

## 米国における原子力規制と保全 － (2) 保守規則とその対応内容 －

伊藤 邦雄 Kunio ITO

日本エヌ・ユー・エス株式会社 エネルギー技術ユニット

### 1. はじめに

近年における米国原子力発電所の高稼働率をもたらした理由の一つとして、発電所保守プログラムの向上が上げられる。本稿では、前号（(1)原子力規制体系と保守関連の規制）に引き続き第2報として、米国原子力発電所の保守規則と産業界の対応内容について、特にその背景にあるパフォーマンス・ベース規制の考え方に重点をおいて概説する。

### 2. パフォーマンス・ベースの規制

米国では近年、いわゆるリスク情報に基づくパフォーマンス・ベースの規制の取り込みが盛んになってきている。米国原子力規制委員会（NRC）は1999年3月16日付で、このリスク情報に基づくパフォーマンス・ベースの規制に関してNRCが期待するところと、各種の関連用語の定義を示した白書を発行している<sup>(1)(2)</sup>。それによれば；

- ・ NRCの現行の規制体系、ガイダンス及び認可条件は、主に決定論的解析に基づいており、また規範的な要件に基づいて実施されている。
- ・ これまでの決定論的な規制アプローチによって、放射性物質の使用において公衆の健康と安全に不当なリスクを課さないことが保証されてきたが、改善も可能である。
- ・ 規制対象となる施設や活動は広範囲に及んでいるが、リスク上重要な機器や活動に焦点を当て、一貫した規制の枠組みを保証することにより、規制の強化とリソースの適正な配分が可能となる。
- ・ リスク解析手法の進歩や事象データの蓄積などから、リスク上の知見を規制プロセスに一層明確に導入することにより、現行の規制プロセスの効率と有効性を改善することができるようになった。
- ・ リスク情報に基づく手法を適用することにより、純粋に決定論的な手法における不必要な保守性を低減

したり、決定論的解析で保守性が不十分な部分を特定して追加の要件や規制上の対応の根拠を示すことができる。

この白書によれば、一般に規則は規範的（prescriptive）なものと、パフォーマンス・ベースのどちらかに分類される。規範的な要件では、要求される目標を達成する方法として、設計または手順に含められるべき特定の機能、作業、またはプログラム項目を規定する。これに対してパフォーマンス・ベースの要件では、測定可能な（あるいは計算可能な）結果（即ちパフォーマンスの結果）への適合が要求されるが、その適合の方法までは規定されず、事業者側での柔軟な対応が認められている。

パフォーマンス・ベースの規制は、規制上の意思決定に関する主要な根拠としてパフォーマンスと結果を設定するもので、以下の特徴を持つ。

- 1) 発電所と事業者のパフォーマンスをモニターするために、測定可能な（あるいは計算可能な）パラメータ（物理パラメータの直接測定値、あるいは当該パラメータを計算できる関連パラメータの測定値）が存在する。
- 2) リスク上の知見、決定論的解析、あるいはパフォーマンス履歴に基づいて、パフォーマンスを評価するための客観的な基準が存在する。
- 3) 設定したパフォーマンス基準にどうしたら適合できるか決定する上で、事業者が柔軟性を有していて、結果の向上につながる可能性がある。
- 4) 望ましくはないが、パフォーマンス基準に適合できなくても、それ自体が直ちに安全上の懸念にならない枠組みが存在する。

パフォーマンス・ベースのアプローチは、完全に規範的なアプローチと、事業者側に無制限の柔軟性を与えるアプローチとのいわば中間に位置する。この規制アプローチは、保守規則（10CFR50.65）がその最初の適用で、その他に格納容器漏洩率試験規則（10CFR50

附則 J のオプション B)、放射線防護規則 (10CFR20) などでも最近採用されている。このアプローチは、リスク上の知見がなくても適用可能であるが、その場合には客観的なパフォーマンス基準が決定論的安全解析と運転パフォーマンスの履歴に基づく必要がある。

パフォーマンス・ベースのアプローチの利点の一つは、事業者柔軟性が与えられることである。設定したパフォーマンスを満足する結果が得られれば、それを達成するための方法は問われない。規制側の検査においては、パフォーマンスが低下傾向にある設置者に対してより注意を集中できるというメリットがある。

### 3. 保守規則への対応内容

前号で紹介したように、米国NRCは、1980年代に米国の原子力発電所の保守を向上するため規制強化の必要性を認識し、1991年に10CFR50.65「原子力発電所の保守の有効性監視に関する要件」(通称：保守規則)を公表した。その条文は、(a)(1)~(4)項及び(b)項からなる非常に簡潔なもので、いわゆるパフォーマンス・ベースの考え方が取り込まれている(第1報の表-4参照)。

また、産業界の代表であるNUMARCは保守規則実施のためのガイダンスとして、「原子力発電所の保守の有効性監視に関する産業界のガイドライン」(1993年5月付、NUMARC 93-01)を作成している(最新版は、2000年7月付Rev.3)<sup>(3)</sup>。このガイドラインに示される保守規則実施のブロックダイアグラムを図-1に示す。

以下に、米国の電気事業者が本ガイダンスに従って保守規則対応を行う場合の主要なプロセスについ

て、事例を交えて説明する<sup>(4)</sup>。

#### 3-1) 規則の対象範囲に含まれる構築物、系統及び機器 (SSC) の決定

全ての安全関連SSC (Structure, System, or Component)、及び非安全関連SSCのうち図-1に示される条件のいずれかに該当するものが、保守規則のスコープ内に入る。各SSCの取り扱いについては、一般に上位の機能レベル、即ち系統あるいは構築物レベルで判断するものとし、個々の機器レベルまで掘り下げた評価は作業が大変になるとして避けるのが通例である。系統や構築物がスコープ内かどうかの判断を行う場合には、一般にそれらが有する機能の明確化が行われる。

ある発電所では、保守規則適用の検討対象候補として171のSSCグループ(そのうち22は構築物)を同定し、スコوپング作業を行った。その結果、124のSSC(全体の72.5%)が保守規則の対象内に含まれると決定した。そのうち、安全関連のSSCは60、非安全関連機器だが他のスクリーニング基準に合致したSSCは64であった。SSCのスコوپング(対象範囲決め)の例を表-1に示す。

#### 3-2) 「リスク上重要な」SSCのセットの決定

スコープ内のSSCがリスク上重要かどうか判断される。その判断においては、確率論的リスク解析(PRA: Probabilistic Risk Analysis)で計算されるリスク重要度指標を用いるとともに、プラント職員からなる専門家パネルの判断により最終確認される。用いられる代表的なリスク重要度指標とそのしきい値には、以下のものがある。

- ・ SSCに関するリスク低減価値 (RRW)<sup>(注1)</sup> > 1.005

表-1 SSCのスコوپング例

系統番号	系統名称	スコープ内か?	リスク上重要か?	待機状態か?	安全関連か?	事故を緩和するか?	EOPで使用されるか?	安全関連機能を妨げるか?	スクラムをもたらすか?
144	復水系	Y	N	N	N	Y	Y	N	Y
145	給水系	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Y
164	原子炉再循環系	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Y
167	振動及びループモニタリングシステム	N	N	N	N	N	N	N	N
1991	一次格納容器クレーンとエレベータ	N	N	N	N	N	N	N	N

(注) EOP: 緊急時操作手順書

注1: 次頁参照



- ・ SSCに関するリスク達成価値 (RAW)<sup>(注2)</sup> >2.0
- ・ SSCの故障が、炉心損傷頻度 (CDF) の90%を占める炉心損傷カットセット<sup>(注3)</sup>に含まれる。

その他Fussell-Veseleyの重要度を用いることもある。

前述の発電所の場合、スコープ内の124のSSCのうち、34のSSCがリスク上重要なSSCに特定された(保守規則対象の27%、全てのSSCの20%にあたる)。リスク上重要な構築物は格納容器のみであった。安全関連の60のSSCのうち、30のSSCはリスク上重要ではないSSCであった(安全関連SSCの50%)。

図-2に、保守規則スコープ内のSSC、リスク上重要なSSCなどの関係を示す(上記とは別の発電所の例であるが、それらの関係は同様である)。

### 3-3) パフォーマンス基準の設定

リスク上重要なSSC、及び待機機能を有するリスク上重要でないSSC<sup>(注4)</sup>については、SSCレベルでパフォーマンス基準を設定し、リスク上重要でないSSCに対してはプラント全体のパフォーマンス基準を設定する。これは、リスク上重要なものはきめ細かに、そうでないものはより大きなレベルで監視するという考え方である。実際に使用されているSSCレベルのパフォーマンス基準には、アベイラビリティ<sup>(注5)</sup> / アンアベイラビリティ、信頼性(故障率)、あるいは(設備の)状態がある。

例えば、PRAで採用した仮定と同じ値であるという理由から、ある系統のアベイラビリティを95%に維持

したい場合は、この95%という数値がパフォーマンス基準となる。パフォーマンス基準を満たさない場合は、保守規則(a)(1)項対応での目標値を95%と同じあるいはそれ以上に設定する。またパフォーマンス基準としての状態の例としては、配管系の肉厚をASMEコード(セクションXI)の規定に適合させる、というものがある。この場合、適正な肉厚の許容値を設定し、超音波試験や他の方法を使ってそれを監視する。信頼性は故障率で表わされ、特にその故障が「保守によって予防可能な機能故障(MPFF: Maintenance Preventable Functional Failure)」かどうかが目される。パフォーマンス基準の具体的な値の設定は、発電所側に任されているが、自社及び産業界の運転経験とプラント個別PRAでの仮定などが参考にされる。アンアベイラビリティについては、PRAで用いる仮定に対して裕度を持たせることが多い(通常2倍)。

あるBWR発電所におけるSSCレベルのパフォーマンス基準の数値の導出の例を図-3に示す<sup>(注6)</sup>。

また、これとは別のPWR発電所の原子炉冷却系に対するSSCレベルのパフォーマンス基準の例(系統機能解析を含む)を表-2に示す。SSCレベルのパフォーマンス基準には、表-2の中の基準PC-1やPC-2のように系統レベルで設定されるものもあれば、同表の基準PC-3のように機器レベルのものもあることが読み取れる。

プラントレベルのパフォーマンス基準の代表的なものには、次のものがある。

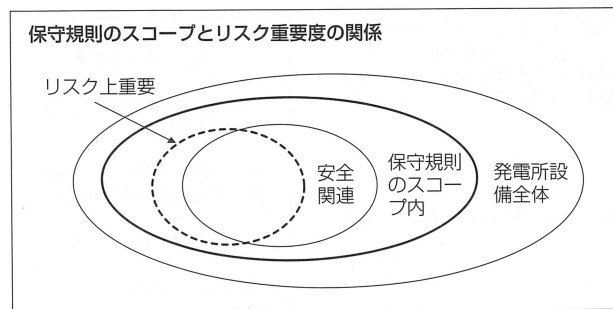
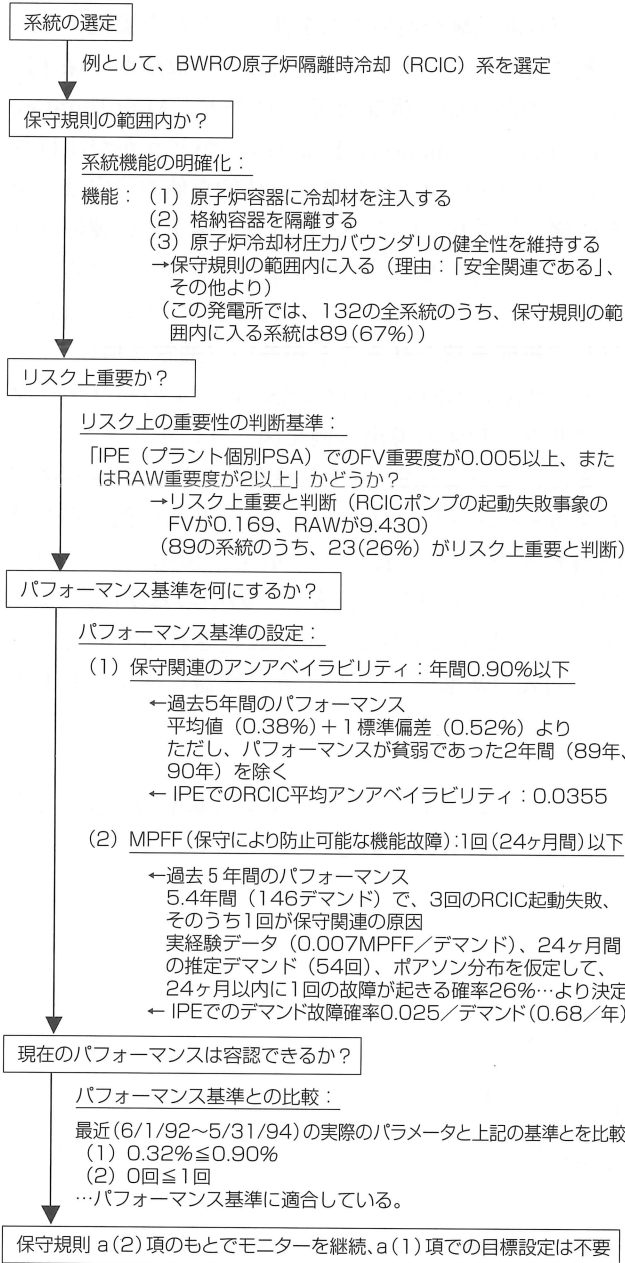


図-2 保守規則の対象となるSSCの関係<sup>(4)</sup>

注2: リスク増加価値 (RAW: Risk Achievement Worth) : SSCが全ての故障モードで故障すると仮定された場合のリスクの増加分  
 注3: フォールトツリー解析において、頂上事象を発生させる基本事象(これ以上は展開しない基となる故障事象)の組み合わせ。  
 注4: 待機状態にあるSSCのパフォーマンスはデマンド時や試験時などにしか分からないため、プラントレベルの基準はパフォーマンスの指標や目安としては適切ではない、との考えによる。  
 注5: SSCの所定機能が要求される総時間のうち、SSCが当該所定機能を果たすことができる時間の割合。  
 注6: この実例は、比較的初期の対応例であり、NRCの承認を受けているかどうかまでは未確認である。具体的なイメージを伝えるために引用した。



- ・ 7,000臨界時間あたりの計画外原子炉自動スクラム回数<sup>(注7)</sup>
  - ・ 安全関連システムの計画外の作動回数
  - ・ 計画外の出力喪失係数<sup>(注8)</sup>
- ある発電所におけるプラントレベルのパフォーマンス基準の例を表-3に示す。



プラントレベルのパフォーマンス基準は、SSCレベルの基準ほど直接的にPRAとはリンクしていない。設計、運転履歴、発電所の年数などを考慮に入れ、発電所として満足できないレベルのパフォーマンスをベースにして、最終的には管理者によって承認を受け決定されることが多い。

表-2 SSCレベルの機能解析とパフォーマンス基準の例(PWR原子炉冷却系(RCS))

保守規則対応で扱う機能	
No.1	RCS圧力バウンダリ機能の提供(1次冷却材ポンプシール及び蒸気発生器伝熱管を除く)
No.2	デマンドに対する加圧器逃し弁(PORV)の開閉及び自動操作(この機能には、不適切なPORVの開操作も含む)
No.3	PORVの開あるいは漏洩を隔離するPORVブロック弁の開操作及びデマンドに対する再開
No.4	加圧器安全弁(PSV)によるRCS過圧保護機能の提供
No.5	RCSインベントリを維持するためのRCS隔離機能の提供
(No.6~11:省略)	
No.12	遠隔停止に関する表示の提供(制御室外での表示が完全に喪失した場合を機能故障と定義する)
パフォーマンス基準(PC)	
PC-1	0.5gpmを超えるRCSからの確認できない漏洩を0回にする。
PC-2	ユニット当たり2年間で0.5gpm以下のRCS圧力バウンダリからの確認できない漏洩を3件未満にする。
PC-3	PORVのアンアベイラビリティをユニット当たり2年間で100時間未満にする。
(PC-4~10:省略)	
PC-11	リスクに関連しない機能No.5,6,9,11,12の機能故障をユニット当たり2年間で3回未満にする。

表-3 プラントレベルのパフォーマンス基準の例

プラントレベルのパフォーマンス基準	基準値(ある発電所の例)	全米の実績値(参照用)
7,000臨界時間あたりの自動トリップ回数	1	0.44
1,000臨界時間あたりの機器故障による計画外停止割合	0.20	0.18
安全系の故障回数(ノ2年)	2	4
計画外の出力喪失割合	3.5%	4.2%
計画外の安全系の起動回数(ノ2年)	1	-

注7: NUMARCガイダンスでは自動スクラムとしているが、NRCはこれに手動スクラムを含めるよう指摘している(Reg. Guide 1.160, Rev. 2)<sup>(5)</sup>。

注8: 計画外出力喪失係数とは、最大エネルギー生産量のうち、計画外エネルギー喪失(計画外停止、強制停止、停止の延長あるいは負荷低減など)のためにプラントが送電網に供給できない量の割合である。少なくとも4週間前に予定されたものではないエネルギー喪失は、計画外と見なされる。

### 3-4) パフォーマンスの監視及び目標の設定

設定した基準に対して、プラント及びSSCのパフォーマンスを監視する。基準を満足しない場合には保守規則(a)(1)項での目標設定の必要性を評価し、原因究明や是正措置の実施など必要に応じた対策を実施する。

産業界のガイドライン(図-1)に紹介されている考え方は、保守規則で要求される目標の設定や監視は(a)(1)項対応の一環として行い、予防保全(PM: Preventive Maintenance)やパフォーマンス監視活動を(a)(2)項対応の一環で行うというものである。保守規則の適用範囲内に属する全SSCは、正式な予防保全プログラムに組み込むか、固有の信頼性があるとして管理するか(巡回点検時の目視検査で既存の要件を満たしていることを確認する)、あるいは故障するまで稼働させることができる(系統の安全機能にほとんど或は全く寄与しない、という理由で)。即ち、保守規則のスコープ内のSSCの全てについて予防保全が必要になるというわけではない。予防保全プログラムとしては、定期保守/検査/試験、予知保全/検査/試験、故障の傾向分析などがあるが、その選択は事業者に行われている。

パフォーマンスの監視の結果、以下の状態が見出された場合には、(a)(1)項の下で目標設定の必要性が評価される。

- SSCレベルの個別のパフォーマンス基準を満足していない。
- プラントレベルのパフォーマンス基準を満足していない。
- 保守によって予防可能な機能故障(MPFF)が繰り返し発生している。

プラントレベルのパフォーマンス基準を満たしていない場合は、その原因究明を行い、保守規則の適用範囲内に含まれるSSCの故障が原因であるか確認し、もしそうならば、この故障がMPFFであるかを確認する。MPFFが原因であった場合には、SSCレベルの取り扱いが必要となり、目標の設定と監視措置が取られる((a)(1)項対応)。

このような(a)(1)項対応が取られるSSCは、いわば監視レベルが1ランク格上げされ、問題視されている状態である。いつまでもその状態が継続することは望ましくない。(このような産業界の考え方に対し、

NRC側の見解は少々異なる。Reg. Guide 1.160では、「規則ではこのようなアプローチは要求していない。全て(またはほとんど)のSSCが(a)(1)項に従うアプローチを選択してもよい」と述べている。)

### 3-5) 保守作業前のリスクの評価と管理

1999年7月の保守規則改定に伴い、「保守活動(サーベイランス、保守後試験、事後保全・予防保全など)を行う前に、提案される保守活動によって発生し得るリスクの増分を評価し、管理しなければならない」ことが要求された((a)(4)項;第1報参照)。NUMARCのガイダンス11章には、運転中及び停止中に保守を行う場合のリスク管理ガイダンスが記されている。その内容について紹介するのは、本稿のテーマではないため省略する。

### 3-6) 定期的な保守の有効性評価

目標、SSCパフォーマンス、改善措置の効果、SSCの可用性と信頼性のレビューなどを燃料交換サイクル間隔ごとに実施する。これには、以下の文書化作業が含まれる。

- ・ (a)(1)項に基づき考慮するSSCについての監視活動結果
- ・ 適合できなかったパフォーマンス基準あるいは目標の評価と、その原因究明ならびに講じた関連の是正措置
- ・ 効果的ではなかった(a)(1)項と(a)(2)項の是正措置
- ・ (a)(2)項から(a)(1)項に移行したSSCの概要とその根拠
- ・ (a)(1)項から(a)(2)項に移行したSSCの概要とその根拠
- ・ 可用性と予防保全との間の関係改善につながる保守活動の変更内容

なおNRCでは、事業者の保守規則対応状況の妥当性を規制検査により確認している。検査手順書としては、71111.12「保守規則の実施」及び71111.13「保守リスクの評価及び緊急作業の管理」などが用いられる。

## 4. まとめと考察

本稿で取り上げた、パフォーマンス・ベースの保守規則とその対応の特徴について以下に取りまとめる。

- ・ 米国保守規則は、そのタイトルが示すように、保守が有効に行われているかどうかを監視することを事業者を求めるものである。保守の方法を定めた規則ではなく、保守方法（点検間隔を含む）の選定は事業者委ねられている。予防保全プログラムの作成に当たっては、信頼性に基づく方法<sup>(注9)</sup>の検討が推奨されているが、義務付けられてはいない。
- ・ 保守が有効に行われているかどうかの監視は、予め定めたSSCレベルあるいはプラントレベルのパフォーマンス基準と実際の操業状況（パフォーマンス）の比較により行われる。
- ・ 系統や構築物レベルで言えば、発電所設備のかなりの部分（例えば70%ほど）が保守規則の対象範囲に含まれる。ただし、スコープ内にある全ての機器が予防保全プログラムの対象になるわけではなく、事後保全で対処可能なものも当然含まれる。
- ・ リスク上重要なSSCについてはSSCレベルでの監視が必要だが、そうでないものはプラントレベルで監視すればよい。SSCレベルでの監視でも、系統やトレインレベルの監視が多く、機器レベルで細かく監視されるものは少ない。（パフォーマンスの監視は安全性に相応した形で行われる。）
- ・ パフォーマンス基準を満足していない状態で直ちに問題になるわけではない。原因を究明し、是正措置を施すサイクルが適正に作用すれば問題はない。その際、その故障が保守によって防止可能であった（MPFF）かどうか重要視される。
- ・ パフォーマンス基準への適合は必ずしもゼロ故障を強いるものではない。プラント個別のPRAで用いられた信頼性データが参考にされている点から言えば、現行の発電所が持つリスクがその前提条件となっている、と言えなくもない。
- ・ 信頼性とアベイラビリティのバランスにも配慮しなければならない。予防保全のために機器を供用外にすることは、信頼性増加には役立つかもしれないが、その間アベイラブルではないことに留意しなければならない。分解点検の代わりに状態監視（ポンプの振動分析など）を行う方策も産業界ガイダンスでは推奨されている。

我が国において現在作成中の「原子力発電所の保守

管理規程（案）（JEAC 4209-2003）」<sup>(6)</sup>においても、米国の保守規則の考え方が参考にされている模様である。重要度に応じた保守管理、保守管理目標の設定などにおいては、本稿に示した米国流のアプローチが参考になると考えられる。

なお、米国保守規則対応のパフォーマンス基準については、「安全目標」やNRCが別途掲げる最上位の目標であるNRC戦略計画での「パフォーマンス目標」、及び規制検査の原子炉監視プロセス（ROP：Reactor Oversight Process）で導入されている「パフォーマンス指標（PI：Performance Indicator）プログラム」などと相互に関連させて考察するのも一考である。例えば、米国の発電所では最近いわゆる自主PIプログラムが導入されており、その中の設備健全性の分野では、健全状態の色分けのしきい値と保守規則のパフォーマンス基準をリンクさせている例も見られる。また、プラントレベルのパフォーマンス基準には、NRCのROPや産業界（INPO）のパフォーマンス指標（PI）と共通したものもある（例えば、ROPのPIには「計画外スクラム回数」や「安全系のアンアベイラビリティ」が含まれる）。このように保守規則とその対応は、発電所の幅広い分野の安全パフォーマンスの達成に密接に関連した活動の重要な一部分として位置付けられる。

## 参考文献

1. NRC News Release No.99-51, March 16, 1999
2. NRC Commission Voting Record, SECY-98-144, White Paper On Risk-Informed, Performance-Based Regulation, NRC, February 24, 1999
3. NUMARC 93-01, Rev. 3, "Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", July 2000.
4. 米国原子力発電所の保守高度化に関するセミナー（配布資料）、2002年11月14～15日、日本エヌ・ユー・エス株式会社
5. Reg. Guide 1.160, Rev. 2, "Monitoring The Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants", USNRC, March 1997.
6. 原子力発電所の保守管理規程（案）JEAC 4209-2003、（社）日本電気協会 原子力企画委員会  
（平成15年 8月 18日）

注9：信頼性重視保全（RCM：Reliability Centered Maintenance）などがこれに相当する。