

リスクと保全：諸外国における原子力への適用実績

Risk and Maintenance : Application to Nuclear Power Plants in Foreign Countries

日本エヌ・ユー・エス株式会社

伊藤邦雄

Kunio ITO

Member

The application status of risk information in the area of operation and maintenance at US and European nuclear power plants has been reviewed. In the US, risk-informed activities have become ingrained in nuclear power plant operation and maintenance over the past 15 years, providing both safety and operational benefits. In addition to the many US plants, Risk-Informed inservice inspection (RI-ISI) and On-Line Maintenance have been utilized in many of the European nuclear power plants, especially at the plants whose safety design has additional redundancy.

Keywords: Risk-Informed, On-Line Maintenance, Risk Management Action, Technical Specifications, Allowed Outage Time, PRA, ISI

1. はじめに

欧米主要国の原子力発電所におけるリスク情報活用の実態を、特に、運転・保守分野について、関連規制を含めて概説する。

2. 米国の関連規制

米国では TMI 事故のあと確率論的リスク解析 (PRA) 技術が進展し、規制面においても従来の決定論的なアプローチを補完するものとして、リスク情報の利用が進められるようになった。

1995 年 8 月には、原子力規制委員会 (NRC) の規制において確率論的リスク解析 (PRA) をより一層活用していく方針が表明された^[1]。そこでは、全ての規制上の問題において、深層防護の原理を支持し、従来の決定論的なアプローチを補完するよう、そして最新の技術でサポートされる範囲で、PRA で得られる洞察をより多く使用していく、とされた。また、

- ・ PRA は現行の要件の不必要な保守性を低減するために、また、追加の規制要件の提案をサポートするために使用されること、
 - ・ 可能な限り現実的な評価とすること、そして、
 - ・ 新しい要件の提案及びバックフィットの必要性について規制上の判断を行う際には、不確かさを適切に考慮して、NRC の安全目標及び補助的な数値目標を用いること、
- という方針が示された。

現行の規則の多くは決定論に基づく規範的な要求事項からなっており、直ちに置き換え可能なものではない。従って、現行の規制要件を維持しつつ、一方でリスク情報を活用したパフォーマンスベースの規制を検討し導入していく、との考えの下で、リスク情報を活用した規制が進められてきている。

1998 年には、リスク情報活用の規制ガイダンスと

して、Reg.Guide 1.174 (許認可ベース変更の全般的基準) の他に、Reg.Guide 1.175 (ポンプ、弁の供用期間中試験 (IST))、Reg.Guide 1.176 (グレード別品質保証)、Reg.Guide 1.177 (Tech. Spec.)、Reg.Guide 1.178 (配管の供用期間中検査 (ISI)) が公表された。そこでは、以下の原則を満たせば、リスク情報を活用して各発電所の認可ベースを修正できることになった^[2]。

- ・ 提案された認可ベースの変更が、現在の規制に適合していること
- ・ 深層防護の概念を維持していること
- ・ 十分な安全裕度を維持していること
- ・ 認可ベースの変更による炉心損傷頻度やリスクの増加は小さく、NRC の安全目標政策声明書の主旨に合致していること
- ・ 認可ベースの変更による影響は、パフォーマンスの測定により監視されること

リスクの増分に関する許容ガイドラインは、炉心損傷頻度 (CDF) と早期大規模放出頻度 (LERF) について規定される (CDF については図 1 参照)。そして、リスク評価と工学的評価から、総合的に評価され、認可ベースの変更の可否が最終決定される (図 2 参照)。

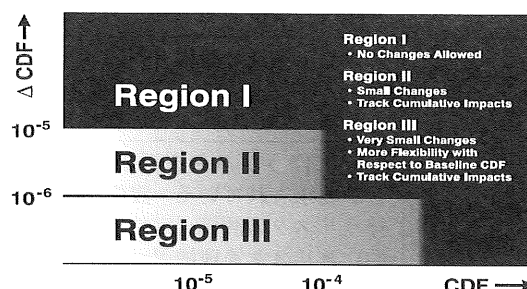


図 1 炉心損傷頻度 (CDF) に関する許容ガイドライン (Reg. Guide 1.174) ^[2]

連絡先: 伊藤邦雄, 〒195-0072 東京都港区海岸 3-9-15, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 電話: 03-5440-1862, E-mail: itohk@janus.co.jp

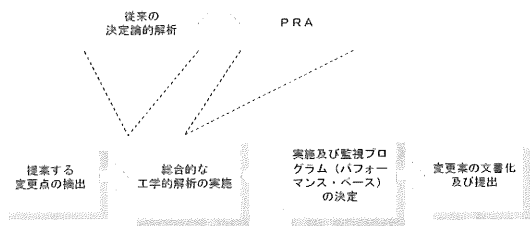


図2 リスク情報に基づくプラント個別の意思決定プロセス (Reg. Guide 1.174)^[2]

リスク情報の適用分野としては、NRCによる原子炉監視プロセス (ROP)、保守規則対応、Tech. Spec. (サーベイランス試験間隔、許容待機除外時間など)、供用期間中検査 (ISI)、格納容器漏洩率試験、品質保証要件/安全クラス分類などがある。また、関連規制として、以下のものが制定されてきている^[3]。

- ・ 保守規則 (原子力発電所の保守の有効性を監視するための要件) (10CFR50.65 : 1991年制定、1999年改訂)
- ・ 可燃性ガス制御要件 (10CFR50.44 : 2003年改訂)
- ・ 機器の重要度分類 (特別な取り扱い要件) (10CFR50.69 : 2004年公表)
- ・ 格納容器漏洩率試験 (10CFR50 附則 J : 1995年改訂)
- ・ 火災防護規則 (10CFR50.48 (c) : 2004年改訂)
- ・ ECCS 規則 (10CFR50.46 : 検討中)

リスク情報の適用分野ごとに、リスク情報がどのように活用されているかについて以下の表に取りまとめた^[3]。

表1 運転保守分野でのリスク情報の活用方法

適用分野	リスク情報の活用方法
NRCによる原子炉監視プロセス (ROP)	NRCによる規制検査では、リスク上重要な設備状態や事象に主眼が置かれる。指摘事項の重要性は、リスク重要度に応じて色分けされる (重要度決定プロセス (SDP))。パフォーマンス指標 (PI) のしきい値設定にリスク情報を活用。事業者側は、SDPクロスチェックを実施。
保守規則対応 : (a) (2) 項	リスク上重要な設備 (SSC) に対しては、運転パフォーマンスの監視単位を細かくする (SSCレベルでの監視)
保守規則対応 (a) (4) 項	保守に伴うリスクを評価し管理することが要求されている。設備の待機除外に伴うリスクの評価 (定性的あるいは定量的) とリスク管理措置が必要。これを満たせば、運転中保全が実施可能。
Tech. Spec. (主要な適用例)	最終状態の変更 : 運転制限条件 (LCO) 逸脱時に、冷態停止ではなく、リスク評価した上で温態停止に移行可とする。

Tech. Spec. (主要な適用例) (続き)	未実施のサーベイランス試験について、リスク評価及び管理した上で次回の試験時まで延期する。
	設備が故障した場合に、リスク評価及び管理した上で、運転モードを下げずに復旧措置を実施できるようにする。
	リスク情報を活用して許容待機除外時間 (AOT) を延長する (例、非常用 DG の AOT を3日から14日に延長)。
	LCO逸脱時に、コンフィグレーションに応じたリスク評価モデルを使用して、AOTの延長の適否を判断。リスク管理 Tech. Spec. と呼ばれる。
	リスク情報に基づいてサーベイランス試験間隔を延長する。
	サーベイランス頻度を事業者管理文書に移す。頻度はリスク情報に基づき設定し、NRCの事前承認を不要とする。
供用期間中検査 (ISI)	配管溶接部の検査箇所を、従来の決定論ではなく、リスクの大きさに基づいて選定することで、検査箇所/被ばく線量の低減につなげる。EPRI手法とWOGの手法がある。
格納容器漏洩率試験	1995年に規則が改定され、過去のパフォーマンスに応じて試験頻度が延長できるようになった。
品質保証要件・安全クラス分類	従来の安全関連という分類に加えて、リスク重要度に応じた設備の重要度分類を認める。安全上の重要度が低ければ、安全関連の設備でも、特別な取り扱い要件 (供用期間中試験 (IST)、品質保証など) が免除される。

3. 米国の適用状況

保守分野へのリスク情報活用の実践として、保守規則への対応とリスク情報を活用した供用期間中検査 (RI-ISI) を取り上げた^{[4],[5]}。

事業者の保守規則への対応においては、リスク上重要な設備 (構築物、系統、機器 : SSC) の確認とパフォーマンスの監視に、リスク情報が利用されており、(運転中、停止中ともに) 保守作業時のリスクの評価と管理のために、定性的/定量的リスク評価が利用されている。停止時保守のリスク評価は、深層防護 (DID) の観点から定性的評価が、また運転中の保守作業のリスク評価ではコンフィグレーションに応じたリスクを計算するモデル (リスクモニター、図3参照) が使用されている。安全系の設備の場合、許容待機除外時間 (AOT) の制限を遵守することは言うまでも無いが、計画段階では AOT の概ね 50%以内で作業を計画するのが慣例である。

運転中の保守作業時にリスク管理措置 (RMA) が必要になるかどうかの判断は表2に示すしきい値が使用される。

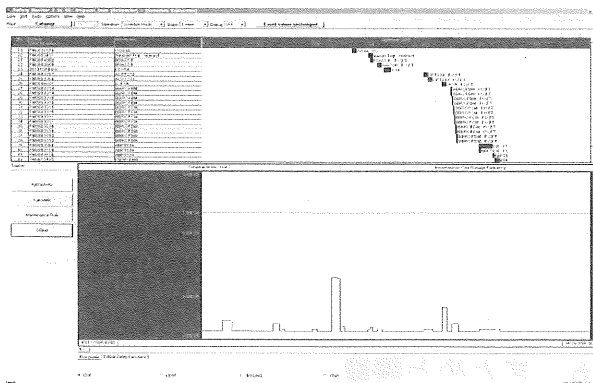


図3 リスクモニターの画面表示例^[4]

表2 リスク管理措置 (RMA) アクションのしきい値 (NUMARC 93-01) ^[4]

炉心損傷確率の増分	対策	早期大規模放出確率の増分
> 1E-5	自主的には保守を実施しない	> 1E-6
1E-6 ~ 1E-5	定量化できない要因を評価 リスク管理措置の実施	1E-7 ~ 1E-6
< 1E-6	通常の保守作業管理	< 1E-7

リスク管理措置 (RMA) としては、作業スケジュールの短縮、再調整、ヒューマンエラー発生確率の低減 (特別な訓練や手順書の作成、管理者の関与) といったリスク低減措置や、不測事態対応計画の作成 (例、代替システムの使用計画、代替措置のための運転員の配備、待機設備の事前試験)、あるいは運転状態の変更 (例、バックアップシステムの運転、リスクを増大させる可能性のある作業の最小化) といったリスク相殺措置が、リスク増分の大きさに応じて取られる。

米国ではこのような保守規則への対応によって、発電所の関係者全体で保守作業のリスク影響への注目が増加するとともに、運転中保全の活用によって、柔軟な保守作業スケジュールの立案、停止時の複雑な作業の低減、保守作業の品質向上といった便益が得られている。

なお、運転中保全に伴うリスク影響に関する NRC の規制上の見解は以下のような経緯をたどっている。

- 運転中に実施される保全の量と頻度が増加していることが、NRC の調査から判明 (1994 年)。特に、Tech. Spec. の許容待機除外時間 (AOT) を守った上で、複数の設備を同時に保守のために供用外にしている事例が見られた。AOT は、一つの系統内でランダムな単一故障の発生を想定したものであって、同時に複数の装置が供用外にされる場合の条件を規定するものではない、と認識。
- 1994 年 10 月、事業者に対して、「Tech. Spec. に従ってシステムの保全を行っても良いが、同時に複数の系統に保全を行う場合には、安全性への影響を総合的に評価する必要がある。」との通知を発行。
- 1991 年制定の保守規則で、保守作業時のリスク

評価・管理の要件を規定 (1999 年の改訂で、推奨ベースの記述を変更し、義務付け)。

RI-ISI は、従来の ASME Sec XI に基づく決定論的なアプローチではなく、配管の破損確率と破損時の安全上の重要度に応じて検査方法を設定するもので、EPRI (米国電力研究所) 手法と WOG (Westinghouse 社製 PWR のオーナーズグループ) 手法が開発されている。WOG 手法は EPRI 手法に比べてより定量的な評価手法を、特に配管の破損確率評価について採用している。WOG によるリスク情報に基づく配管 ISI の見直しプロセスについて、図 4 に示す。

評価対象システムに含まれる配管セグメントは、破損による安全上の影響と、破損確率の二つの視点から 4 グループに分類される (図 5 参照)。第 1 グループは安全上の影響が大きく、破損確率も高い第 I 象限の部分である。第 2 グループは安全上の影響は大きい、破損確率の低いグループであり第 II 象限の部分。第 III 象限は安全上の影響は小さいが破損確率の高いグループ。第 IV 象限は両者とも小さい、もしくは低いグループである。なお第 I 象限は更に、破損確率が特に高いと評価されたグループ (A) とそれ以外のグループ (B) の二つに分けられる。各象限で () で示した数字は、サリー発電所 1 号機で分類した場合のセグメント数である。この 4 分類にあたっては、社内エキスパートチームが定量的な検討をベースに定量的検討では考慮されなかった様々な事項を含めた総合的な検討を加えている。

WOG 資料によれば、WOG 手法の適用によって検査の件数が、約 65%~80%削減される (図 6) ^[5]。また、それに伴って作業時の被ばく線量も低減でき、10 年間の検査間隔にわたって合計で、60~75 レムの節約につながるとされている。

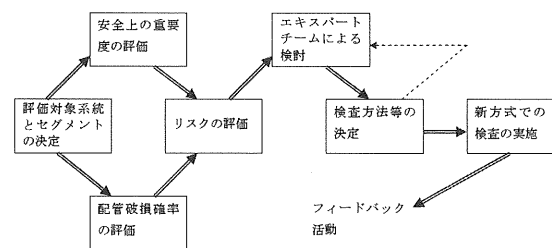


図4 WOG によるリスク情報に基づく配管 ISI の見直しプロセス (ICONE 10-22732) ^[5]

破損確率	事業者が検査プログラムの中で決定		
	高	(A) 全数検査	(B) サンプル検査
低	第 III 象限 (153 セグメント)	第 I 象限 (70 セグメント)	サンプリング検査
	第 IV 象限 (254 セグメント)	第 II 象限 (38 セグメント)	
	破損の安全影響: 小	破損の安全影響: 大	

図5 検査方針検討マトリックス (数字は、Surry-1 のセグメント数) (ICONE 10-22732) ^[5]

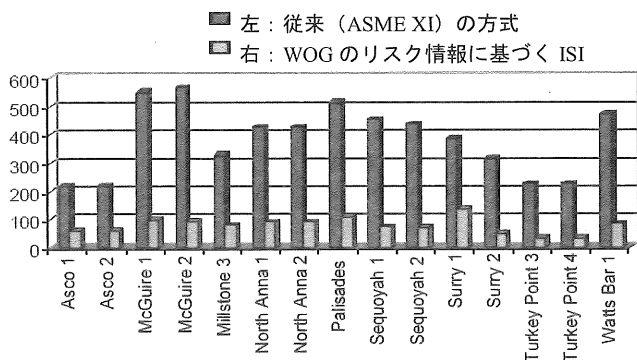


図6 配管溶接部の検査件数の削減例 (ICONE 10-22732) [5]

4. 欧州の状況

スウェーデン、フィンランド、スペインなどで RI-ISI の導入が進んでいる。スウェーデンでは、1988年の規則で定性評価を導入し、5年後に義務化された。2000年には定量評価も導入された。フィンランドでは、2003年に指針を改定し導入された。新設炉に対しては義務付け、既設炉はオプションという扱いである。なおフィンランドではリスク情報を活用した規制の導入が進められていて、ISI 以外にも、IST や Tech. Spec. への適用についての検討も進んでいる。スペインでは 2000 年に米国流の指針が採用されており (オプション)、いくつかの事業者は WOG の手法を適用し承認を受けている。フランスの規制側は全般的にリスクの活用の導入に慎重な立場である。事業者は構造物に対する RCM (信頼性重視保全) 手法をパイロット適用しているが、RI-ISI は導入されていない。スイスではパイロット研究が実施された。英国、ドイツ、ベルギーでは、RI-ISI は適用されていない。

欧州のプラントは、フランス、スペイン等を除き、いわゆる N+2 基準 (50%容量×4 系統; 単一故障&1つの冗長トレインが保守中と想定) で設計されているものが多い。その場合、安全系の冗長性が高く、運転中保全を実施しやすい状況にある。特にドイツ、フィンランド、スペインでは安全系設備の運転中保守について規制要件が設けられている^[6]。ドイツでは、運転中保全の実施を認める政府の勧告が出されており、手順書あるいは保全計画書に記載の待機系について1度に1トレインの実施が認められている。フィンランドにはN+2設計とN+1設計の発電所があるが、それぞれ Tech. Spec. の制限内で運転中保全が実施可能である。その場合、予防保全によるリスク重要度の検討が必要である。スウェーデンのN+2設計の発電所は運転中保全が可能であるが、N+1設計の発電所ではその実施はかなり限定される。スイスでは2001年のNEA報告の段階では、2プラント(ライプシュタット、ゲスゲン)で運転中保全が適用されている。米国や我が国と同じN+1設計の発電所を持つスペインでは、米国の保守規則が導入され、運転

中保全が可能である。ただし、その実施は限定的であり、発電所によっても実施の程度に差がある。例えば、コフレンテス発電所(BWR)では、許容待機除外時間 (AOT) が72時間以上、作業時の最大許容時間はその60%に限定、年1回で1トレインのみ、としている。N+1設計のフランスでは、Tech. Spec. の制限に基づく運転中保全の実施はかなり限定されている。N+2設計の英国では運転中保全の実実施計画が策定されている。

5. まとめと課題

欧米諸国、特に米国ではリスク情報の活用が進んでいる。運転保守面へのリスク情報活用によって、柔軟な運転保守が可能になり、(規制側・事業者側ともに) 不要な負荷が低減し、安全性の向上にもつながっている。なお、リスク情報の更なる活用に向けては、PRA の品質向上の必要性が認識されており、そのためのスタンダードが NRC において作成されている (Reg. Guide 1.200 「リスク情報に基づく活動のための PRA 結果の技術的妥当性決定のアプローチ」、2009年3月、改訂2版)。

このように、特に米国において、リスク情報は規制面においても積極的に活用されているが、あくまでもリスクベースの規制ではないことに留意が必要である。リスクは測定できない (モデルを使った評価にならざるを得ない)、モデルは完全ではない、といった理由から、不完全な知識を補うために、深層防護や安全マージンといった従来の決定論的なアプローチも、パフォーマンスの監視とあわせて使用していく、というのが NRC の考えである。NRC ではこの考え方に基づいて、リスク情報を活用したパフォーマンススペースのアプローチを導入している。

参考文献

- [1] US NRC, "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities", 60 FR 42622; August 16, 1995
- [2] US NRC, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis", Regulatory Guide 1.174, Revision 1, November 2002
- [3] EPRI White Paper, "Safety and Operational Benefits of Risk-Informed Initiatives", February 2008
- [4] 伊藤邦雄, "米国原子力発電所の保全とその安全管理 - (2) オンライン保守とその安全管理", 保全学, Vol.7, No.4 (2009年1月)
- [5] Boggess C. L. et. al., "Developments on Implementation of WOG Risk-informed Inservice Inspection Methodology", ICONE 10-22732, April 14-18, 2002.
- [6] NEA/CNRA/R(2001)6, Inspection of Maintenance on Safety systems during NPP operation, Aug. 2001