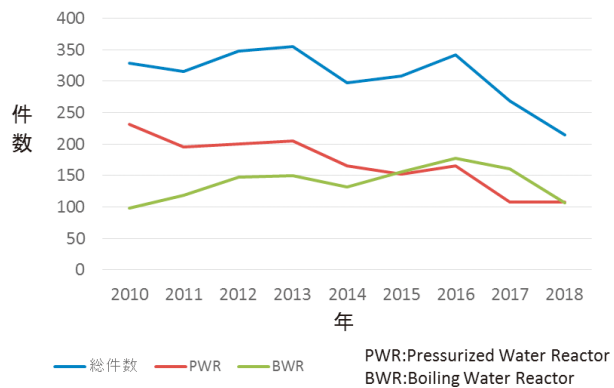


図1 LER件数の年別推移

(2) プラント運転への影響

原子力発電所を安全に運転するには，安定的なプラント状態を維持することが重要である。これに影響を与える事象を図2に分類した。手動停止(11%)，自動トリップ(11%)，出力変動(1%)，ECCS作動(0.7%)，内部火災(0.4%)，影響なし(76%)であった。なお，ECCS作動は，ほとんどが誤作動である。

(3) 安全機能への影響

原子力発電所の安全機能を確保するためには，

N=2779

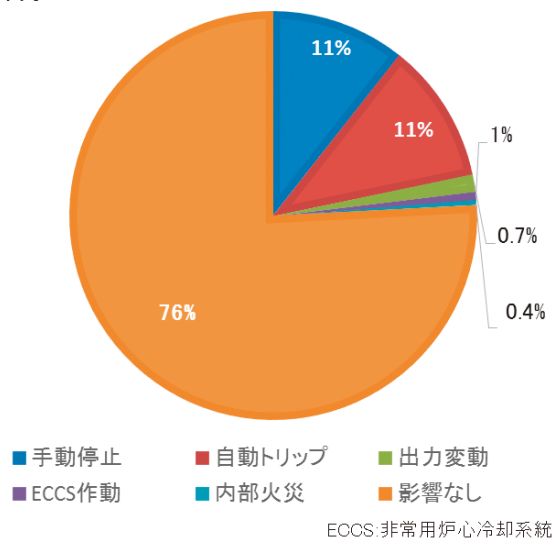


図2 プラント運転への影響

T-Specに規定される運転制限条件(LCO)を遵守する必要がある。

例えば，ポンプの場合は，冗長系を含めた運転可能台数，性能確認試験の頻度や結果をLCOとして定めている。これを逸脱した場合には，所定の措置(完了時間内に回復させるかプラント停止)が要求される。この要求を果たせない場合に代替措置(またはNRCの裁定措置)の実行に拘わらず，T-Spec違反とカウントしている。

図3にT-Specへの影響を分類した。T-Spec措置(32%)，T-Spec違反(29%)，不明(4%)，影響なし(35%)であったLERの61%が，T-Specに影響する事象であった。そのうち，T-Spec違反が29%と多数あるが，その内訳として，逸脱状態に長期間気づかなかつた事象，構成管理の問題，冗長設備の誤作業，作業完了時間の超過を確認した。

T-Specに定める所定の措置を採った件数，違反した件数は，間接的に安全性を示す指標となると考えられるが，より明確に影響を確認するためには，確率論的安全評価(PRA)を活用した評価が有効である。

米国では，PRAを活用した分析が進んでおり，事業者およびNRC双方において意思決定のための補助的なツールとして活用されている。NRCの事故前兆事象(ASP)プログラムでは，個別のLERに対して条件付き炉心損傷確率(CCDP)や炉心損傷確率増分(ΔCDP)を評価しているため本稿の傾向分析の条件出しのため参考にした2018年のASP年次報告書⁽²⁾によると2010年から2012年にCCDP

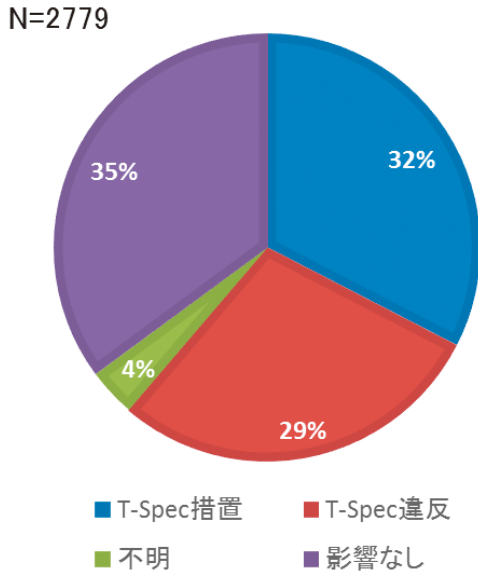


図3 T-Specへの影響

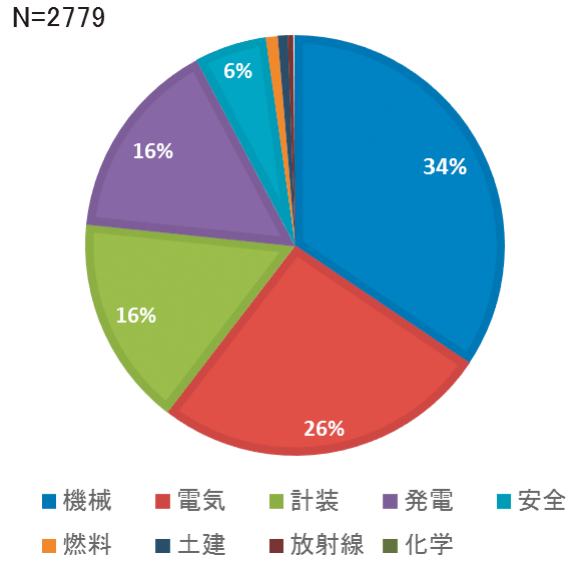


図4 職業別件数

(ΔCDP) が 10^{-4} を超える高リスク事象7件を特定している。詳細は、省略するが、これら高リスク事象は、火災および外部事象が多く関わっているので、内部火災事象と外部事象（含む外部火災）についても分析の条件に加えることにした。

なお、ASP年次報告書⁽²⁾⁽³⁾によると米国での高リスク事象は2013年以降発生していない。また、前兆事象（潜在的に原子力安全に影響を与え得る事象）についても年々低下し、2019年のASP年次報告書⁽³⁾では、最大のCCDP（ΔCDP）は、 10^{-6} オーダーまで低下している。この評価では福島第一発電所事故以降に導入された安全設備（FLEX）による事象緩和が担保されているものもあった。

(4) 発電所要員への労働安全的な影響

発電所要員への労働安全的な影響については、死亡1件、被ばく2件、不明6件、影響なし2770件であった。死亡1件は、重量物吊り上げ作業時の落下事故であった。被ばく2件は、緊急補修作業に伴う被ばく量増加、中央制御室気密境界からの空気流入（居住性評価に関する事象で実際の被ばくはない）であった。

(5) 職能別件数

図4に職能別件数を示す。機械（34%）、電気（26%）、計装（16%）、発電（16%）の4職能が92%を占めた。この傾向は、過去のINSS分析⁽⁴⁾⁽⁵⁾と同様である。

4. 職能別分析

職能別に異常事象の大部分を占める機械、電気、計装、発電の4職能別に分析した。

さらに保守部門（機械、電気、計装）の発生原因のうち比較的割合の大きな保守不良について要因を細分化した。

4.1 機械

(1) 発生原因別分類

機械に関する発生原因別分類を図5に示す。

機械 N=957

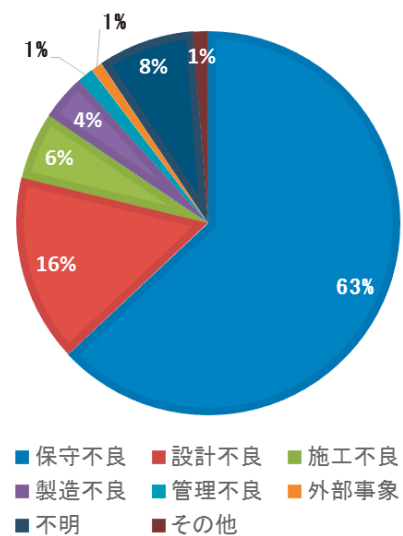


図5 発生原因別分類（機械）

保守不良 (63%), 設計不良 (16%), 施工不良 (6%), 製造不良 (4%), 管理不良 (1%), 外部事象 (1%) に分類できる。

(2) 保守不良の要因

発生原因のうち最も多い保守不良の要因は、図6に示すように計画不良 (57%), 作業者過誤 (25%), 周辺状況不良 (13%), その他 (5%) に分類できる。以下にその内容を示す。

a. 計画不良

計画不良の要因として、点検計画の不足、点検項目の不足があげられる。

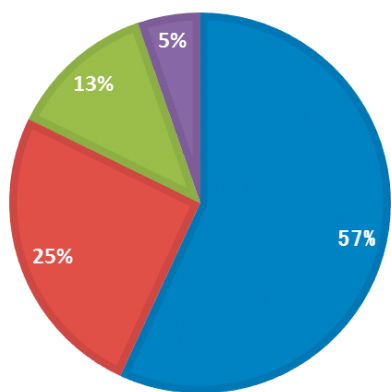
b. 作業者過誤

作業者過誤については、知識・技量不足、作業要領の確認不足、周辺機器への配慮不足、作業監督不足が要因としてあげられる。

c. 周辺状況不良

周辺状況不良とは、不適切な作業指示、作業内容の検討不足、作業準備不足である。

機械 保守不良 N=603



■ 計画不良 ■ 作業者過誤 ■ 周辺状況不良 ■ その他

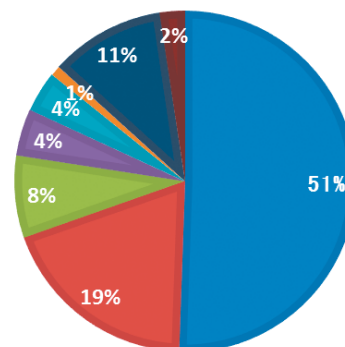
図6 保守不良の要因別分類 (機械)

4.2 電気

(1) 発生原因別分類

電気に関する事象の発生原因は、図7に示すように保守不良 (51%), 設計不良 (19%), 製造不良 (8%), 施工不良 (4%), 外部事象 (4%), 管理不良 (1%) に分類でき、電源系に影響することから外部事象の割合が他に比べて大きい。

電気 N=722



■ 保守不良 ■ 設計不良 ■ 製造不良 ■ 施工不良 ■ 外部事象 ■ 管理不良 ■ 不明 ■ その他

図7 発生原因別分類 (電気)

(2) 保守不良の要因

発生原因のうち最も多い保守不良の要因は、図8に示すように計画不良 (59%), 作業者過誤 (32%), 周辺状況不良 (5%), その他 (4%) に分類でき、以下にその内容を示す。

a. 計画不良

計画不良の内容は、点検計画の不足、点検項目の不足があげられる。

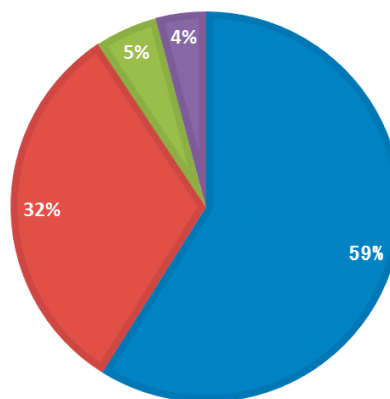
b. 作業者過誤

作業者過誤の内容は、知識・技量不足、誤配線、作業対象誤り、その他確認誤りである。

c. 周辺状況不良

周辺状況不良とは、不適切な作業指示、作業内容の検討不足、作業準備不足である。

電気 保守不良 N=365



■ 計画不良 ■ 作業者過誤 ■ 周辺状況不良 ■ その他

図8 保守不良の要因別分類 (電気)

4.3 計装

(1) 発生原因別分類

計装に関する事象の発生原因は、図9に示すとおり保守不良(62%),設計不良(13%),製造不良(8%),施工不良(2%),管理不良(1%),外部事象(0%)に分類できる。

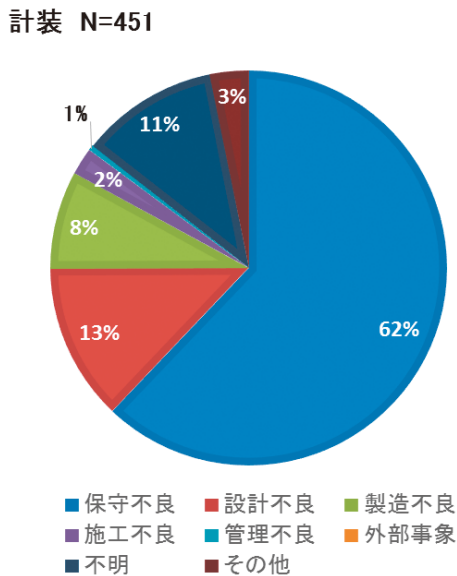


図9 発生原因別分類 (計装)

(2) 保守不良の要因

発生原因のうち最も多い保守不良の要因は、図10に示すように計画不良(57%),作業者過誤(31%),周辺状況不良(6%),その他(6%)に分類でき、以下にその内容を示す。

a. 計画不良

計画不良の内容は、点検計画の不足、定期交換計画の不足、点検項目の不足があげられる。

b. 作業者過誤

作業者過誤の内容は、知識・技量不足、作業対象誤り、誤接触、その他確認誤りである。

c. 周辺状況不良

周辺状況不良の内容は、不適切な作業指示、作業内容の検討不足、作業準備不足である。

計装 保守不良 N=280

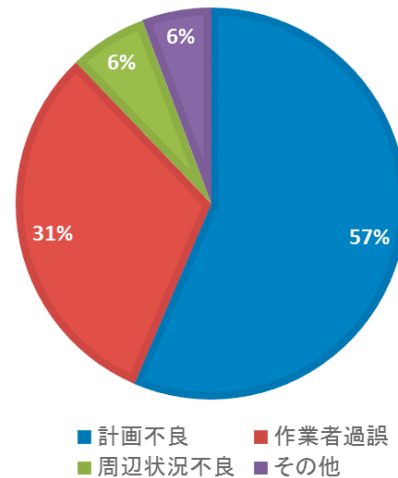


図10 保守不良の要因別分類 (計装)

a. 操作者過誤

操作者過誤の内容は、知識・技量不足、対象誤り、操作未完/欠落、逆操作、確認不足、コミュニケーション不足があげられる。

b. 計画不良

計画不良の内容は、操作手順の不足、操作ステップの欠落、他部門との調整不足である。

c. 周辺状況不良

周辺状況不良の内容は、発電所独自の慣習、技術的な関与不足、監視ツールの不足、作業基本事項の周知不足、リスクへの感受性不足、特殊事象の説明不足があげられる。

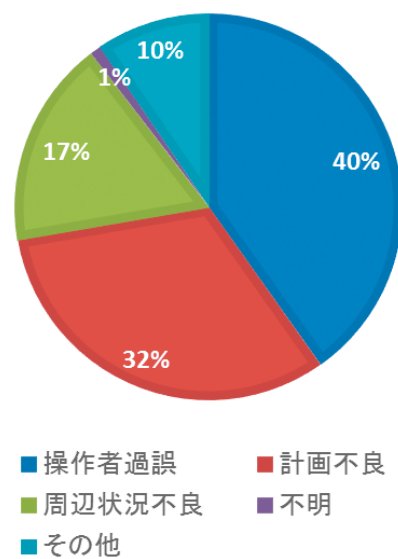


図11 発生原因別分類 (発電)

4.4 発電

発電に関する事象の発生原因は、図11に示すとおり操作者過誤(40%),計画不良(32%),周辺状況不良(17%),不明(1%),その他(10%)に分類できる。

5. 重要要因の分析

5.1 内部火災

内部火災に関連する事象が10件抽出され、表1に概要を示す。これらのうち、8件が電気関係であった。高圧電源（主変圧器、高圧ケーブル）に関する火災2件は、発電停止に至っている。また、中央制御室内の小規模火災が2件発生しているが、これはコンデンサや抵抗などの電子部品を含む部品の定期交換計画がなく長期間使用したことが原因と推測される。

5.2 外部事象

(1) 外部事象の要因

図12にトラブルの要因となった外部事象を示す。外部事象全68件の内訳は、強風（41%）、雷雨（16%）、着氷（10%）、小動物（9%）、高水温（6%）、デブリ侵入（6%）、竜巻（3%）であり、吹雪、洪水、外部火災、地震、津波、系統擾乱は、各々1件を確認した。

電気設備については、悪天候だけでなく、小動物が影響した事象が6件（9%）あることが特徴的である。

(2) 外部事象によるプラントへの影響

外部事象がプラントに与えた影響は、図13に示すように自動トリップ（19%）、手動停止（7%）、出力低下（6%）、EDG起動（22%）、影響なし（46%）であった。

外部事象 N=68

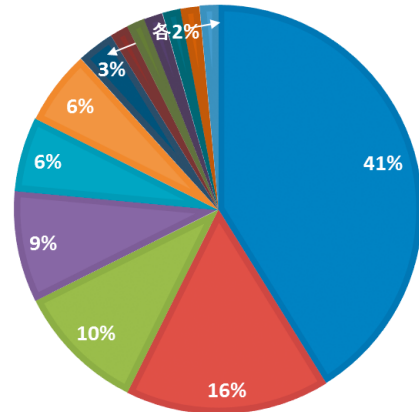
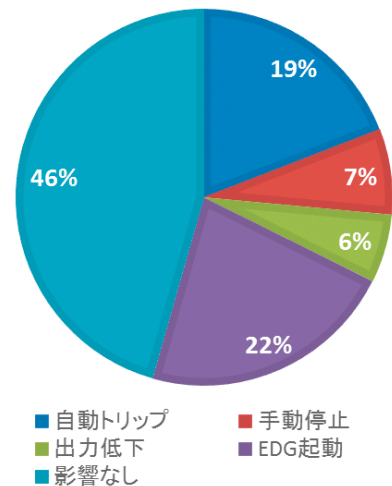


図12 外部事象の内訳

外部事象 N=68



EDG: 非常用ディーゼル発電機

図13 外部事象によるプラントへの影響

表1 内部火災関連事象

設備	部位	概要
主変圧器	中性点	主変圧器中性点ブッシングが破損し、水素火災、プラント手動停止
開閉所	CT	変流器（CT）の初期故障による発火
遮断器	内部部品	設計変更時の検証不足により交換品のフィンガーが当初よりも長くなり接触不良が生じ発熱し発火
直流モータ	モータ巻き線	磁界が弱く過大な電流が流れ短絡し発火
高圧ケーブル	起動変圧器	遮断器キュービクルへのケーブル接続不良により短絡し発火、プラント手動停止
ケーブル	ケーブル曲部	割れが生じていたケーブル曲げ部に漏えい蒸気が暴露し短絡し発火
中央制御室電源ユニット	コンデンサ	予防保全計画がなく経年劣化して短絡し発火
中央制御室カード	抵抗	水位警報回路のカードの抵抗が発火
記載なし	記載なし	タービン建屋内火災
防火区画境界	逆止弁	防火区画境界のドレンライン逆止弁を取り外し（火災ではなく評価上の問題）

外部事象は、自動トリップに至る割合が大きく、手動停止も含めると26%が発電停止に至る事象であった。

(3) 外部事象による設備への影響

外部事象が、設備に与えた影響は、図14に示すように送電系（35%）、建屋（28%）、変圧器（16%）、冷却水系（16%）、開閉器（3%）であり、

- ・電源系（送電系、変圧器、開閉器）への影響が半数以上あったが、T-Spec違反に至った事象はなかった。
- ・建屋への影響は、建築物が物理的な障害を受けたものではなく、強風や気圧の急変などにより、建屋内の負圧維持または外気取り込みに影響した事象であった。
- ・冷却水系への影響は、水温の上昇や取水口へのデブリの侵入により最終ヒートシンクに影響した事象であるが、T-Spec違反に至った事象はなかった。

外部事象 N=68

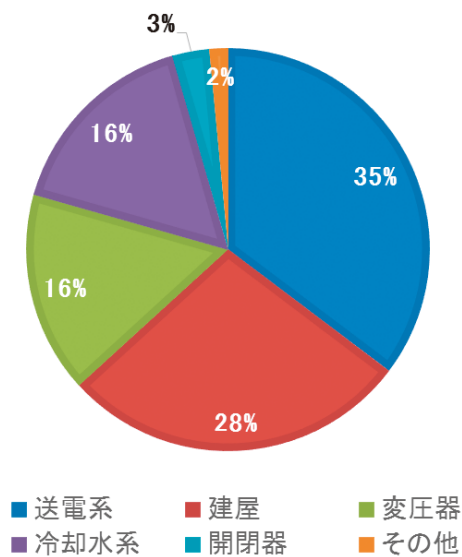


図14 外部事象による設備への影響

6. まとめ

米国のLER（2010-2018）を用いて傾向分析を行った結果を以下に説明する。

- ①保守部門（機械、電気、計装）に関する事象の原因は、「保守不良」が過半数を占め、その中でも「計画不良」、「作業者過誤」の割合が多かった。この傾向は、過去の傾向分析（4）（5）と同じで

ある。

- ②発電部門に関係する事象の原因は、「操作者過誤」が半数近く、続いて「計画不良」が多い。この傾向は、過去の傾向分析（4）（5）と同じである。
- ③内部火災10件を確認し、設備、部位、概要を整理した。10件中8件が電気設備であった。高圧電源に関係する火災は、発電停止に至っている。また、中央制御室内での発火事象を2件確認した。
- ④外部事象の主な要因として、悪天候ならびに小動物が影響した事象を確認した。これら外部事象は、電源系または最終ヒートシンクに影響を与えたが、発電所外への影響やT-Spec違反はなかった。

7. 傾向分析から得られた教訓

LER事象の主な発生原因を職能毎に傾向分析した。また、安全に影響を与える要因と考えられる、内部火災および外部事象を分析した。その結果から、以下の教訓を検討した。

- ①保守部門（機械、電気、計装）に関連するトラブルの発生原因のうち、比較的割合の大きな保守不良（「計画不良」、「作業者過誤」）に対して以下の教訓が考えられる。
 - a. 合理的で一貫性のある基準のもとで保守計画（点検対象、保全方式、項目、頻度など）を策定し、理解した上で作業を計画する。
 - b. 定めた保守計画に必要なリソースを確実にする。
 - c. 作業技量の確認、作業対象の確認、作業ステップの確認を確実にする方策を検討する。
- ②発電部門に関連するトラブルの発生原因のうち、比較的割合の大きな「操作者過誤」、「計画不良」に対して以下の教訓が考えられる。
 - a. 操作技量の確認、操作対象の確認、操作ステップの確認を確実にする方策を検討する。
 - b. 目的に応じた操作要領であることを確実にする方策を検討する。
 - c. 操作に必要なリソースを確実にする。
- ③内部火災（電気設備）に対して以下の教訓が考えられる。
 - a. 火災の発生経験がある電気設備に対して、状態変化の監視が可能な診断技術の採用を検討する。

- b. 火災の発生経験がある電気設備に対して、寿命を評価し、定期的な交換の可能性を検討する.
- ④小動物が電気設備に影響を与える可能性を排除する.

文献

- (1) NUREG-1350, Volume 31, "NRC Information Digest", USNRC, (2019).
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission Accident Sequence Precursor Program 2018 Annual Report, USNRC, (2019).
- (3) U.S. Nuclear Regulatory Commission Accident Sequence Precursor Program 2019 Annual Report, USNRC, (2020).
- (4) 宮崎孝正他, 「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).
- (5) 宮崎孝正他, 「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.12, p.82, (2005).