

米国における原子力規制と保全 －(4)保守プログラムの最適化－

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

解説記事

1. はじめに

最近の米国原子力発電所の良好な運転パフォーマンスの背景となっている原子力関連の規制と保全について、これまで3回に分けて、(1)「原子力規制体系と保守関連の規制」、(2)「保守規則とその対応内容」、及び

(3)「運転中プラントに関わる各種規制要件」を紹介した。今回は最終第4報として、これまでに概説した規制の環境下で、米国における原子力発電所がどのようにして保守プログラムの最適化を図り、良好な運転パフォーマンスを達成しようとしているかに焦点をあてて概説する。

2. 保守プログラムの最適化手法

保守プログラムを最適なものにするための検討は、これまで米国の電力研究所（EPRI）を中心に研究・開発が行われ、各電力会社はその成果を利用してきている。その代表的な評価手法には信頼性重視保全（RCM: Reliability Centered Maintenance）があり、最近はその考え方を応用した様々な技術、ツールが開発・適用されている。

2-1) RCM

RCMとは、「対象となる施設の系統や機器が有する機能と各機器の故障が及ぼす影響を明確にし、安全上及び経済上重要な故障について、それに対処するために適用可能で効果的と考えられる保全作業を体系的に選び出す解析作業」のことである^[1]。

従来から設備の保全プログラムは、工学的な判断に基づき、主として決定論的な手法で作成されており、明確で定量的な根拠に基づいて定められたものとは必ずしも言えない。RCM評価手法は、信頼性やリスクの面から必要に応じて定量的な因子も考慮に入れながら、その設備に対してはなぜその保全方法が必要なのか、即ちあるべき保全プログラムの策定とその根拠を

明確化していくアプローチである。つまり、RCMは設備を構成する各要素に対して、図-1のように定義・分類される様々な保全方式のなかで、どの方式を適用すべきかを論理的に決定していく解析作業であり、設備の現状の安全性、信頼性を確保した上での、保全作業の最適化・合理化のための有効なステップとして認識されている。

図-1 保全の定義の分類 (JIS-Z 8115)^[2]

RCMは1960年代後半に米国の商業用航空機分野において、大型ジェット機（B-747）の開発に伴って誕生した。1980年代に入ると、EPRIが中心となって原子力発電所への適用が進められた。実証プログラムの結果、従来、主としてベンダーの推奨に従っていた保全プログラムのあり方が見直され、過剰な保全を行っていた部分や、逆に故障につながる重要な機器に対する予防保全が不十分であった部分などが見つかるところで、保守費用、信頼性、及び安全性に関する問題の解決を見ることができた。1990年代には数多くの米国原子力発電所での適用が広まったが、同時にその費用対効果が問題視されたため（解析にはかなりのマンパワーを必要とするため）、簡素化されたRCM手法（ストリームラインドRCM手法と総称される。2-2)節で解説。）がEPRIを中心として開発・適用された。なお、カナダ、フランス、その他多くの原子力発電所でもこのRCMが積極的に導入されており、EPRIでは原子力分野での経験を踏まえて、送変電設備や火力発電所への適用を積極的に進めている。また、ガスプラントや石油精製施設などの保全プログラムにもRCMが適用されている。

RCMの基本的な考え方は、前述の通りであるが、具体的な解析プロセスまで特に定義されているものではない。米国電力業界の初期のプロジェクトは、いわゆる機能ベースの標準手法（クラシカル手法）が用いられている（図-2参照）。

この標準手法は大きく分けて系統解析と保守解析の2段階で構成されており、前半部分の系統解析では、解析者は、どの機器が「クリティカル」な故障モードを有するかを決定する。クリティカルな故障モードとは、望ましくない故障影響をもたらすもので、それに対する予防保全が必要となるものをいう。そこでは、評価対象系統の機能と機能故障が決定され（機能故障解析（FFA：Functional Failure Analysis）と呼ばれる）、その次に、系統の機能故障を引き起こすクリティカルな機器の故障モードが決定される。その際、故障モード及び影響解析（FMEA：Failure Modes and Effects Analysis）またはフォールトツリー解析（FTA：Fault Tree Analysis）等の一般的な信頼性評価手法が用いられる。FMEAは、故障影響の検討を通してクリティカルとなる機器の故障モードを決定するために行われる定性的な評価手法であり、FTAは系統の機能故障を引き起こす機器の故障及びその原因

の検討を通してクリティカルな機器の故障モードを抽出する定量的な手法である。その発生可能性と故障の影響からみて、「望ましくない」影響をもたらす故障モードは一般に「クリティカル」とされる。「クリティカル」かどうかの決定は、最終的には解析者の工学的判断に任される。

後半部分の保守解析では、クリティカルな故障モード毎に最も起こりうる故障原因を選定し、その故障を発生させない、あるいはそれを検知する、またはその発生頻度を低減するために、適用可能でコスト効果的な作業を決定する。その保全作業の決定には、保全タスク選択ロジックツリーが用いられる（ロジックツリー解析（LTA：Logic Tree Analysis）と呼ばれる）。ここで、「適用可能」とは、その機器を保守するために技術的に適切と考えられるものを意味する。ある故障モード及び故障原因に対しては、技術的に適切な保全作業は数多く存在するが、その中で「コスト効果的な」タスクを選定する。EPRIの標準的なロジックツリーを図-3に示す^[3]。

EPRIのタスク選定ロジックにおいては、まずクリティカルな故障モードを予知するために、状態監視保全タスクの適用可能性が調べられる。状態監視保全

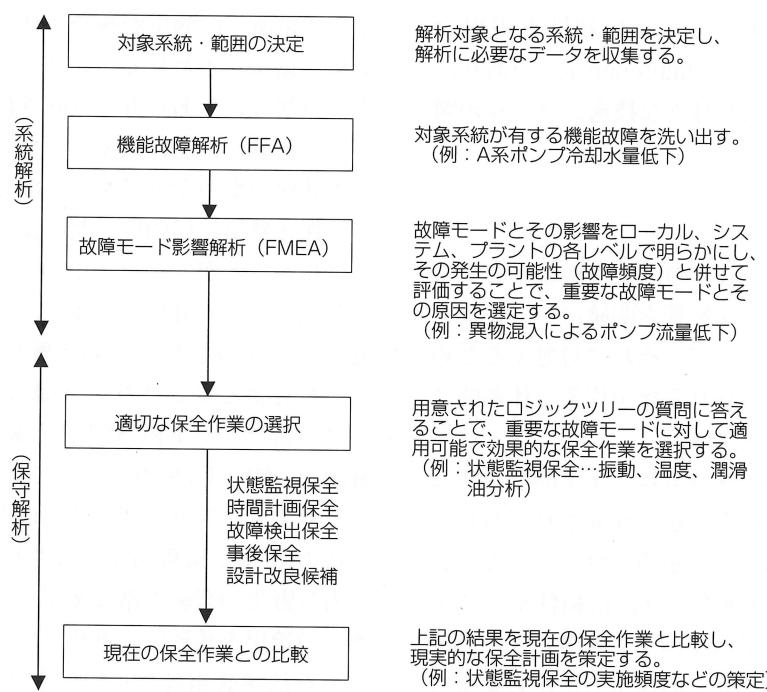


図-2 標準的なRCM解析の全体ステップ

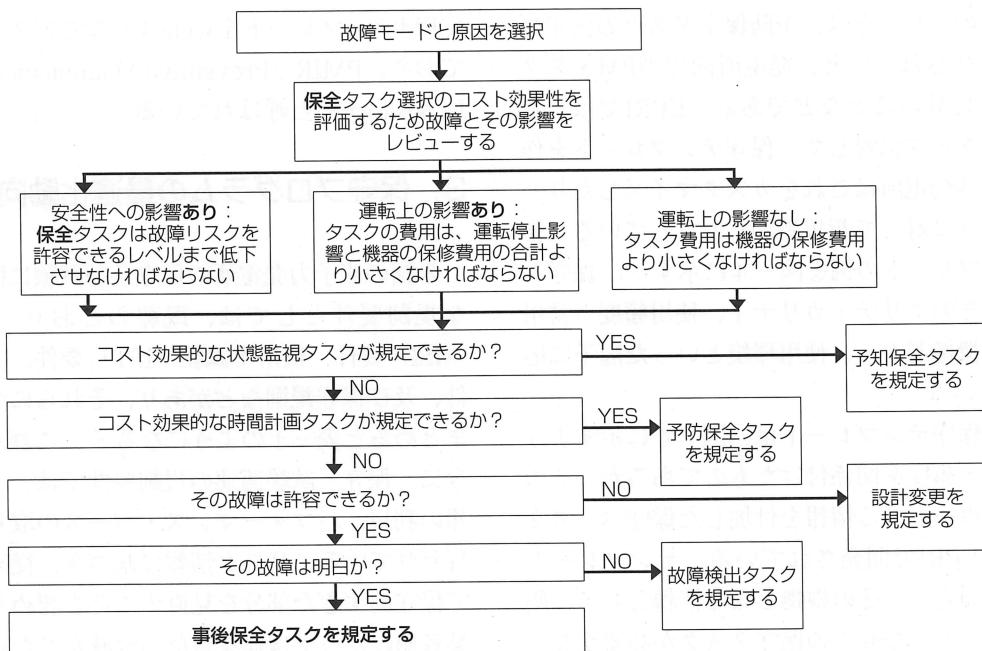


図-3 保全タスク選定のための標準的なロジックツリー (EPRI)^[3]

は、機器の健全性をモニターし、いつ予防保全を実施する必要があるかを予測するためのもので、例えば、回転機器の振動解析、潤滑油解析、サーモグラフィ（赤外線温度写真）などがある。状態監視保全タスクが推奨される場合は、監視と診断によって機器の破滅的な破損が始まる前に、軽微な故障が判明できなければならない。場合によっては、複数の状態監視保全タスクが選定される場合がある（例：潤滑油分析と振動分析の組み合わせ）。どのタスクも適切でなくコスト効果的でない場合、状態監視保全タスクは選択されず、次に時間計画保全タスクの適用性を調べる。このような保全タスクの適用可能性の判断は、当該機器の保全に最も詳しい専門家が行うことになるが、解析者の経験と知識に基づく工学的判断に頼るところが大きいのは言うまでもない。EPRIのロジックツリーで注目されるのは、状態監視保全タスクを時間計画保全タスクより上位においているという点である。

なお、RCMの適用における様々な課題とその解決策については別稿^[1]で解説しているのでそれを参照されたい。

2-2) ストリームライドRCM、PMO及び保守テンプレート

ストリームライドRCMは、標準的なRCMプロセスにおいて解析に手間がかかる部分を省力化するためにEPRIの研究プロジェクトで開発された手法で、各種の手法が存在している。例えば、機器のクリティカリティ判断を省力化するために、FMEAやFTAの代わりに、チェックリストを用いるといった方法である。最近、良く耳にするPMO (Preventive Maintenance Optimization) は、一つのストリームライドRCM手法として生まれた。RCMでは考えられる全ての故障モード解析を実施するのに対して、PMOでは経験から見て重要ではない故障モードは扱わないなど、解析の省略化が図られる。EPRIでは最近、このPMOをより広義の発電所保守最適化プログラムとして捉え、各電力会社にその導入を促している。

保守テンプレートは、RCMで課題となる保全タスクとその頻度の選定上の工学的判断を支援するものである。機器タイプ毎に、産業界の実績や事前の工学的検討によって推奨保全方式と頻度が決められている。これを作り出すまでの過程が大変重要であり、その労力は無視できないが、適用可能性が広いほど効果は絶

大となる。そのメリットは、予防保全タスクの決定プロセスが簡素化されること、発電所内でのPMタスクに一貫性をもたせることなどである。EPRIでは、約50種類の機器タイプに対して、保守テンプレートを作成しており、各発電所はこれをカスタマイズしたり、別の機器タイプに対して新規追加したりしている。初期の保守テンプレートの例を図-4に示す^[1]。保守タスクと頻度はそのクリティカリティ、使用頻度（常用系機器か、待機機器か）、使用環境といった因子に応じて変化している。

なお、この保守テンプレートは、図-4に示すように保守タスクと頻度を関係付けたものであるが、その内容を更にサポートする情報を付加した保守ベース文書が、やはりEPRIで開発されている。テンプレートにある情報に加えて、その根拠となる情報として、関連する劣化モード、なぜその保守タスクが必要かなどの情報が記されている。EPRIでは、メンバーに対し

てPMテンプレートをwebベースでアクセス可能にしており、PMIR (Preventive Maintenance Information Repository) と呼ばれている。

3. 保守プログラムの最適化動向

米国の原子力発電所の保守及び試験に関連した主要な規制要件としては、既報のとおり、供用中検査 (ISI) 要件、供用中試験 (IST) 要件、Tech. Spec. 要件、及び保守規則などがあり、それらについて現状をまとめると表-1のようになる^[5]。これから分かるように、保守・試験関連の規制要件では、一部リスク情報の利用、パフォーマンス・ベースの取り込みなどが行われている。リスク情報に基づき、従来の規制要件で保守的すぎた部分を見直すことを認めるもので、事業者側にとっては作業負荷の軽減がもたらされ、合理化が図れるメリットがある。また、パフォーマンス

機器タイプ：熱交換器									
[機器分類カテゴリ]									
クリティカルか？	YES	X	X	X	X				
	NO					X	X	X	X
使用環境	苛酷 [5]	X	X			X	X		
	苛酷ではない			X	X			X	X
利用頻度	頻繁	X		X		X		X	
	めったに使用されない		X		X		X		X
頻度								故障原因	
[状態監視保全]									
熱交換器の熱パフォーマンスのモニター。 対策レベル設定と傾向分析。	90d	90d	180d	180d	NA	NA	NA	NA	ファウリング、腐食、汚れの蓄積、障害物
ECTの実施。ベースラインの設定と結果の傾向 分析。[1] [3]	365d	365d	730d	730d	NA	NA	NA	NA	エージング / サイクル疲労、エロージョン、腐食、 ファウリング
規制に基づく目視検査	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	[6]	エージング、フランジ漏洩、ルーズバーツ、外面腐食
外観目視検査 [2]	OR	OR	OR	OR	OR	OR	OR	OR	エージング、フランジ漏洩、ルーズバーツ、外面腐食
[時間計画保全]									
分解、洗浄、及び点検 [4]	365d	365d	730d	730d	730d	730d	NA	NA	エージング、腐食、浸食、ファウリング、ルーズバーツ、 接合部の緩み、障害物、拘束物、部品故障
[故障検出のための試験タスク]									
なし	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
[その他のタスク（経済性を考慮）]									
事後保全	NA	NA	NA	NA	X	X	X	X	

- 注) 1. 状態に基づいて、伝熱管のサンプリング基準を設定し、その後の頻度も決定する。
 2. 運転部門での一般点検のクレジットもみてよい。
 3. 洗浄及び点検作業と同時に実施する。
 4. 類似の使用環境にある熱交換器の点検結果を反映し、状態に基づいた頻度を設定するようにする。
 5. Ni/Coの熱交換器は、苛酷な環境として扱う。
 6. 州法に基づき要求される場合のみ。

NA : Not Applicable OR : Operator Rounds (運転員による監視)

図-4 保守テンプレートの例（機器タイプ別の推奨保全の組み合わせ）^[1]

表-1 米国における保守／試験関連の規則及びガイダンス (NRCのHP^[5]などから作成)

項目	内容	対象	アプローチ	規制		産業界のスタンダード
				規則	ガイダンス	
ISI	溶接部の供用期間中検査	配管／容器 溶接部	従来	10CFR50.55a(g) ISI : ASME XIを参照	<ul style="list-style-type: none"> · Reg. Guide 1.147 (ASME XI :ISI) · Reg. Guide 1.174 : 一般的ガイダンス · Reg. Guide 1.178 : RI-ISI 	<ul style="list-style-type: none"> · ASMEコード/コードケース/NEIガイダンス、その他 · ASMEコードXI · 種々のASMEコードケース (Reg. Guide 1.147にて参照) · トピカルレポート (WCAP-14572及びEPRI TR-106706)
			リスク情報に基づく(RI-HSI)			
IST	ポンプと弁に対する供用期間中試験	ポンプ、弁	従来	10CFR50.55a(f) IST : ASME XIとOMコードを参照	<ul style="list-style-type: none"> · Reg. Guide 1.147 (ASME XI :ISI) · Reg. Guide 1.174 : 一般的ガイダンス · Reg. Guide 1.175 : RI-IST 	<ul style="list-style-type: none"> · ASME コードXI · 種々のASMEコードケース (Reg. Guide 1.147にて参照) · ASME OMコード · 種々のASME OMN コードケース (Reg. Guide 1.192で参照)
			リスク情報に基づく(RI-IST)			
Tech Spec	安全制限値・設定点、運転制限条件(LCO)、許容待機除外時間(AOT)、サービスインターバンス試験間隔(STI)などの規定	重要な系統 ・構造物・機器	従来	10CFR50.36	<ul style="list-style-type: none"> · 標準Tech.Spec. (NUREG報告書；ベンダー別) · Reg. Guide 1.174 : 一般的ガイダンス · Reg. Guide 1.177 : RI-TS (AOT, STI の緩和) 	
			リスク情報に基づく(RI-TS)			
保守規則	パフォーマンス基準に照らしたプラント稼働状態のモニター（系統、構造物、機器（SSC）レベルあるいはプラントレベルでの監視）、必要に応じた予防保全、事後保全の見直しオンライン保守など、系統の待機除外時のリスクの増分の評価及び管理	系統・構造物・機器	パフォーマンス・ベースリスク情報に基づく	10CFR50.65	<ul style="list-style-type: none"> · Reg. Guide 1.160 · Reg. Guide 1.182 	· NUMARC(NEI) 93-01、Rev.3

ベースの取り込みによって、保守方法については事業者側の柔軟なアプローチが可能である。

電力会社ではこのような規制環境下で保全プログラムの最適化を進め、パフォーマンスを維持した上で、保全タスクそして運転保守コストの低減を図ってきている。運転管理分野での自主的なプログラムには、予防保全プログラムとその最適化、状態監視プログラムの積極的な利用（予知保全への移行）、オンライン保守の積極的な実施、燃料交換停止期間の短縮、長期運転サイクルなどがあげられるが、その主な活動プログラムをまとめて表-2に示す^[4]。

また最近では、原子力エネルギー協議会(NEI)や原子力発電運転協会(INPO)の主導により、機器信頼性プログラムの導入が進められている^[4]。これは、下記に示す設備保全に関わる各種の要素を一つに統合した概念であり、発電所の関係者が長期の視野に立つて設備管理を効率的に進めることを意図している。

- ・パフォーマンス監視（系統／機器のパフォーマンス、傾向の予測、運転員の監視など）、
- ・予防保全(PM)の実施 (PM作業、観察された装置状態の文書化とフィードバック、保全後試験)、
- ・クリティカル機器のスコーピング（範囲決め）及び同定（スコーピング基準、重要機能の把握、クリティカル／非クリティカル機器／事後保全機器の把握）、
- ・是正措置（事後保全、原因究明及び是正措置、問題の重要度分類）、
- ・継続的な装置の信頼性向上 (PMテンプレートの開発及び利用、発電所及び産業界の運転経験に基づくPMタスクと頻度の継続的な見直し、PM技術ベースの文書化、代替保守方策の検討など)、
- ・ライフサイクル管理（系統及び機器の健全性に関する長期的展望と方策、改善措置の重要度付け、長期計画と経営戦略の統合）

表-2 電力会社の自主的な保守関連プログラムと規制要件との関係^[4]

保全関連プログラム	実施状況	関連する規制要件とその対応
予防保全プログラム	予防保全/事後保全の振り分けを含め、保守プログラムの内容（タスク/頻度）は、電力会社が自主的に決定し、必要に応じて見直しを図る。規制側への報告/承認は、原則として不要。 保守プログラムの最適化には、RCM、ストリームライドRCM、PMOプログラム、PMテンプレートなどが適用されている（電力会社の自主検討）。	保守規則のもとで、SSCの運転パフォーマンスを、 予め定めたパフォーマンス基準 に照らして監視し、基準に抵触した場合に必要な措置を実施する（保守規則a(1)項のもとでの監視の強化、不具合の原因分析などを含む）。
状態監視保全プログラム	振動分析、潤滑油分析、サーモグラフィなど、様々な状態監視技術を使って、不具合状態を早期に検知し、必要な保全措置をタイムリーに（運転中あるいは停止時に）施す。	同上 状態監視データは、 パフォーマンス基準 の一部に組み込まれる場合がある。
機器健全性レポート	状態監視プログラムの結果を定期的に（通常月1回）報告するもの。各機器の状態は健全状態からの逸脱度合いに応じて、色分けして示され、傾向把握を容易にする。System Health Reportは、SSCレベルのパフォーマンスを見るもので、やはり色分けして表示される。	同上
オンライン保守	格納容器内にあったり、運転中に保守できないものを除いて、全ての機器はオンライン保守計画に組み込まれる。 同じトレインの機器は、できるだけまとめて試験／保守するため、サーベイランス試験の間隔に合わせて12週間（3ヶ月）で一周するようなローテーションで、対象系統を振り分け、可能な保全作業を運転中に実施する。保守作業は、許容待機除外時間（AOT）及びリスク上の制限に従う必要がある。リスク評価は、定性的あるいは定量的（リスクモニターの利用など）に実施。 発電に影響する機器の場合、待機除外時の影響（トリップをもたらす可能性）を定性的、あるいは定量的に（トリップモデルの利用）評価する。	保守規則のa(4)項対応で、機器を供用外にした場合のリスクを評価し、管理する。 Tech.Spec.機器の場合、AOTの時間を超えない時間で保守する（通常はその半分程度の時間で済ませる作業を行う）。
燃料交換停止期間の短縮	運転中にできる保守作業は運転中に行うことで、停止時の保守作業をできるだけ減らし、燃料交換停止期間の短縮を図る。	保守規則対応で要求されるパフォーマンスの監視、リスク管理は停止中にも当てはまる。
長期運転サイクル	多くの発電所はTech. Spec. のサーベイランス間隔が18ヶ月ベースのため、18ヶ月運転が可能である。サーベイランス間隔を変更することで、24ヶ月運転に移行しているプラントもある。	Tech. Spec. のサーベイランス間隔以外には、サイクル期間を直接的に規定する要件はない。24ヶ月までサーベイランス間隔を延長する申請のガイダンスがNRCから出されている。

5. おわりに

これまで4回にわたって、「米国の原子力規制と保全」と題して、米国の保守関連の規則とその対応を中心に解説を行った。米国では第2報に示すように、保守規則に対応するために安全性に相応した形で発電所毎に目標を定め、日々の運転パフォーマンスを目標に照らして監視することで保守の有効性を確認するという仕組みが効果を發揮している。それは必ずしもゼロ故障を強いるものではなく、産業界の運転経験を反映しながら、発電所が有する安全性レベルの維持向上を図るという合理的なアプローチになっている。

この保守規則に代表される、米国で最近導入されているパフォーマンス・ベースのアプローチやリスク情報に基づく規制は、我が国においても関心度は高い。それらの導入にあたっては、その背後にある基本的な

規制要件及び米国産業界の実態を十分理解しておくことが重要であり、本稿がそのための一助となれば幸いである。

参考文献

- 伊藤邦雄、RCM（信頼性重視保全）による保全作業の最適化、PETROTECH（石油学会）、23-8 (2000)、57-63
- JIS-Z-8115 (1981)、信頼性用語
- EPRI-TR-100320、Reliability Centered Maintenance (RCM) Technical Handbook、1992
- 米国原子力発電所の保守高度化セミナー（配布資料）、2003年11月11,12日、日本エヌ・ユー・エス株式会社
- NRC Home Page ; <http://www.nrc.gov/>
(平成16年2月13日)