

# PSA 評価による原子力プラントの運転中保守に関する研究 - オンラインメンテナンスに関する成立性研究 -

An Application of PSA Techniques to On-Line Maintenance Program  
— A feasibility Study of Maintenance Strategy during Plant  
Operation Using PSA Techniques —

尾上 彰 (Akira Onoue)\* 小島 重雄 (Shigeo Kojima)†  
青井 貞則 (Sadanori Aoi)‡

**要約** 我が国では、原子力プラントの運転中に試験等により発見された機器故障に対しては、保守規定に定められたある一定期間内は、運転を継続した状態で補修することが許容されている。この考え方を一歩進めて、特に米国においては定期検査期間の短縮や保守コストの低減を目的に、運転中保守自体がリスクを判断基準とした安全性確認を前提として実施されている。しかし、PSAコードによるリスク評価の手法は十分明らかになっていない。本研究は、リスクマネジメントをプラントに適用する一例として、運転中保守に伴うリスクをRISKMANコードによって評価する手法を示すことを目的としている。この目的のために、現在は定期検査期間中に実施している原子力プラントの安全上重要な機器あるいはシステムの点検を運転中に実施した場合における安全上の影響をPSA評価により確認する一連のプロセスを検討した。更に、我が国においても運転中保守を実施することの成立性及び技術的課題について具体的に検討した。PSA評価の結果、暫定的に設定した管理目標により、運転中保守の実施が可能なシステムと実施が困難なシステムが生じること、また出力運転中と定期検査期間中の安全性に与える影響の両方のバランスを考慮すべきこと等の重要な知見が得られた。運転中保守の実施は、管理目標を適切に設定することにより、リスクの観点からは、特定のシステムに関しては可能との結果が得られた。

**キーワード** PSA, OLM, 運転中保守, オンラインメンテナンス, リスクマネジメント

**Abstract** This study confirms an on-line maintenance possibility for a Japanese NPP from a plant risk management point of view. One-line maintenance has already been planned and executed in some NPPs in the United States. The problem preceding on-line maintenance is how to keep a certain level of plant safety with out of service condition, safety-related systems and components, during maintenance. Deterministically, the technical specification defines unplanned maintenance periods of safety related standby systems. Probabilistically, this principle is able to be verified by utilizing PSA technology. In this study a PSA method for Japanese PWR plants is applied to improve plant availability, and to investigate safety issues associated with on-line maintenance strategy, system configuration, management and financial advantage regarding Japanese plant constraints. On-line maintenance is one of the risk management activities to improve safety and manpower workload during shutdown. As a result of this study, core damage frequency can show that on-line maintenance of some safety related systems is able to be performed and that of other safety related systems, not. On-line maintenance for Japanese NPPs utilizing risk method, will be introducing maintenance programs during power operation, like as performed in the United States. It will be important to prepare guidelines for on-line maintenance principles for further risk management programs.

**Keywords** PSA, OLM, on-line maintenance, risk management

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所  
† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所  
現 コンピュータソフト開発(株) 特別プロジェクト

‡ コンピュータソフト開発(株) P S A 技術推進グループ

## 1. はじめに

米国では、T-Specに定められている安全系の機器の保守を従来は原子炉停止期間中に実施していたが、これを計画的に出力運転中に実施することにより、原子炉停止期間を非常に短縮することに成功している。このようにして出力運転中の保守（OLM：On-Line Maintenance）により原子力発電プラントの保守コストの削減や稼働率の向上を図っている。その実施例はサウス・テキサス・プロジェクト発電所などいくつかのプラントで報告されている<sup>(1)</sup>。一方、我が国のように2トレン構成の原子力発電プラントでは、安全上重要な工学的安全設備の点検・保守のための待機除外は保安規定で事実上制約を受けている。しかしながら、今後我が国でもリスクに基づいた意志決定の有用性が認識されるようになれば、保守頻度の最適化や経済性の向上を図るためにOLMの検討が俎上に上るものと考えられる。OLMを実施することは保守計画全体を見直すことにもなるため、まず安全性の観点からOLM実施の成立性を検討しておくことが必要である。

米国においてもOLM時のリスク評価にプラントのPSAモデルを適用し、解析結果に基づいたリスク管理を実施するようになったのはつい最近のことである。また、OLMは発電所の数多くの部門が関係するものであり、発電所毎に詳細計画内容も異なっている。そのため、OLMを実施する際のリスク評価モデルや様々なプラント構成状態でのリスク評価方法の詳細は明らかになっていない。また我が国では、プラントの安全系の機器については計画的にOLMを実施した実績がないため、OLMが可能かどうかとも検討されていない。

本研究では、国内PWRプラントについて、リスクの観点からOLMが成立するかどうかを評価することを旨とした。まず運転中保守の考え方を整理し、次いでPWRプラントを対象に出力運転中および停止期間中のPSAモデルを用いて、RISKMANコードによるリスクの評価方法を示すと共に、OLMの実施がリスクに及ぼす影響の評価を試みた。更にOLM時の安全確保策についての検討を行った。

## 2. 運転中保守について

### 2.1 運転中保守の基本原則

米国のリスクベースマネジメント活動の基本原則として、決定論的手法と確率論的手法を適切に組合せたブレンドアプローチが提案されている<sup>(2)</sup>。即ち、深層防護の確保、リスク管理目標、多様性/多重性の確保、従属故障要因の制限等を基本原則としている。OLM実施手順を検討する上で、これらの基本原則を念頭に、以下の4項目を本研究の原則とした。

同時に待機除外とする機器は同一トレンに属するものとする。

運転中に保守を実施するためには、著しい信頼性の低下をもたらさないようにする必要がある。このため、保守の実施は片トレンのみとし、両トレンにまたがる保守は原則として禁止する必要がある。複数プラント共用の機器については、複数プラントの状態を考慮した運用が必要である。

運転中保守の管理目標は以下を使用する。

PSAはプラントの安全上の特徴を体系的に評価し、意志決定の手段として活用されるものであり、必ずしも定量的な安全目標の設定を必要としない。しかしながら、OLMの対象範囲を設定する等の詳細な計画立案、決定を行うためには、自主的な管理指標を設定しておく必要がある。また、今後我が国において各分野のコンセンサスを得るためにも管理指標を設定しておく必要がある。OLMによるリスク増加を表す指標として、EPRI PSA Application Guideは一時的リスク及び年平均リスク基準を提唱している<sup>(3)</sup>。本研究では、暫定的に以下の管理目標を使用する。

#### a. 一時的リスク

単位時間当たり炉心損傷頻度増分 × 待機除外時間 < CDP (Core Damage Probability)

#### b. 年平均リスク

年平均炉心損傷頻度 < CDF (Core Damage Frequency)

なお、現在は保安規定対象機器に対しては許容待機除外期間 (AOT: Allowed Outage Time) が定められている。AOTは待機除外に出来る最大

限の期間であり、設備をAOT内に復旧出来なければ、原子炉を停止しなければならない。そのため、この期間内に保守が完了できそうにない機器は、運転中保守の対象外とする。また、ここでは待機除外期間は現行の保安規定に記載されている期間（10日）を限度とした。

同時待機除外は2系統までの組合せを限度とする。

複数の機器を待機除外にする場合には、当該トレンの全部あるいは一部の機能が待機除外となり、信頼性は低下する。特に、冗長トレン側の信頼性をも著しく低下するような場合や両トレンの多重性のある機器を同時に待機除外とするような場合には、著しい安全性の低下をもたらす。また、異常事象の影響を緩和するための設備で、多様性/多重性の確保が不十分となる場合にはプラントのリスクが高くなる。そのため、OLMの実施に際しては極端な多様性/多重性の低下をもたらさないように配慮する必要がある。

従属故障要因を増大するようなOLMは実施しない。

補機冷却水系、海水系、非常用DG等のサポート系の待機除外は複数の系統に影響を及ぼすので、当該サポート系と同じトレンの機器以外は待機除外とはしない。

## 2.2 運転中保守を適用する機器の選定方法

国内PWRプラントに対して、次の5つの観点からOLM対象となる代表的な機器を選定した。

定期検査（定検）期間の短縮

定検工程の所要日数に対してクリティカルな機器にOLMを実施すれば、定検期間、プラント停止期間が短縮され、稼働率が向上する。

定検作業の平準化

現在定検時に実施している機器の保守を出力運転中に実施することにより、定検時の保守作業が軽減され、年間を通して保守作業の平準化を図ることが出来る。

停止時の安全性向上

停止時のリスク軽減に寄与する機器を出力運転

時に点検することにより、停止時の安全性が向上する。停止時の安全性の向上に寄与度の高い補機は、停止期間中の異常時に影響緩和機能としての作動が要求される機器である。

異常事象の発生防止

出力運転中に稼働している機器を誤って待機除外にした場合には、主給水喪失、外部電源喪失や補機冷却水喪失のような炉心損傷の要因となり得る事象や、原子炉の誤トリップを引き起こす可能性がある。そのため、出力運転中に稼働している機器は、全てOLM対象から除外する。また、再循環サンプや燃料取替用水タンクなどの共用設備は、両トレンの機能喪失の要因となることからOLMの対象から除外する。

被曝の防止

放射線量の高い格納容器内の機器は被曝の観点から対象外とする。

以上の観点から、本研究では次の機器をOLM対象に選定した。

（非常用DG、海水ポンプ、原子炉補機冷却水ポンプ、原子炉補機冷却水クーラ、制御用空気圧縮機、電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプ、高圧注入ポンプ、余熱除去ポンプ、格納容器スプレイポンプ、充てんポンプ）

## 3. 運転中保守へのPSA評価からのアプローチ

### 3.1 運転中保守のリスク評価の方法

本研究では、運転中保守に伴うリスクのPSA評価のために、RISKMANコードのOLM評価用モデルを用いて炉心損傷頻度を評価した。このモデルの特徴は、大イベントツリー/小フォールトツリーと呼ばれるPSAの一つの手法を用いることにある。即ち、内的事象（出力運転中、停止期間中）のPSA評価では、各起因事象に対する影響緩和系（ECCS、2次系冷却、格納容器スプレイ系等）をヘッディングとしたイベントツリー（フロントラインイベントツリー）の前にサポート系（電源系、計装系、補機冷却系等）をヘッディングとしたイベン

トツリー（サポート系イベントツリー）と共用系（燃料取替用水タンク，再循環サンプ等）をヘッディングとしたイベントツリー（共用系イベントツリー）を連結させてリスク評価を行うのである．この手法の利点は，複数の系統に係わるサポート系等を明示的に扱えることにある．本研究では，更に OLM 評価のための感度解析が容易に扱えるように，OLM イベントツリーと保守状態イベントツリーを追加し，事故シーケンスの発生頻度を起因事象の発生頻度に次の5つのイベントツリーの分岐確率を乗じることにより求めている．

$$\left( \begin{array}{l} \text{(起因事象)} \times \text{OLM イベントツリー} \\ \quad \times \text{保守状態イベントツリー} \\ \quad \times \text{サポート系イベントツリー} \\ \quad \times \text{共用系イベントツリー} \\ \quad \times \text{フロントライン系イベントツリー} \end{array} \right)$$

OLM イベントツリーは，OLM 対象機器をイベントツリーのヘッディングとし，各ヘッディングに対して同時期に OLM を実施する機器の組み合わせを多分岐のシーケンスとして展開したものである．OLM イベントツリーの一例を図1に示す．同時に OLM を実施する機器の組み合わせを表すシーケンスに分岐確率1.0を与え，対象としない機器の組み合わせに0.0を与えて，対象となる OLM 機器の組

み合わせのみを定量評価出来るようにしたものである．即ち，OLM を実施しない場合には のシーケンスとなり，機器1の OLM を実施する場合には のシーケンスとなる．また，この方法によれば，OLM 対象機器の組合せのすべてのケースの解析を一度の計算で評価できる．更に，OLM イベントツリーの評価対象とする機器の組み合わせを表すシーケンスの分岐確率に年間の OLM 期間の比率を与えることにより，OLM 期間を変更する場合の感度解析を行うことが出来る．

保守状態イベントツリーは，OLM イベントツリーと内的事象のイベントツリー（サポート系，共用系，フロントライン系）をつなぐものであり，機器が待機除外となる場合に影響を受けるシステムをヘッディングとしている．保守状態イベントツリーを図2に示す．このイベントツリーでは，予め，機器が待機除外となった場合のシステムの状態変更の情報（片トレン使用不能等）を設定しておき，OLM イベントツリーで設定した機器の待機状態による影響緩和系への影響を自動的にその後のイベントツリーに受け渡す．即ち，OLM を実施しない場合には のシーケンスとなり，機器1の OLM を実施する場合には のシーケンスとなる．更に，OLM イベントツリーデータのみを変更することにより OLM の感度解析を行うことが可能であり，データの設定

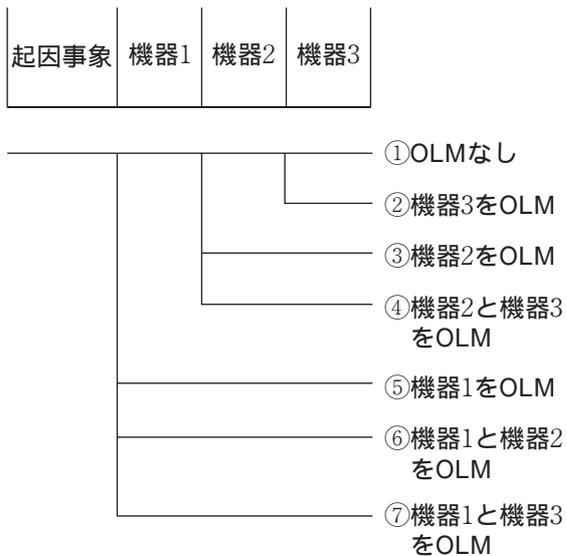


図1 OLM イベントツリー

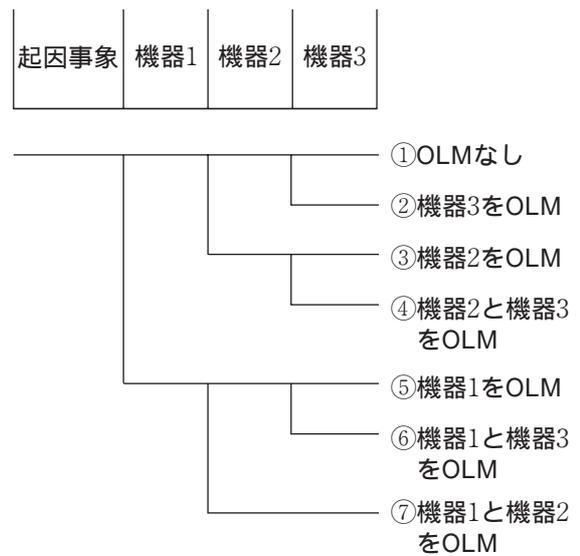


図2 保守状態イベントツリー

を簡素化している。更に、OLM イベントツリーは OLM 機器の組合せを表現するだけであるが、保守状態イベントツリーを加えることにより個々の機器毎に待機除外状態を指定することが出来るようにした。

サポート系、共用系、フロントライン系の3つのイベントツリーは既に確立されたものを使用している。

### 3.2 運転中保守の管理目標

運転中保守に伴うリスクは次のように与えられる。即ち、先ず各機器の OLM の任意の組み合わせを  $i$  とした時、その OLM が 1 年間継続した場合の炉心損傷頻度 ( $CDF_{OLM,i}$ ) を算出し、ベースとなる内的事象の炉心損傷頻度 ( $CDF_{BASE}$ ) との差を炉心損傷頻度の増分 ( $\Delta CDF$ ) とする。次に一時的リスク及び年平均リスクを次式によって年間時間 (8760 時間) に換算して求める。

一時的リスク

炉心損傷頻度増分  $\times$  OLM 期間

$$= (CDF_{OLM,i} - CDF_{BASE})$$

$$\times (OLM \text{ 期間} / 8760 \text{ 時間})$$

年平均リスク

$$(CDF_{OLM,i} \times OLM \text{ 期間} / 8760 \text{ 時間})$$

$$+ CDF_{BASE} \times (1 - OLM \text{ 期間} / 8760 \text{ 時間})$$

一時的リスクと年平均リスクは、それぞれ次のように禁止、注意及び許可の3段階に分類する。ここで、 $CDP_1$  と  $CDF_1$  はそれぞれ EPRI PSA Application Guide や個々のプラントの故障率データ等に基づいて決めるべき値である。 $CDP_2$  と  $CDF_2$  はそれぞれ  $CDP_1$  と  $CDF_1$  の 1/10 の値である。

一時的リスク

R : 禁止  $CDP_1$

Y : 注意  $CDP_2$   $Y < CDP_1$

G : 許可  $< CDP_2$

年平均リスク

R : 禁止  $CDF_1$

Y : 注意  $CDF_2$   $Y < CDF_1$

G : 許可  $< CDF_2$

一時的リスクまたは年平均リスクの基準値を超える場合には、以下の対応により炉心損傷頻度の低減

を図るが、これらの対策を施しても年平均リスクまたは一時的リスクのどちらかが禁止区域に入るような場合には、運転中保守の対象とはしない。

- 同時に保守する設備 / 機器の組合せを再検討し、工程を組み替える。
- リスクを低減できるような手段を検討する。
- 待機除外時間の最短化を図る。

### 3.3 運転中保守の試解析

前節で選定した対象機器について作成した OLM 評価用の PSA モデルを用いて解析を試みた。リスク評価手順のフローチャートを図 3 に示す。

この評価では、OLM 時のポンプや熱交換器の隔離は、対象補機に最も近い吸込 / 吐出側の電動弁または手動弁で行うこととし、当該機器の隔離により他の機器に影響を及ぼさないものとした。また、OLM 実施に伴う人的過誤、OLM 実施前後の機器故障率や人的過誤の時間依存性までは考慮していない。

図 4 に OLM 対象機器の組合せ毎に 1 年間 OLM を実施した時の年平均リスクを示す。但し、図の T は前述の基本原則によって禁止されている組合せである。また、図 5 に OLM 期間を 10 日間とした場合の一時的リスクを示す。これらの図から、OLM 対象機器により、リスクの観点から OLM 実施が可能な場合と困難な場合があることが分かる。また、前節で選定した対象機器全てについて、極端な仮定ではあるが、各トレン毎に保安規定の制限範囲である 10 日間毎の OLM を順次実施すると、OLM の実施期間は合計で 210 日となり、実施していない期間は 155 日となる。その場合の炉心損傷頻度は、OLM を実施していない場合に比べ約 6 割程度増加する。

ここで、炉心損傷頻度に寄与する割合が大きい機器を OLM 対象外とすることにより、炉心損傷頻度を低減することが可能である。

### 3.4 停止期間中の試解析

運転中に機器の保守を行うことにより停止期間中には当該機器の保守をする必要が無くなる。そのため、運転中の保守に伴うリスクの評価を補完する目

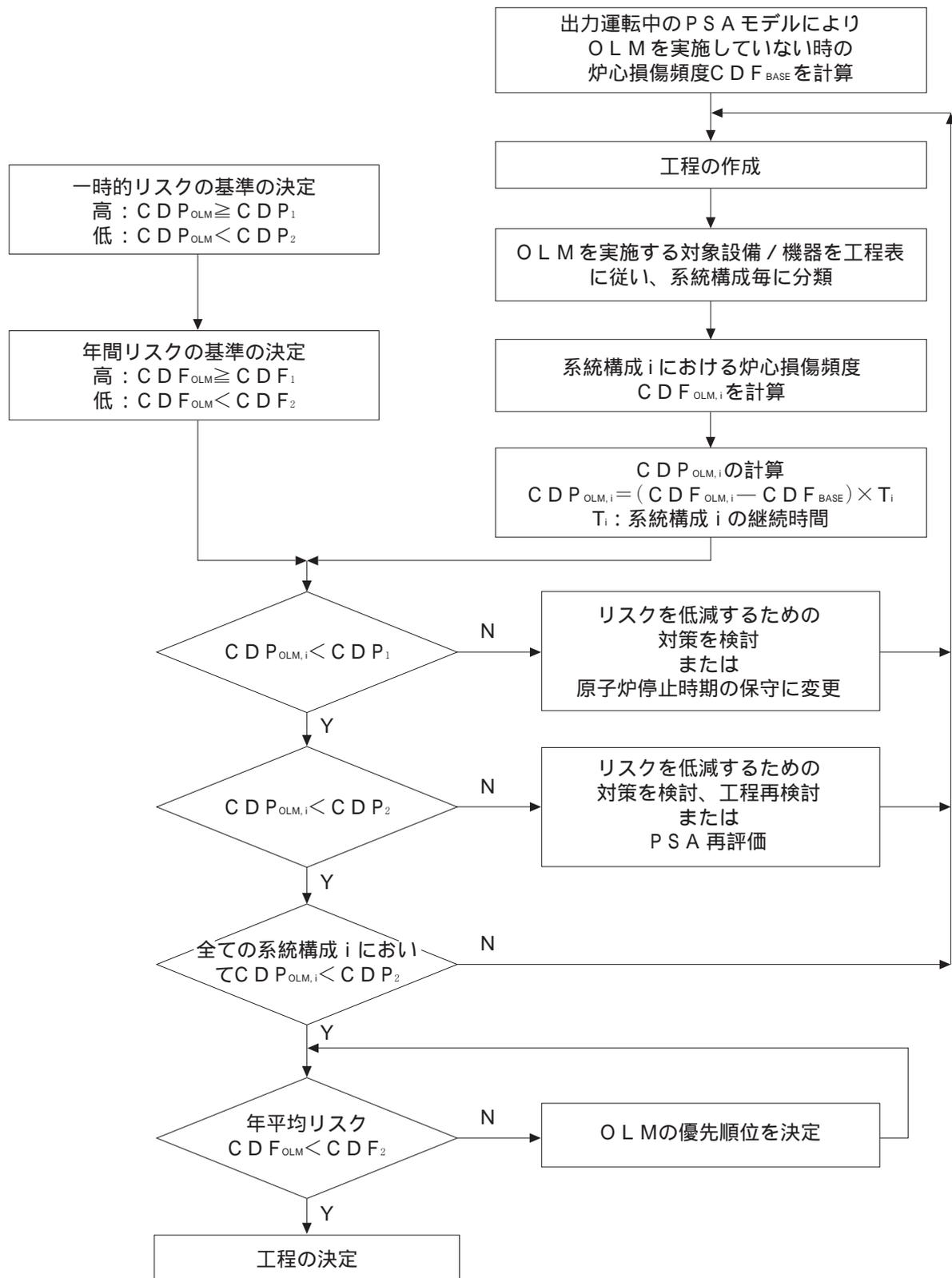


図3 リスクの評価手順

	A-SYS1	B-SYS1	A-SYS2	B-SYS2	A-SYS3	B-SYS3	A-SYS4	B-SYS4	A-SYS5	B-SYS5	A-SYS6	B-SYS6	C-SYS6	A-SYS7	B-SYS7	C-SYS7	A-SYS8	B-SYS8	A-SYS9	B-SYS9	C-SYS9	D-SYS9	A-SYS10	B-SYS10	A-SYS11	B-SYS11	C-SYS11	A-SYS12	B-SYS12	
A-SYS1	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T		
B-SYS1	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS2	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS2	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS3	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS3	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS4	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS4	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS5	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS5	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	T	G	G	Y	Y	G	G	G	Y	Y	G	G	G	Y	Y	G	G	G	
B-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	G	T	G	G	Y	Y	G	G	G	Y	Y	G	G	G	Y	Y	G	G	G	
C-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	T	G	G	G	G	Y	Y	G	G	G	G	Y	Y	G	G	G	Y	Y	G	G	G
A-SYS7	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS7	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
C-SYS7	Y	Y	Y	R	R	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	T	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
A-SYS8	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS8	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS9	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	G	G	Y	T	Y	T	G	T	T	Y	T	G	T	Y	T	G	G	G	
B-SYS9	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	G	G	Y	T	Y	T	G	T	T	Y	T	G	T	Y	T	G	G	G	
C-SYS9	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	G	G	G	T	Y	Y	T	T	T	G	T	Y	T	G	G	G	T	G	G	
D-SYS9	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	G	G	G	T	Y	Y	T	T	T	G	T	Y	T	G	G	G	T	G	G	
A-SYS10	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
B-SYS10	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	Y	Y	T	Y	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
A-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	Y	Y	G	G	G	G	Y	Y	T	T	G	G	G	G	G	
B-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	Y	Y	G	G	G	G	Y	Y	T	T	G	G	G	G	G	
C-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	Y	Y	G	G	G	G	Y	Y	T	T	G	G	G	G	G	
A-SYS12	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	G	G	T	Y	Y	T	G	G	T	Y	T	G	G	G	G	T	G	G	
B-SYS12	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	G	G	G	T	G	Y	T	T	G	G	T	Y	T	G	G	G	T	G	G	

図4 OLM組み合わせ年平均リスク評価マトリックス

	A-SYS1	B-SYS1	A-SYS2	B-SYS2	A-SYS3	B-SYS3	A-SYS4	B-SYS4	A-SYS5	B-SYS5	A-SYS6	B-SYS6	C-SYS6	A-SYS7	B-SYS7	C-SYS7	A-SYS8	B-SYS8	A-SYS9	B-SYS9	C-SYS9	D-SYS9	A-SYS10	B-SYS10	A-SYS11	B-SYS11	C-SYS11	A-SYS12	B-SYS12	
A-SYS1	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T		
B-SYS1	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS2	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS2	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	
A-SYS3	Y	T	Y	T	Y	T	R	R	T	R	T	Y	Y	Y	R	T	R	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
B-SYS3	T	Y	T	Y	T	Y	T	R	T	R	T	Y	Y	Y	T	R	T	R	T	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
A-SYS4	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	T	G	G	T	G	T	G	T	G	T	G	G	G	T	
B-SYS4	T	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	T	G	T	T	G	T	G	T	G	T	G	G	T	
A-SYS5	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	T	G	T	G	T	G	T	G	T	G	T	G	G	T	
B-SYS5	T	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	T	G	T	T	G	T	G	T	G	T	G	G	T	
A-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	T	T	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
B-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	T	T	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
C-SYS6	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	T	T	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
A-SYS7	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	T	G	R	T	G	T	G	T	G	T	G	T	G	G	T	
B-SYS7	T	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	T	G	T	T	G	T	G	T	G	T	G	T	G	T	
C-SYS7	Y	Y	Y	R	R	G	G	G	G	G	T	T	G	R	R	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
A-SYS8	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	R	G	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	G	T	Y	
B-SYS8	T	Y	T	Y	T	R	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	R	T	G	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	T	Y	
A-SYS9	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	G	T	T	T	G	T	G	T	G	G	G	T	
B-SYS9	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	G	T	
C-SYS9	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	G	G	G	T	G	T	T	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	G	T	
D-SYS9	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	G	G	G	T	G	T	T	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	G	T	
A-SYS10	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	G	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	T	
B-SYS10	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	T	
A-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
B-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	
C-SYS11	Y	Y	Y	Y	Y	Y	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	T	T	G	G
A-SYS12	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	G	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	T	
B-SYS12	T	Y	T	Y	T	Y	T	G	T	G	T	G	G	G	T	G	Y	T	T	T	T	G	T	T	G	T	G	G	T	Y

図5 OLM組合わせ一時的リスク評価マトリックス (OLM期間10日間)

的で、PWRプラントの停止期間中のPSAモデルを用いて炉心損傷頻度の評価を行い、OLM実施による停止時リスクの低減効果をも評価した。評価対象機器として、出力運転中のOLM対象機器であり、かつ機器の待機除外期間が短縮可能なものを選定した。なお、停止期間中は、余熱除去ポンプは従前から燃料取り出し期間以外は全て待機状態であるため、リスクへの影響はない。以下に評価対象機器を示す。

（ 非常用DG，海水ポンプ，原子炉補機冷却水ポンプ，制御用空気圧縮機，電動補助給水ポンプ，タービン動補助給水ポンプ，高圧注入ポンプ，充てんポンプ ）

OLM対象機器の保守はプラント停止中には行われないため、従来の停止中の保守の所要期間から当該機器の分は控除されることになる。そのため、その該当期間中は待機状態にあるものと見なしてリスク評価を試みたところ、停止期間中の炉心損傷頻度は約1/2に減少した。

### 3.5 評価結果のまとめと課題

OLM実施により、出力運転中のリスクは増大し、停止期間中のリスクは低減する傾向にある。出力運転中と停止期間中のリスクは評価手法や評価モデルが異なるため、各々のリスクの単純な比較やトレードオフを論じることは難しいが、少なくとも、OLMによる出力運転中のリスクの増加はそれほど大きくないことが分かった。また、OLMを実施することにより定検期間の短縮や定検要員の平準化が期待できる。

本評価では、OLM実施によるリスクへの影響に関する検討を実施した。今後は、実際にOLMを実施するための具体的手順とOLM実施による次の経済性の得失を検討する必要がある。

#### 定検期間の短縮効果

定検実績から定検のクリティカルパスを分析し、OLMを実施することによる定検工程の短縮、プラント稼働率の向上の効果を検討する。

#### 人員平準化効果

OLMを実施することにより、定検要員の平準化を図れるが、OLM実施計画策定と共に平準化

の程度を検討する。

#### OLM実施時のコスト

OLMを実施する場合に増加するコスト（管理費、機材費等）と定検時に低減するコストを比較して検討する。

## 4. 運転中保守実施時の安全管理

OLM実施中は、対象設備の1台もしくは1系列は待機除外となる。このため、このような運転条件下で安全性を確保するためには、OLM実施前、実施中及び実施後の安全管理策を検討しておく必要がある。この安全管理策はプラント毎に異なるが、その基本について検討した。

### 4.1 実施前の安全管理

OLM実施前には、OLM実施中の安全性を確保するために、次の内容を含む適切な管理計画を立て、文書で明確にしておく必要がある。

#### 実施工程の作成

運転中保守によるリスクが許容できる実施工程を作成する。また、計画工程と実績工程にずれが生じれば、リスク評価を行うと共に対応処置を検討する必要がある。

#### 系統の隔離方法

運転中の機器に影響を及ぼさないように隔離範囲を決定する必要がある。特に、保守対象トレンに含まれる機器に関するインターロックの解除や作動が影響を及ぼす範囲を明確にする必要がある。また、定検時には使用しない隔離弁や、定検時に使用する隔離弁であっても差圧がある状態で隔離した実績がない場合のように、定検中の一括隔離とは異なる隔離状態になる場合には、隔離弁そのものの健全性を事前に確認しておく必要がある。また、系統の隔離が終了した状態で、事故時運転モードでの確認が必要である。

#### 作業環境

運転中と定検中は作業環境が異なるために、作業が可能であることを確認しておく必要がある。例えば、海水ポンプを作業するために潜水作業が必要な場合に、循環水ポンプが運転されていれば、

潜水作業が極めて危険になる場合がある。また、蒸気を使用している機器は高温であるために、作業を開始するために十分な冷却期間を考慮する必要がある。

#### 緊急作業への対処

待機側トレンに異常が発見された場合、保守作業の段階に応じて対応方法を事前に検討しておく必要がある。また、待機除外までは問題なく運転されており、分解点検により異常が発見され、かつ修理に長時間を要する場合にもその対処の方法を事前に検討しておく必要がある。

## 4.2 実施中の安全管理

出力運転中の操作は運転手順書に基づいて行われている。運転手順書は原則として補機が全系列使用可能状態であることを前提として記されている。ここでは、OLM 実施に伴い、運転手順書で考慮すべき事項について述べる。

#### 対象機器の誤認防止策

運転中の機器と OLM 対象機器の設置場所が近接している場合には、作業区画を明確にし、作業関係者以外は立ち入りが出来ないような措置を講じる必要がある。

#### 予備機の取り扱い

機器が3台設置されており、定格出力運転中は1台使用している機器については、1台を待機除外しても残り1台が予備機として使用可能である。従って、OLM を実施しても単一故障基準は満たすため、安全上の重大な影響はない。しかしながら、更に安全性を確保するためには、電源切替え可能な予備機については、電源及び起動信号を待機除外されたトレン側に切替えておく必要がある。

#### 安全管理ツール

扱いやすく、理解しやすい安全管理ツールを用いてプラントのリスクを管理する必要がある。

## 4.3 異常時の安全確保

事故および故障発生時に、その事故および故障による影響を緩和し、プラントを安全に停止させるた

めの処置については事故時手順書に記されている。しかしながら、事故時手順書は、原則として安全系補機が全系列（或いは全台）使用可能状態であることを前提として記されている。

一方、OLM 実施時には安全系補機が1系列（或いは1台）待機除外されており、通常時とは異なった処置が必要である。ここでは、OLM 中の事故時の安全性を確保するという観点から、事故時手順書で新たに考慮すべき事項について検討を行った。

#### 予備機がない機器の故障時

異常発生時に本来は作動が期待されている機器であっても、待機除外されている機器は自動起動しない。そのため、代替手段を事前に検討し、事故時手順書に反映させておく必要がある。例えば、事故時手順書では、非常用母線の電源喪失時には DG が2台とも自動起動し、待機状態になったことを確認することになっている。その時、全停信号が発信し、安全系機器はシーケンシャル起動するが、DG の OLM 実施時には DG 待機除外側の母線は停電となるため、当該トレンから受電している機器はシーケンシャル起動しない。そのため、深層防護の観点から他のユニットからの電源融通等の代替手段を確立しておく必要がある。

#### 予備機がある機器の故障時

異常発生時には、予備機がある機器の場合、まず予備機を起動する。しかし、OLM 時には予備機が待機除外で使用不能の場合があるため、代替手段に期待することになる。そのため、代替手段を事故時手順書に反映させておく必要がある。

## 5. まとめ

我が国の PWR プラントを対象に出力運転中と停止期間中の PSA モデルを用いて定量的評価を実施し、リスクの観点から成立性を検討した。

まず、リスクの定量的評価を行う OLM 対象機器と OLM 実施範囲の検討を行い、OLM 対象として ECCS 系や工学的安全設備のポンプや熱交換器と非常用電源系等のサポート系のポンプ類を評価対象として選定した。

次に、選定された OLM 対象のシステム / 機器を待機除外とした場合について、OLM 評価用に改良

したRISKMANコードを用いて炉心損傷頻度を評価し、管理目標への適合性検討のための評価マトリックスを求めた。その結果、OLM対象機器に10日ずつOLMを実施した場合、OLM機器の組み合わせによっては、著しいリスクの増大を伴わないことが確認された。また、対象とした全ての機器に順次OLMを実施した場合でも、その炉心損傷頻度は、OLMを実施していない場合と比較すると約6割程度の増加にとどまった。また、出力運転中にOLMを実施したことによる停止期間中のリスク低減効果について、RISKMANコードの停止期間中のモデルを用いて炉心損傷頻度を評価した。その結果、機器の待機除外となっている期間が待機期間となることによって、停止期間中の炉心損傷頻度は約5割低減した。出力運転中のリスクの増加と停止期間中のリスクの低減効果を総合するとOLMによるリスクの増加はそれほど大きくないことが分かった。

一方、OLMを実施する上で、安全を確保するために事前に実施計画と操作手順を作成し、文書化しておく必要があることがわかった。これらをOLMを実施するための専用の手順書とするのも一案であ

る。

本研究の成果として、我が国でも適切なリスクマネジメントにより、リスクの観点からはOLMを実施できるとの見通しを得たが、今後は現行の基準への適用性、深層防護確保のモニタリング方法、経済的効果などに関する総合的な検討と実施手順の具体化を図る必要がある。

## 文献

- (1) C.Rick Grantom, On-line Maintenance and Configuration Risk Management at South Texas Project, American Nuclear Society Executive Conference, September 1996
- (2) D.True, K. N. Fleming, et al., The Importance of a Blended Approach in PSA Applications, PSA'96, September 1996
- (3) Electric Power Research Institute, PSA Application Guide, EPRI TR-105396, Project 320 0-12, Final Report, August 1995