

米国におけるリスク情報を活用したパフォーマンスベース規制導入の経緯

目次

1. PRA とは
2. 米国における PRA に関する経緯
3. リスク情報を活用したパフォーマンスベース規制の導入
4. NFPA 805 「リスク情報を活用したパフォーマンスベースの火災防護プログラム」

1. PRA とは

1. 1 PRA の概要

PRA とは、事故の発生頻度とその事故がもたらす被害の大きさを積として表したリスクを定量的に評価する技術のことである。

- ・ 事故の起因となる事象が発生したとき、その炉心損傷への進展を防止するための緩和設備や運転操作の成功・失敗の組合せ（事故シーケンス）として事故シナリオを定義（イベントツリー）
- ・ 発電所のシステムをポンプや、弁、配管、遮断器、センサー、スイッチ等の単純な機器レベルに分解した論理モデルを作成し、それらの構成要素が持つ故障確率をモデルに従い組み合わせてイベントツリーの分岐確率を評価（フォールトツリー）
- ・ イベントツリーとフォールトツリーの組合せで事故シーケンス発生頻度及び炉心損傷頻度を評価

1. 2 起因事象別の分類

PRA は起因事象の種類により内的事象 PRA と外的事象 PRA に分類される。

- ・ 内的事象 PRA：原子力発電所のシステム内で発生する起因事象（機器故障、人的過誤）が対象（例：冷却材喪失事故（LOCA）、全交流電源喪失（SBO）、外部電源喪失（LOOP）、スクラム不能事象（ATWS）、蒸気発生器伝熱管破損（SGTR）等）
- ・ 外的事象 PRA：原子力発電所のシステム外で発生する起因事象が対象
 - 外部ハザード：地震、津波等
 - 内部ハザード：内部火災、内部溢水等

1. 3 PRA のレベル

PRA は評価の程度によりレベル 1 からレベル 3 までに分類される。

- ・ レベル 1PRA：炉心損傷頻度を評価。

- ・ レベル 2PRA：格納容器損傷頻度及びソースターム（放出される放射性物質の種類、放出量、放出のタイミング、放出期間等）を評価。
- ・ レベル 3PRA：原子力発電所の敷地外に放出される放射性物質による一般公衆への健康影響を評価。

2. 米国における PRA に関する経緯

- ・ 1975 年：NRC による原子炉安全研究（WASH-1400⁽¹⁾（通称 ラスムセン報告））
 - 原子力発電所の事故リスクを確率を用いて定量化した初の事例（対象：2 プラント）
 - 結論：原子力発電のリスクは他のリスク要因（自然災害、飛行機事故等）に比べて相対的に低い
 - しかしながら、NRC は WASH-1400 への支持を撤回し、PRA は有用ではないとの誤解が生じる。→PRA 手法の開発、利用拡大は一時後退。
- ・ 1979 年：スリーマイルアイランド事故
 - WASH-1400 で同様の事故シーケンスの重要性を指摘。
 - PRA の価値が見直される。→NRC による原子炉安全研究手法適用プログラムの実施（WASH-1400 の手法に従い、5 プラントが対象）。
 - PRA から得られた知見をもとに規制を強化（ATWS 規則（10CFR50.62）、加圧下熱衝撃（PTS）規則（10CFR50.61）、SBO 規則（10CFR50.63））
- ・ 1985 年：NRC による「シビアアクシデント政策声明書⁽²⁾」
 - プラント毎にシビアアクシデントに対する弱点を体系的に評価する、という NRC の基本方針を示す。
 - 個別プラントの体系的な安全解析（IPE⁽³⁾）→各事業者に対して内的事象 PRA の実施を要求（1988 年）。各事業者は 1991 年までに対応。
 - 外的事象に関する米国個別プラント評価（IPEEE⁽⁴⁾）→各事業者に対して外的事象 PRA（地震、火災、その他（強風、洪水））の実施を要求（1991 年）。各事業者は 1997 年までに対応。
 - IPE 及び IPEEE の結果から、各事業者は個別プラントの脆弱点を摘出し、必要に応じ改善策を実施した。
- ・ 1986 年：NRC による「安全目標政策声明書⁽⁵⁾」
 - 定性的目標と定量的目標を示す。
 - これらを達成するための補助的なリスク目標として以下を提示。
 - ◇ 炉心損傷頻度 $< 10^{-4}$ / 炉年
 - ◇ 環境中への大規模な放射性物質の平均放出頻度 $< 10^{-6}$ / 炉年

3. リスク情報を活用したパフォーマンスベース規制の導入

- ・ 1995 年：NRC による「PRA の活用に関する政策声明書⁽⁶⁾」

- NRC は、規制活動全般（規則作成、許認可、検査、強制措置等）において PRA をより一層活用していく方針を表明。
- ・ 1998 年：NRC が Reg. Guide 1.174 「認可変更における PRA 活用の手順⁽⁷⁾」を公表
 - PRA を活用した認可変更申請における「リスクの容認基準」を規定（図 1 参照）。
- ・ リスク情報を活用したパフォーマンスベース規制の導入事例
 - 火災防護規則：決定論的な火災防護規則への適合の代替として、リスク情報を活用したパフォーマンスベースの火災防護基準（NFPA 805⁽⁸⁾）の代替適合が可能となった。
 - 保守規則：保守に伴うリスクを評価して管理することを要求。具体的には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）とリスク管理措置を行う。これを満たせば、運転中保全が実施可能となる。
 - Tech. Spec.（保安規定）の変更：（一例）リスク情報を活用して許容待機除外時間（AOT）を延長することができる。
 - 新設炉に対する規制：PRA を実施し、PRA から得られた知見を設計に反映することを要求。
- ・ リスク情報活用のメリット
 - 規制側：安全上重要な問題に焦点を当てることができる。
 - 事業者側：発電所の運転・保守における柔軟性が向上し、コスト削減につながる。

4. NFPA 805 「リスク情報を活用したパフォーマンスベースの火災防護プログラム」

4. 1 NFPA 805 導入の背景

- ・ 1975 年に Browns Ferry 発電所で発生した火災を契機として制定された火災防護規則（10CFR50 附則 R）は遡及適応されるものであったが、附則 R の要件のうち、系統分離要件への適合は困難を極めた。
- ・ また火災防護に関する問題が次々と明らかになり、その都度、事業者は対応を求められた。
 - 系統分離のために用いられていた断熱材の性能問題
 - 回路損傷による機器の誤作動問題
 - 安全停止手順への手動対応の採用
- ・ 遡及対応が困難なプラントや新たな問題が見つかったプラントで規制への適合が困難なプラントでは、工学的評価を根拠とした規制要件からの免除を申請し、NRC はケースバイケースで免除を認めた。
- ・ NRC は 10CFR 附則 R が過度に保守的であると認識するようになり、また 1995 年の「PRA の活用に関する政策声明書」を受け、NRC はリスク情報を活用したパフォーマンスベースの火災防護プログラム（NFPA 805）への自主的な移行を認めた（2004 年）。
- ・ 米国発電所 100 基中 40 基が移行済み／移行作業中。

4. 2 リスク情報を活用したパフォーマンススペースの火災防護プログラムのための技術開発

- ・ 火災 PRA
 - NUREG/CR-6850 「火災 PRA 手法」⁽⁹⁾
- ・ 火災モデル
 - NUREG-1805 「FDTs」⁽¹⁰⁾ : エクセルベースの簡易火災ハザード評価手法。
 - NUREG-1824 「火災モデルの V&V」⁽¹¹⁾ : FDTs、FIVE、CFAST、MAGIC、FDS が対象。
 - NUREG-1934 「火災モデルの適用ガイダンス」⁽¹²⁾ : FDTs、FIVE、CFAST、MAGIC、FDS が対象。
- ・ 火災時の人間信頼性解析
 - NUREG-1921 「火災時の人間信頼性解析ガイドライン」⁽¹³⁾
- ・ 火災試験
 - NUREG/CR-7010 「ケーブル火災試験プログラム」⁽¹⁴⁾
 - NUREG/CR-6931 「交流回路を対象とした回路損傷試験」⁽¹⁵⁾
 - NUREG/CR-7100 「直流回路を対象とした回路損傷試験」⁽¹⁶⁾
 - 上記のほか、現在 NRC は電気盤火災試験、HEAF 試験、早期感知器試験を実施中。
- ・ 回路損傷に関する評価
 - NUREG-2128 「NRC 及び産業界が実施した回路損傷試験の結果整理」⁽¹⁷⁾
 - NUREG/CR-7150 「NRC 及び産業界が実施した回路損傷試験の結果分析」⁽¹⁸⁾

4. 3 NFPA 805 移行のメリット

NFPA 805 に試験的に移行した Harris 発電所は NFPA 805 移行のメリットについて以下の通り報告している⁽¹⁹⁾。

- ・ 負担削減
 - 安全停止手順からリスク上重要でない手動対応手順を削減
 - 火災監視活動 (Fire watch) のオプションを増加
 - ◇ 移行前 : ①常時、②1 時間毎→移行後 : ①常時、②1 時間毎、③4 時間毎、④12 時間毎
 - 火災防護システムのサーベイランス (検査、試験、保守) の実施頻度を見直し
- ・ リスク低減
 - 安全性向上のために新たな仮置き可燃物管理エリアを策定
 - リスク上重要な電気盤に早期火災感知器を設置
 - 火災 PRA から得られた知見を自衛消防隊の訓練に反映
- ・ 結論 : NFPA 805 移行に伴い、火災防護に関する活動を最適化 (削減) できるとともに、

安全性を向上することができる。

4. 4 NFPA 805 移行の課題

米国会計検査院が 2012 年に公表した NRC によるリスク情報を活用した火災防護規制の実施状況に関する報告書⁽²⁰⁾によると、NFPA 805 移行の課題として以下が挙げられている。

- ・ コスト：当初の見積よりも高かった。
- ・ 火災 PRA 手法：NUREG/CR-6850 に従うと過度に保守的な結果が導かれる。また火災 PRA の実施に必要なデータが不十分である。
- ・ 専門家不足：火災モデルや PRA の専門家（コンサル（実際に解析業務を実施）、ピアレビューアー、NRC スタッフ）が潜在的な必要数よりも少ない。

また米国の原子力産業界組織である NEI (Nuclear Energy Institute) は NFPA 805 移行に必要な事業者側のコストについて、NRC による当初の見積^{*}では 1 基当たり 168 万ドル（解析にかかるコストのみ）とされていたが、実際にかかった費用は 1 基平均で 1,050 万ドル（プラント 5 基の平均、解析にかかるコストのみ）まで上昇していると指摘した⁽²¹⁾。

※NRC は新たな規制を導入する際、規制の妥当性を証明するための評価を行う (Regulatory Analysis)。評価においては、規制に対応するためのコスト（規制側、事業者側）も考慮される。なお、緊急性が高い場合には、Regulatory Analysis を実施しないこともある。

参考文献

- (1) NUREG-75/014 (WASH-1400), “Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants”, October 1975.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr75-014/>

- (2) NRC, “Severe Reactor Accidents Regarding Future Designs and Existing Plants”, August 8, 1985.

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003711521.pdf>

- (3) Generic Letter 88-20, “Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities”, November 23, 1988.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/gen-letters/1988/gl88020.html>

- (4) Generic Letter 88-20 Supplement 4, “Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities”, June 28, 1991.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/gen-letters/1988/gl88020s5.html>

(5) NRC, “Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants”, August 4, 1986

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/policy/51fr30028.pdf>

(6) NRC, “Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities”, August 16, 1995.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/policy/60fr42622.pdf>

(7) Reg. Guide 1.174 “An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-specific Changes to the Licensing Basis Rev.2”, May 2011.

(8) NFPA 805, “Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants”, 2001.

<http://www.nfpa.org/codes-and-standards/document-information-pages?mode=code&code=805>

(9) NUREG/CR-6850, “Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities”, September 2005.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6850/>

(1 0) NUREG-1805, “Fire Dynamics Tools (FDTs) – Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program”, December 2004.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/>

(1 1) NUREG-1824, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, May 2007.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1824/>

(1 2) NUREG-1934, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines”, November 2012.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1934/>

(1 3) NUREG-1921, “Fire Human Reliability Analysis Guidelines”, July 2012.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1921/>

(1 4) NUREG/CR-7010, “Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire”, July 2012.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7010/>

(1 5) NUREG/CR-6931, “Cable Response to Live Fire”, April 2008.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6931/>

(1 6) NUREG/CR-7100, “Direct Current Electrical Shorting in Response to Exposure Fire”, April 2012.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7100/>

(1 7) NUREG-2128, “Electrical Cable Test Results and Analysis During Fire Exposure”, September 2013.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr2128/>

(1 8) NUREG/CR-7150, “Joint Assessment of Cable Damage and Quantification of Effects from Fire”, October 2012.

<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7150/>

(1 9) Duke Energy, “Safety and Operational Improvements at Harris Nuclear Plant”, September 2013.

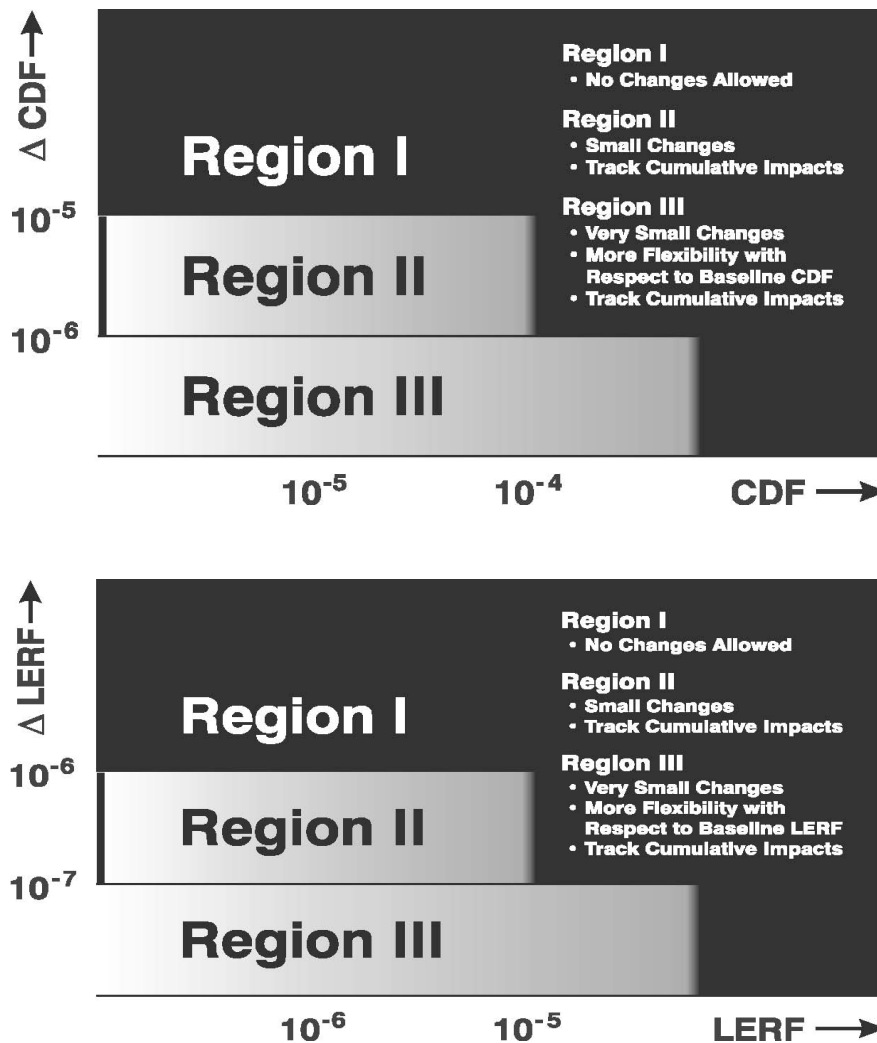
<http://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/Conferences/FPIF/FireForumForPosting.zip> (フォルダ名 : Plenary3(Mon130pm)、ファイル名 : NEI FP Forum 2013 Safety and Operational Improvements FINAL.pptx)

(2 0) GAO-13-8, “Oversight and Status of Implementing a Risk-Informed Approach to Fire Safety”, October 2012.

<http://gao.gov/assets/650/649658.pdf>

(2 1) NEI, “Cumulative Impact Case Study Analysis and Recommendations”, January 28, 2014.

<http://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/Backgrounders/Reports-Studies/Cumulative-Impact-Case-Study-Analysis-and-Recommendations.pdf?ext=.pdf>



注記：

- ・ 変更によりリスク (CDF、LEAR) が減少するのであれば、リスクの容認基準を満たす。
- ・ 変更によるリスクの増分 (ΔCDF 、 $\Delta LERF$) がそれぞれ 10^{-6} /炉年、 10^{-7} /炉年未満であれば、リスクの絶対値を問わずリスクの容認基準を満たす (リスクの絶対値が CDF で 10^{-4} /炉年、LERF で 10^{-5} /炉年より相当高い (considerably higher) のであれば、リスクの絶対値を低下させる方法を検討すべきである)。
- ・ 変更によるリスクの増分 (ΔCDF 、 $\Delta LERF$) がそれぞれ 10^{-6} /炉年から 10^{-5} /炉年、 10^{-7} /炉年から 10^{-6} /炉年の範囲の場合、リスクの絶対値が CDF で 10^{-4} /炉年、LERF で 10^{-5} /炉年未満であればリスクの容認基準を満たす。
- ・ 変更によるリスクの増分 (ΔCDF 、 $\Delta LERF$) がそれぞれ 10^{-5} /炉年、 10^{-6} /炉年以上であれば、リスクの容認基準は満たさない (変更は容認されない)。

図1 PRA を活用した認可変更申請における容認基準 (上 : CDF、下 : LERF)

(Reg. Guide 1.174)