

# 米国原子力発電所における運転中保守(オンラインメンテナンス)の実施プロセスおよび不具合についての調査・分析

## Research and Analysis of On-line Maintenance Process and Problems at United States Nuclear Power Plants

小寺 良雄 (Yoshio Kodera)\*<sup>1</sup>

**要約** 国内において運転中保守の適用拡大に向けた検討が進んでいることから、運転中保守実施時の教訓を抽出するため、米国の Licensee Event Report (LER) から運転中保守の実施に伴う不具合を抽出し、その発生状況、原因等について分析した。運転中保守の実施に伴い発生した不具合には、原子炉停止に至った事象、技術仕様書 (T-Spec) に関連する事象の発生割合が多く、それらの発生原因としては、保守計画不良が多い。また、米国の原子力発電所における運転中保守の実施プロセスについて調査を行い、作業計画、リスク管理プロセスについて分析を行った。運転中保守の実施に当たっては、作業の実施によるリスクを把握、管理することが重要であり、そのためには、作業計画プロセスおよびリスク管理プロセスを確立することが必要である。

**キーワード** 運転中保守, オンラインメンテナンス, 作業計画, リスク管理, 原子力発電所

**Abstract** Studies on promoting on-line maintenance applications are in progress in Japan. To learn lessons for the implementation of on-line maintenance, troubles associated with the implementation of on-line maintenance were extracted from US Licensee Event Reports (LER) and analyzed in view of their situations, causes, etc. Many of the trouble events which happened during the implementation of on-line maintenance led to nuclear reactor shutdown and violation of Technical Specification (T-Spec), which are mainly caused by poor maintenance plans. Moreover, implementation processes of on-line maintenance at US nuclear power plants were investigated in this study, and work planning and risk management processes were analyzed. It is important to recognize and manage the risks of on-line maintenance and, for this reason, it is required to establish work planning and risk management processes.

**Keywords** on-line maintenance, work planning, risk management, nuclear power plants

### 1. はじめに

米国においては、プラントの運転中に設備の保守作業を行う運転中保守が広く行われており、停止期間の短縮による設備利用率の向上等に寄与している。国内においても、運転中保守の適用拡大に向けた検討が進んでおり<sup>(1)</sup>、運転制限条件 (LCO: Limiting Condition of Operation, 原子炉を安全に運転するために、原子炉の運転状態に応じて遵守すべき条件を予め定めている) の対象機器に関して、単一システムに限定した許容待機除外時間 (AOT: Allowed Outage Time, LCO を逸脱した場合に、その状態に応じて要求される措置を実施するために許容される時

間) の範囲内の計画的な保守であれば、一定の要件を保安規定や保守計画に反映することで運転中保守の実施が可能となる見込みである。

今後、事業者サイドとしても発電所において運転中保守を実施、拡大していくための諸条件の整備を行っていく必要があるが、多重防護の一角を一時的にせよ弱める行為であり、導入に際しての課題を明確にして対応を検討していく必要がある。

本調査では、米国原子力発電所における運転中保守の実施状況を調査するとともに、運転中保守実施に伴い発生した不具合事象の発生傾向を分析して、国内における運転中保守実施時に課題となる事項を抽出することを目的とする。

\* 1 元(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)

## 2. 運転中保守実施に伴う不具合事象の分析

### 2.1 分析対象とその抽出

原子力安全システム研究所で構築している原子力情報データベースに登録された Licensee Event Report (LER) (2)の中から2005年から2009年の間に発生した不具合事象1499件を調査し、運転中保守実施に伴い発生した不具合事象141件を抽出した。ただし、運転中に顕在化していなかった不具合が、運転中保守の実施中に点検の結果として発見された事象については分析対象には含めないこととする。また、運転中保守とは、プラントが運転中（タービン発電機を送電系統に接続した状態）において実施される保守作業で、計画保守（予防保全等）、修理、試験・校正等の作業を含む。

### 2.2 運転中保守実施に伴う不具合事象の発生傾向の分析結果

抽出した不具合について、保守作業の種類、プラントに与えた影響、不具合の発生原因、発生時期、対象設備、発生年により分類を行い、その傾向を分析するとともに、発生した事象の特徴から発生パターンの類型化を行った。

#### 2.2.1 保守作業の種類

抽出した不具合事象について、対象となった保守作業の種類を分類した結果を図1に示す。不具合事象を起こした保守作業としては、予防保全等の計画保守、試験・校正のための作業によるものが多い。

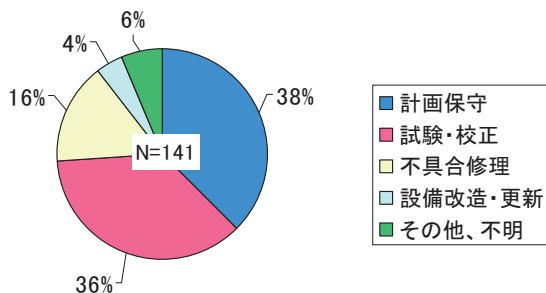


図1 不具合事象を起こした保守作業の種類による分類

#### 2.2.2 プラントに与えた影響

プラントへ与えた影響を分類した結果を図2に示す。プラントへの影響としては、原子炉が停止した事象、技術仕様書（T-Spec：Technical Specification）のLCOに関連した事象が多い。その他では、主要機器が誤動作、停止となった事象等がある。このようなプラントへの影響は、運転中保守実施に伴うリスクであり、国内における運転中保守の実施においても、不具合の発生リスクとして認識が必要なものである。ただし、今回調査を行ったLERは、その報告基準によりプラントの安全上重要な事象のみが対象となっていることから、その基準に該当しないような不具合等、抽出されていないプラントへの影響もあると考えられる。

抽出した不具合の中で原子炉停止事象についての詳細分類を図3に示す。自動停止によるものが多く、また、手動停止の中では、T-SpecのLCOを逸脱して作業中にAOT内で作業が完了しないことから原子炉を停止した事象が約1/3含まれる。このような原子炉停止事象は、国内では一旦停止すると再起動までに長期間を要する等、米国に比較して影響が大きいことから、発生を防止するための対策について十分な検討が必要である。

次に、T-Specに関連した事象に関してその内容の詳細分類を図4に示す。これには「作業中のLCO逸脱」および「LCO逸脱作業中の更なる逸脱」が多い。「作業中のLCO逸脱」は、LCO逸脱を計画して

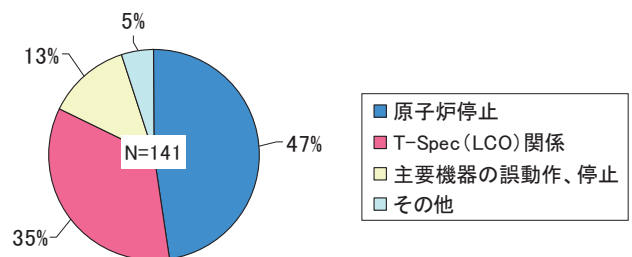


図2 プラントに与えた影響による分類

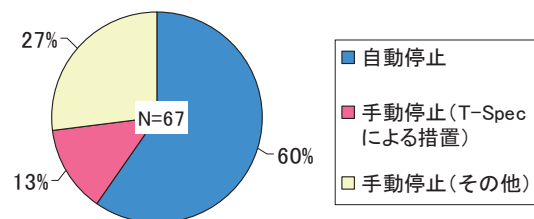


図3 原子炉停止事象の状況分類

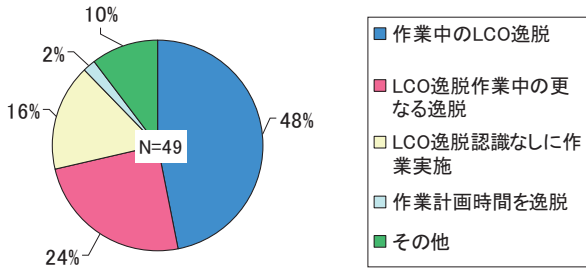


図4 T-Spec 関連事象の状況分類

いなかった作業において、保守計画不良、人的過誤等により作業中に計画外でLCO逸脱となったものである。また、「LCO逸脱作業中の更なるLCO逸脱」は、運転中保守実施により逸脱していたLCOが、保守実施中の設備不具合等により逸脱の範囲が拡大したものである。具体的には、保守の実施により、1系統の機能不能に該当する状態で、保守の実施中に更に他系統の故障があり、両系統が機能不能になってLCO逸脱状態が拡大したものである。

2.2.3 不具合の発生原因

発生原因について、運用上の原因および設備上の原因により分類した結果を図5に示す。不具合発生原因としては、運用上の原因が多い。

運用上の問題が原因となった不具合事象を詳細に分類<sup>(3)</sup>した結果を図6に示す。このなかでは、保守

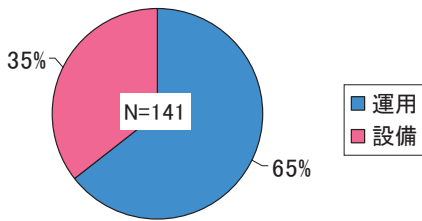


図5 発生原因による分類

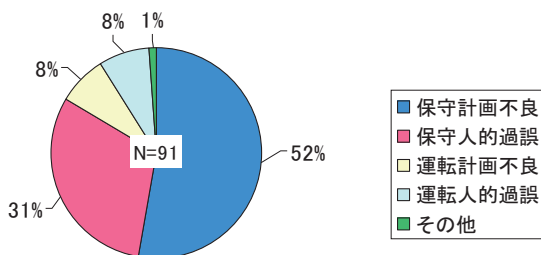


図6 運用上の原因の詳細分類

計画不良が多く、運転中保守を計画するプロセスにおいて問題を生じたケースが多いことが分かる。

この保守計画不良をさらに詳細に分類した結果をみると、図7に示すように作業リスク検討不足、作業要領書不備が多い。作業リスク検討不足は、運転中保守の実施により発生するリスクについて十分な検討が行われておらず、プラントへの影響が発生したものであり、また、作業要領書不備は、作業要領書の記載内容が不適切で作業実施中に不具合が生じたものである。その他では、LCO認識不足が多く、これはLCOを逸脱することを宣言して運転中保守を実施する必要があるにもかかわらず、検討不足によりLCO逸脱の宣言が実施されなかったもの等である。

以上のように保守計画不良を防止するためには、作業リスクの検討、適切な作業要領書の作成等の作業計画が重要になる。米国では、このような運転中保守に伴う不具合発生の経験を踏まえ、作業計画、リスク管理のプロセスが手順書等に詳細に記載されてきており、そのさらなる充実が図られているところでもある。国内においても、運転中保守を実施、拡大するためには、このような作業計画、リスク管理プロセスについて検討し、有効な点については導入する必要がある。

次に設備上の問題が原因となった不具合事象の詳細分類を図8に示す。これには関連機器の不具合、作業対象機器の不具合が多い。関連機器の不具合に

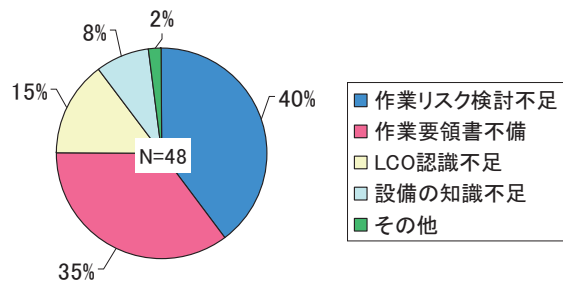


図7 保守計画不良の詳細分類

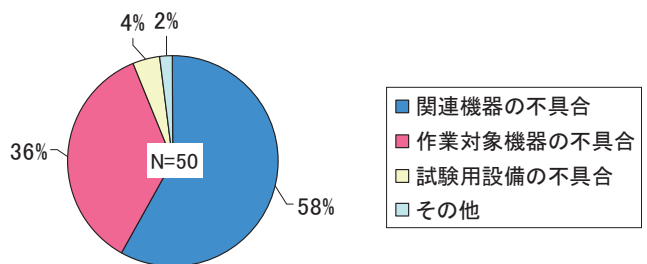


図8 設備上の原因の詳細分類

は、運転中保守の実施により1系統（チャンネル）を隔離中に他の1系統（チャンネル）において偶発的に不具合が発生したため、原子炉トリップ、機器の全機能喪失等になったもの等がある。作業対象機器の不具合は、作業実施中に作業対象設備の不具合により、原子炉停止、T-Spec 関連事象等に至ったものである。これらの設備の健全性確認、適切な保守の実施が重要となる。

2.2.4 不具合の発生時期、設備

図9に不具合の発生時期の分類を示す。多くは保守作業の実施中に発生したものであるが、準備作業によるものもかなり発生している。準備作業では、主に作業を実施するための系統隔離が行われるが、運転中は系統隔離のバウンダリーが運転中系統と接することになることから、そのような箇所では不具合が発生すれば影響も大きいため、事前にその影響について十分検討し、対策を立てておく必要がある。

作業対象の設備別に分類した結果を原子炉停止事象およびT-Spec 関連事象のそれぞれについて、図10、図11示す。原子炉停止事象につながった設備としては、給水系、AC 所内電源系、原子炉保護系が

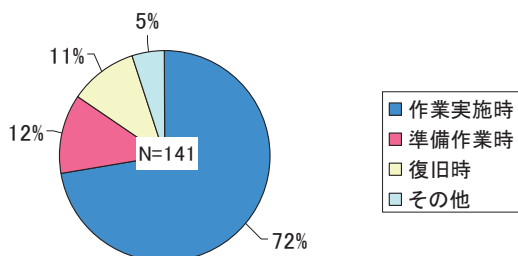


図9 発生時期による分類

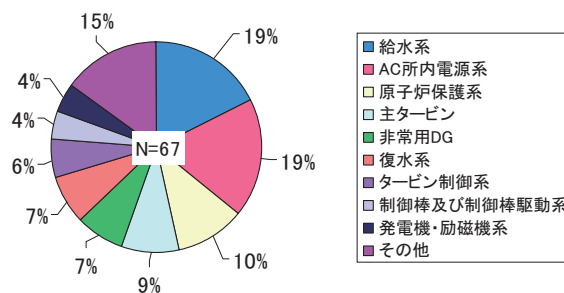


図10 原子炉停止事象の設備別分類

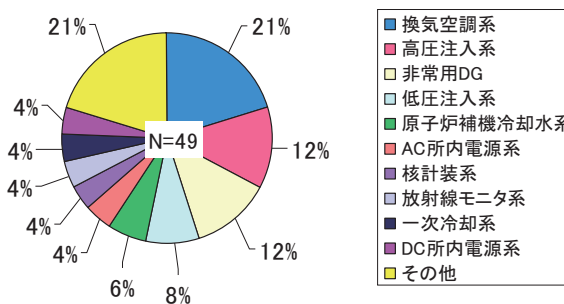


図11 T-Spec 関連事象の設備別分類

多い。これらの系統は、設備の機能上、原子炉停止につながりやすい系統であり、このような系統の作業では、その影響を考え、運転中の作業実施の是非の判断、不具合防止策の検討を予め実施する必要がある。T-Spec に関連した事象では、換気空調系、高圧注入系、非常用 DG 等での作業時の不具合発生が多い。

2.2.5 不具合の発生年

抽出した不具合を発生年別に分類した結果を図12に示す。原子炉停止事象に若干の減少傾向が見られるが、大きな変化とはなっていない。全体としては、事象の発生が継続している。

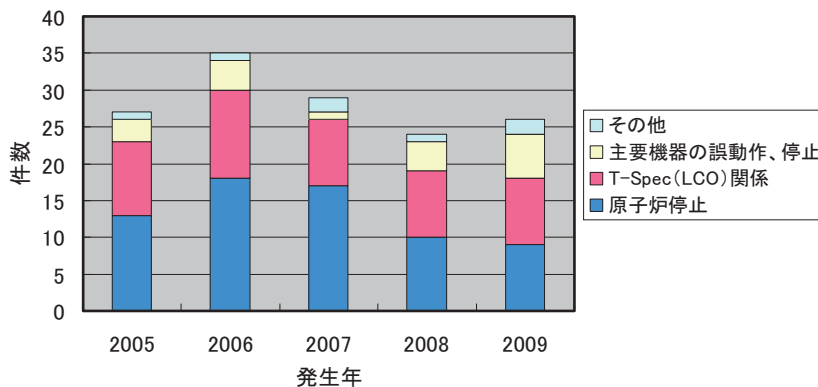


図12 発生年別の分類



表1 運転中保守実施により発生した不具合事象の発生パターン

No.	不具合事象の発生パターン
①	作業実施のため作業系統（チャンネル）の除外中、残りの系統で不具合が発生し、全系統の機能喪失あるいは保護系動作
②	停止中から運転中作業への切替時に、実施時期の変更による影響についての検討不足により不具合発生
③	作業実施中のヒューマンエラー、手順不備による誤操作等で運転中機器に不具合発生
④	作業実施に伴う隔離、復旧時の問題により運転系統あるいは作業実施へ影響が発生
⑤	保守計画不良で作業開始後あるいは作業完了後に LCO 逸脱を認識
⑥	T-Spec の LCO を逸脱して作業を行っている際に作業が遅れて制限時間内に完了できない、またはその可能性の発生
⑦	作業実施時の運転中機器への影響防止策が不十分で不具合が発生
⑧	作業実施時に対象設備の不具合により、原子炉停止、T-Spec 関連事象等の発生

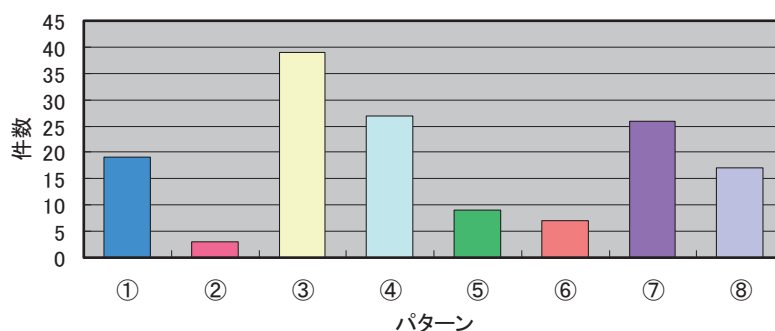


図13 パターン毎の発生件数

### 2.2.6 不具合の発生パターン

前項までの分析は、プラントへの影響、発生原因等、それぞれの分析項目毎に分析を行ったものであるが、今後、国内で運転中保守を実施する際の教訓とするため、抽出した事象の特徴から不具合事象の発生パターンの類型化を行った。

この発生パターンの類型化に当たっては、発生した事象の特徴を捉える上で特に重要と考えられる発生時期、原因、生じた影響に関して、それらを個別に捉えるのではなく、不具合事象発生を一連の流れとして捉えた場合に見られる特徴を抽出し、複数の不具合事象において共通して現れる特徴を発生パターンとして類型化した。類型化した発生パターンを表1に示す。

それぞれの分類項目の件数を図13に示す。8つのパターンのなかで、③の「作業実施中のヒューマンエラー、手順不備による誤操作等で運転中機器に不具合発生」、④の「作業実施に伴う隔離、復旧時の問題により運転系統あるいは作業実施へ影響が発生」、⑦の「作業実施時の運転中機器への影響防止策が不十分で不具合が発生」が多い。これらの発生パター

ンについては、国内における運転中保守実施時にも同様の状況が発生する可能性があることから、このようなリスク発生の可能性について評価を行い、対策を立てた上で作業を実施する必要がある。

## 3. 米国原子力発電所における運転中保守実施プロセスの調査

### 3.1 調査の実施内容

米国原子力発電所における運転中保守実施プロセスの調査は、米国の運転会社が異なる6発電所において、聞き取り調査および実施手順書の分析により実施した。このような複数の発電所で調査を行い、比較、検討することにより米国原子力発電所における実施状況の全体像を把握することができたと考える。また、この調査においては、不具合防止に対して重要と考えられる作業計画、リスク管理プロセスに関して重点的に調査を行ったほか、関連情報収集のため、NRC、EPRI等の関連文献<sup>(4)~(9)</sup>についても調査を実施した。

### 3.2 運転中保守実施プロセスの概要

EPRIのガイダンス<sup>(8)</sup>に、プラント運転中に実施するための戦略、計画が述べられており、それをもとに運転中保守実施プロセスの主な流れを示すと図14のとおりとなる。米国原子力発電所では、この中の「予備的な評価」から「リスク管理措置」までのステップにおいて実施される作業計画の立案、調整、決定のための発電所大での一連の手順を作業計画プロセスとして確立している。また、「原子炉安全のリスク評価」「運転上のリスク評価」「リスク管理措置」で示されるリスク評価、管理についてはさらにその詳細な手順が決められており、リスク管理プロセスとして確立している。

### 3.3 作業計画プロセス

米国の原子力発電所における運転中保守の作業計画は、週単位の工程として作成される。図15にこの作業計画の例を示す。これは、1週間を1作業週とし、1作業週の中に同一トレイン、同一隔離バウンダリーの機器、あるいは、機能的に関連しており、同時に運転から除外すべき機器グループを割当ててものである。通常、12~13週を1サイクルとして、この中に対象となる全ての系統、機器が割当てられる。年間では、このサイクルが4回繰り返されることになり、サーベランス試験もこのサイクルの中で計画される。このように1作業週の中に、同一トレイン、同一隔離バウンダリーの機器を割当てること

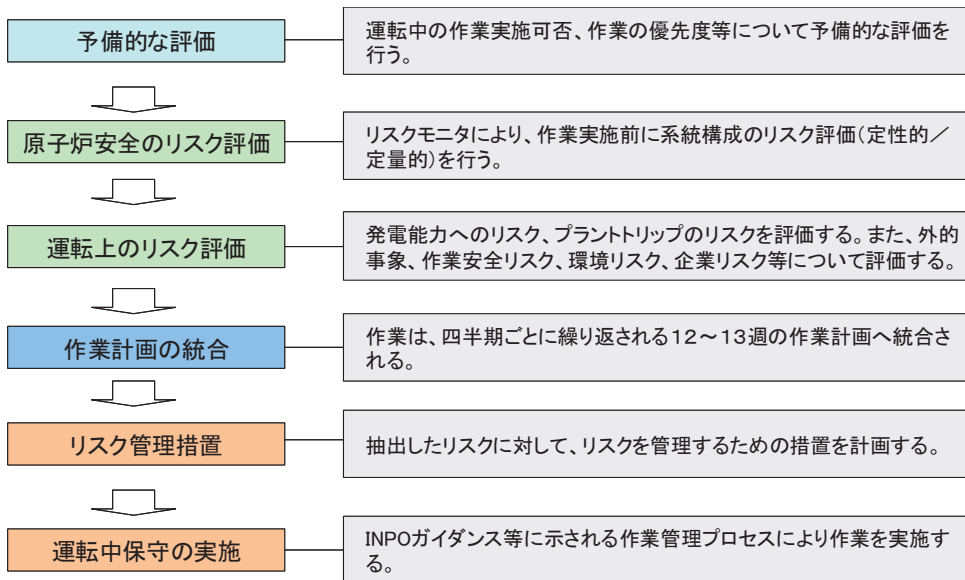


図14 運転中保守実施業務の流れ

システム	週	1	2	3	4	5	10	11	12
	トレイン	A	B	A	B	A			
1次系機器		機器冷却水 格納容器スプレイ 安全注入	—	..	..	..	..	..	..
タービン発電機		—	SG関連機器 相分離母線関係 補助蒸気	..	..		..	..	..
D/G		D/Gおよび関連システム	—	..	..		..	..	..
⋮		⋮	⋮						
⋮		⋮	⋮						

図15 運転中保守作業工程の例

週	実施内容
T-14+	初期のスコープ(作業範囲)の特定、初期のスケジュール作成
T-14	作業スコープ検討会議、資源要求、初期のスケジュールを保守部門へ提供
T-13	保守部門が有効な資源、資格にもとづきスケジュールの平準化のためのインプットを提供
T-12	初期のスコープを計画部門へ提供
T-9	作業要員の計画、平準化、作業の初期のスコープ計画が完了
	作業スコープによるスケジュールの検討
T-5	作業スコープ決定会議、作業
T-4	作業週内作業の最適化、機器隔離の準備を開始
T-2	スケジュールの決定、PSA・トリップリスク評価を完了、作業のリスク計画の完了および承認
T-1	部品の払い出し、作業準備の完了
T-0	計画された作業の実施、日々の作業のステータス会議
T+1	作業実施週の反省会議

図 16 T-週プロセスの例

により、トレイン間違い等による不具合発生の低減、作業対象機器の供用除外時間の低減が可能となる。

また、作業計画の実施プロセスとしては、調査を行った全発電所で T-週プロセスと呼ばれる手順が用いられており、米国原子力発電所において一般的に実施されていると考えられる。この T-週プロセスでは、作業の実施週を T-0 として、そこから a 週間前の週を T-a のように表し、T-a の実施事項、責任箇所等を明確に定めることにより作業実施までの確実な作業準備を可能としている。具体的には、各週に対して、作業範囲の決定、作業の内容について関連箇所との情報共有、作業実施によるリスクの検討、作業スケジュールの決定等 T-0 までに完了すべき準備事項が適切な時期に割り当てられている。図 16 にこの T-週プロセスの実施例を示す。運転中に保守作業を行う場合、運転中機器への影響等作業実施に伴う不具合発生が懸念され、そのような不具合を防止するためには、確実な作業リスクの把握が必要であり、早い段階で作業範囲を決定し、関係箇所が情報を共有して作業実施リスク等の検討を実施することが重要となる。このような観点で T-週プロセスは、重要な役割を果たしており、適切な人的資源の配分、資材の手配等の作業準備の確実な実施にも有効なものとなっている。

国内では、定期検査中の作業については計画的な工程調整、作業準備が実施されているが、運転中は基本的に予防保全作業を実施しておらず、不具合の修理作業のみが実施されることから、米国のような

運転中保守を対象とした作業計画プロセスは確立していないと考えられる。しかし、今後、運転中保守の実施範囲を拡大し、運転中に多数の作業を同時並行で計画するような場合には、各所の調整、事前検討等に十分な時間確保が必要であり、計画的な準備プロセスが必要となる。国内において、運転中の保守作業範囲を拡大して行く場合には、このような計画プロセスの導入が必要と考える。

### 3.4 リスク管理プロセス

作業実施に伴うリスク管理の一般的なプロセスでは、まず、想定される作業のリスクを抽出・評価し、そのリスクの重要度を判定して、リスク重要度に応じたリスクの管理措置を実施する。EPRI のガイドンスで示されているリスク評価プロセスの例を図 17 に示す。この評価プロセスは、詳細部分は発電所により異なるものの、この考え方をベースとしたプロセスが今回調査を行った半数の発電所で実施されていた。このプロセスの中では、「原子力安全」、「産業安全」、「環境安全」、「企業／規制」等の評価項目を定め、それぞれの項目についてリスク重要度の基準を明確にして作業ごとにリスクの抽出、重要度の判定を行い、リスク重要度に応じて実施すべきリスク管理措置を決定する。リスク重要度の基準としては、高リスクとなる作業内容が評価項目ごとに多数示されており、それらに該当するかどうかでリスク重要度を判定する。リスクの評価を行う上では、想定さ

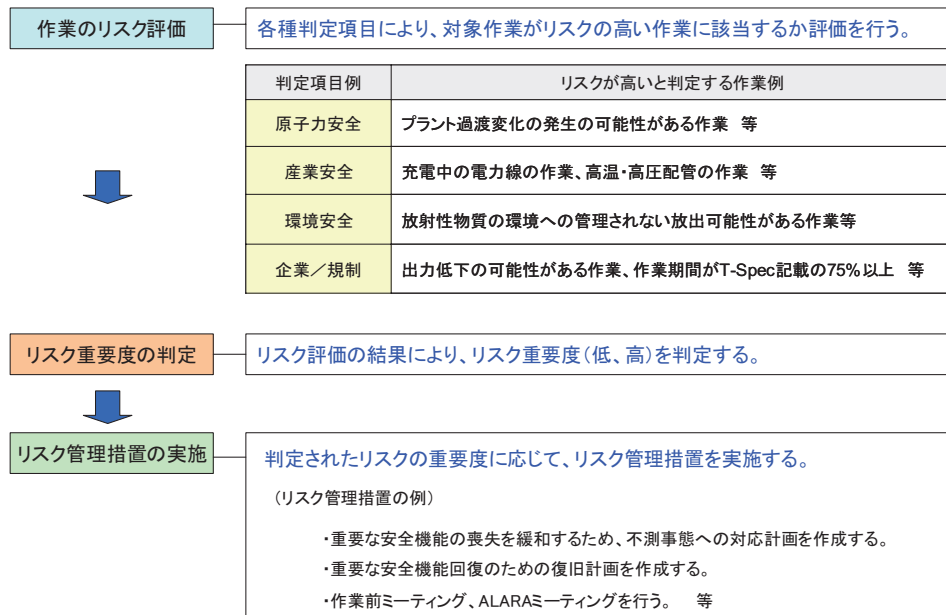


図 17 リスク管理プロセスの例

れるリスクを漏れなく抽出することが重要であり、リスクを様々な観点から評価し、抽出するプロセスを確立することは、リスクの想定漏れを防ぐために有効であると考えられる。

国内においても、運転中の作業に対して、作業対象となる設備の重要度、予備機の有無、発電への影響度等により、作業の重要度、実施可否等を判断しているが、運転中機器への様々な影響を考えたリスク評価プロセスとしては確立していないと考えられる。今後は、作業実施に伴うリスクを確実に把握するため、リスク抽出、判定の基準等を明確にし、対応措置まで定めたプロセスを確立していく必要があると考える。

このリスク管理プロセスにおいては、確率論的リスク評価（PRA：Probabilistic Risk Assessment）がリスク評価のための重要な手段となっている。米国原子力発電所では、プラントの系統状態等からリアルタイムにPRAによるリスク評価が可能なリスクモニタ<sup>(9)</sup>と呼ばれるソフトウェアが使用されている。このソフトウェアは、PRAの専門知識がない職員も使用可能であり、発電所の作業計画、運転等の関連部門で使用されている。一方、国内においては、PRAは特定の業務にて実施されているのみで、作業のリスク管理として広く使用される段階までには至っていない。今後、このようなツールを整備することにより、発電所においてPRAの実績を積み、評価能力の向上を図る必要があると考える。また、米

国の一部の発電所では、このリスクモニタにプラントのトリップリスクの計算機能を組み込み、発電リスクの評価にも使用している。国内においては、プラントがトリップした場合、再起動までに長期間を要する等、米国以上に影響が大きく、このようなトリップリスクへの対応についても十分な検討、対策が必要である。

#### 4. まとめ

米国の運転経験情報から運転中保守の実施に伴う不具合を抽出し、その発生状況、原因等について分析した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 運転中保守の実施により発生した不具合には、原子炉停止に至った事象、T-Specに関連する事象の発生割合が多く、それらの発生原因としては、作業リスクの検討不足、作業要領書不備等の保守計画不良が多い。
- (2) 運転中保守の実施に当たっては、作業の実施によるリスクを把握、管理することが重要であり、そのためには、発電所内で十分な情報共有、計画的な準備作業が可能となる作業計画プロセス、発生リスクを多角的に検討して、確実にリスクを抽出して管理するためのリスク管理プロセスを確立することが必要である。



## 文献

- (1) 原子力安全・保安院, 実用発電用原子炉施設の運用管理規定の見直しに関する報告書 (2009).
- (2) NUREG 1022, "EVENT REPORTING GUIDELINES 10 CFR 50.72 and 50.73," USNRC (2001).
- (3) 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).
- (4) NRC Code of Federal Regulations Title 10 Part50.65, "Requirements for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plants,".
- (5) NRC Regulatory Guide 1.160, "Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants," USNRC (1997).
- (6) NRC Regulatory Guide 1.182, "Assessing and Managing Risk Before Maintenance Activities at Nuclear Power Plants," USNRC (2000).
- (7) NEI NUMARC 93-01 Revision 3, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants," (2000).
- (8) EPRI TR-1009708, "Guidance for Developing and Implementing an On-Line Maintenance Strategy," (2006).
- (9) NEA/CSNIR/R (2004) 20, "RISK MONITORS The State of ART in their Development and Use at Nuclear Power Plants," (2004).