

## 原子力規制検査で用いる事業者の確率論的リスク評価（PRA） モデルの適切性確認

令和 4 年 7 月 27 日  
原子力規制庁

### 1. 趣 旨

本議題は、以下の事業者が作成したレベル 1 PRA<sup>1</sup>モデルの適切性についての確認結果を報告するものである。また、原子力規制庁がこれまでの適切性確認で指摘した箇所に係る事業者の対応状況等について、併せて報告するものである。

- ・関西電力株式会社高浜発電所 3 号機・4 号機（以下「高浜 3 / 4 号機」という。）
- ・九州電力株式会社川内原子力発電所 1 号機・2 号機（以下「川内 1 / 2 号機」という。）

### 2. 高浜 3 / 4 号機及び川内 1 / 2 号機の PRA モデルの適切性に関する確認結果

これまでに適切性を確認したプラント<sup>2</sup>のモデルとの差異を中心に、高浜 3 / 4 号機及び川内 1 / 2 号機のレベル 1 PRA モデルの適切性について確認した結果、別紙 1 のとおり原子力規制検査で使用する上で支障となるような大きな課題は見られなかった。

今後、要修正箇所及び中長期的な改善箇所に留意しつつ、原子力規制検査で PRA モデルを活用していく。

### 3. 要修正箇所及び中長期的な改善箇所に関する事業者の対応状況等

原子力規制庁がこれまでに指摘した要修正箇所及び中長期的な改善箇所は概ね類似しており、事業者においては伊方 3 号機のレベル 1 PRA モデルを対象に修正・改善を図り、その成果を横展開することとしている。事業者による対応状況を確認するため、これまで 4 回の事業者面談を実施したほか、第 8 回検査制度に関する意見交換会合（令和 4 年 3 月 29 日）で議論した。

事業者の対応状況は別紙 2、3 のとおりであり、原子力規制庁は引き続き、自らが実施した感度解析の結果も事業者に示しつつ、面談等を通じて対応状況について確認していく。

<sup>1</sup> 内部事象（原子力発電所内で発生する機器の故障等により、自動もしくは手動にて原子炉を停止させるような事象）を対象とした出力運転時の炉心損傷に係る確率論的リスク評価

<sup>2</sup> 四国電力株式会社伊方発電所 3 号機、関西電力株式会社大飯発電所 3 号機・4 号機及び九州電力株式会社玄海原子力発電所 3 号機・4 号機

## 関西電力株式会社高浜発電所3／4号機のレベル1 PRAモデル及び九州電力株式会社川内原子力発電所1／2号機のレベル1 PRAモデルの適切性確認結果

令和4年7月27日  
原子力規制庁

### 1. 経緯

事業者が作成した確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）モデルを原子力規制検査において活用するため、原子力規制庁は四国電力株式会社伊方発電所3号機（以下「伊方3号機」という。）、関西電力株式会社大飯発電所3号機・4号機（以下「大飯3／4号機」という。）及び九州電力株式会社玄海原子力発電所3号機・4号機（以下「玄海3／4号機」という。）の内部事象<sup>1</sup>を対象とした出力運転時の炉心損傷に係るPRA（以下「レベル1 PRA」という。）モデルの適切性を確認するとともに、原子力規制委員会において確認結果を報告した。

- ・ 令和2年3月25日第74回原子力規制委員会：伊方3号機
- ・ 令和3年2月10日第56回原子力規制委員会：大飯3／4号機、玄海3／4号機

その後、関西電力株式会社が開発した高浜発電所3号機・4号機（以下「高浜3／4号機」という。）及び九州電力株式会社が開発した川内原子力発電所1号機・2号機（以下「川内1／2号機」という。）のレベル1 PRAモデルの提示を受け、このPRAモデルを確認するため、6回の事業者面談を実施し、合計98個の質問<sup>2</sup>を提示した。

### 2. 確認の方法

原子力規制庁は、「原子力規制検査において使用する事業者PRAモデルの適切性確認ガイド」を基に、図1に示すPRAモデルの確認フローに沿って、高浜3／4号機のレベル1 PRAモデル及び川内1／2号機のレベル1 PRAモデルが原子力規制検査において使用する上で技術的に適切であるか、以下の3つの視点から確認した。

- ① 設計、運転管理、運転経験などのプラント情報を適切に反映していること
- ② 評価結果に影響するようなモデル化の仮定が適切であること
- ③ 他の類似のPRAモデルと比べて、PRAモデルの差異の根拠が明確なこと

なお、米国NRC職員によるレビューについては、伊方3号機のPRAモデルと同様の考え方でモデル化しているため省略した。

<sup>1</sup> 原子力発電所内で発生する機器の故障等により、自動もしくは手動にて原子炉を停止させるような事象。

<sup>2</sup> 事業者 PRA モデルの確認のための質問、<https://www2.nsr.go.jp/data/000356109.pdf>

### 3. 確認結果

#### ① 設計、運転管理、運転経験などのプラント情報について

プラントの設計情報、運転管理及び運転経験が以下の事項について適切に反映されている必要がある。

- a. 設計情報及び運転管理情報
- b. 起回事象の選定及び発生頻度の評価
- c. 成功基準の設定
- d. 事故シーケンスの分析
- e. システム信頼性の評価
- f. 信頼性パラメータの設定
- g. 人的過誤の評価
- h. 事故シーケンスの定量化
- i. 不確実さ解析及び感度解析

確認の結果は以下のとおり。

- 設計情報及び運転管理情報が適切に選定されている（a 項）。
- 設計に基づいて、起回事象の設定及び発生頻度の評価が概ねなされている（b 項）。
- 設計及び運転手順等に基づいて、成功基準解析<sup>3</sup>が実施され、成功基準が設定されている（c 項）。
- 設計及び運転手順等に基づいて、事故シーケンスに沿ったイベントツリー及び緩和設備のフォールトツリーが作成されている（d 項及び e 項）。
- 運転管理、運転経験等に基づいて機器故障率の信頼性パラメータが設定されている（f 項）。
- 運転手順等に基づいて、運転員の操作過誤等の人的過誤確率が評価されている（g 項）。
- 運転手順等に基づく事故シナリオに沿って、炉心損傷頻度の定量化がされ、不確実さ解析等が実施されている（h 項及び i 項）。

上記のとおり、プラントの設計情報、運転管理及び運転経験は適切に P R A モデル及び信頼性パラメータに反映されていることを確認した。また、高浜 3 / 4 号機については、システム信頼性の評価（e 項）において交互運転している系統が運転情報を用いてモデル化されていることを確認した。ただし、高浜 3 / 4 号機及び川内 1 / 2 号機において、外部電源喪失頻度の計算等、一部設計情報等が適切に反映されていないことを確認した（要修正箇所 1 ~ 5、及び中長期的な改善箇所 1 ~ 3）。

#### ② 評価結果に影響するモデル化の仮定について

評価結果に影響するようなモデル化の仮定が①に示した a. ~ i. の事項について、適切に設定されている必要がある。

<sup>3</sup> 要求された機能を満足するために必要な、緩和系・操作の組合せや緩和系機器の台数等特定するための、熱水力解析コード等を用いた計算

確認の結果、概ねモデル化に大きな課題は見られなかったが、高浜3／4号機及び川内1／2号機において、成功基準の設定（c項）において、事業者が実施した解析に保守的な解析条件が含まれていることを確認した（中長期的な改善箇所4）。

### ③ 他の類似のPRAモデルとの差異について

他の類似のモデルと比べて差異があれば、その根拠は①に示したa.～i.の事項について明確となっている必要がある。伊方3号機、大飯3／4号機及び玄海3／4号機のPRAモデルと比較した結果、主な差異としては、表1に示すようにプラント固有の設計に関するものとモデルに用いるデータに関するものがあった。

前者については、高浜3／4号機及び川内1／2号機は再循環時に余熱除去ポンプを用いたブースティングが必要であるプラントであるため、大飯3／4号機及び玄海3／4号機と設計が違うところがあり、この違いはフォールトツリーに反映されていた。また後者については起因事象の数等に差異が確認されたものの炉心損傷頻度等の計算結果に影響するような大きな差異がないことを確認した。

以上の①～③の視点に基づく適切性確認の結果として、高浜3／4号機のPRAモデル及び川内1／2号機のPRAモデルは詳細な設計情報、運転管理及び運転経験、最新知見が反映されており、原子力規制検査で使用する上で支障となるような大きな課題は見られなかった。

ただし表2に示すように要修正箇所が5点、中長期的な改善箇所が5点確認された。

#### （要修正箇所）

要修正箇所1～4については、大飯3／4号機及び玄海3／4号機と概ね同様の内容<sup>4</sup>である。また、以下の1点（要修正箇所5）については、炉心損傷頻度が適切に算出されない可能性があることから、高浜3／4号機及び川内1／2号機ともに要修正箇所とした。

- a. 漏えいが小さい冷却材喪失事故時等において炉心に冷却材を注入する際、一次系圧力が高い状況では吐出圧力の小さい余熱除去ポンプを停止する手順になっている。そのため、もし、運転員の操作ミスにより停止操作に失敗した場合、同ポンプはミニマムフローラインを用いた低流量運転が長時間継続することにより、故障率が上昇することになるが、この停止操作及び故障確率の上昇がモデル化されていない。このため、同ポンプの停止操作及び故障確率の上昇をモデル化し、適切にリスクを算出することが望ましい。

#### （中長期的な改善箇所）

中長期的な改善箇所は5点あり、いずれも大飯3／4号機及び玄海3／4号機と同様の内容である。これらは直ちに修正等を反映することが困難であることから、今後修正すべき箇所として中長期的な改善箇所とした。

<sup>4</sup> 第56回原子力規制委員会（令和3年2月10日）資料5の別紙「関西電力株式会社大飯発電所3／4号機のPRAモデル及び九州電力株式会社玄海発電所3／4号機のPRAモデルの適切性確認結果（案）」、<https://www.nsr.go.jp/data/000342669.pdf>

#### 4. 原子力規制検査での活用に係る留意点

上述した要修正箇所及び中長期的な改善事項に関係するリスク評価については、原子力規制庁は感度解析を実施するなど留意してPRAモデルを活用する。

具体的な留意点及び対応方法を次に示す。

##### (1) 要修正箇所に係る留意点

要修正箇所1については、一般財団法人電力中央研究所（以下、「電中研」という。）が外部電源喪失の発生頻度を試算しているものの、所内単独運転の可否に伴うプラント設計の違いが排除され、所内単独運転ができない原子力発電所においても同運転ができる原子力発電所と同じ計算結果になっていた。個別プラントの評価では所内単独運転の可否といったプラント設計の違いを考慮する必要があることから、プラント設計の違いが外部電源喪失の発生頻度や炉心損傷頻度にどのような影響を及ぼすのか、引き続き確認する。

要修正箇所2～4については、令和4年度末までに事業者が修正する予定であることから、原子力規制庁は修正箇所を確認し、修正されたPRAモデルを活用することとする。

要修正箇所5については、余熱除去ポンプの低流量運転に関する影響を考慮し、余熱除去ポンプの停止をモデル化することを事業者へ求める。

##### (2) 中長期的な改善箇所に係る留意点

安定に停止したプラントの状態等（中長期的な改善箇所1及び2）については、原子力規制庁が、例えば安定状態を高温停止から低温停止に変更する等、安定停止の状態を変更した場合のリスク重要度への影響を感度解析によって把握するとともに、事業者と安定状態の定義を議論する。

機器故障率（中長期的な改善箇所3）については、使用している数値が米国のものに比べて低く、リスク重要度が低く算出される可能性があるため、原子力規制庁としては、米国の機器故障率<sup>5</sup>などを用いた感度解析を実施してリスク重要度への影響を把握する。なお、事業者においてはPRAのために個別プラントの機器故障率に係るデータを収集しており、電中研はこのデータをもとにプラント平均の故障率を算出した。今後、関西電力株式会社及び九州電力株式会社はプラント平均の故障率、当該プラントのデータ等を用いて、高浜3／4号機及び川内1／2号機の故障率をそれぞれ整備する予定である。

過度な保守性を含んだ成功基準解析（中長期的な改善箇所4）については、原子力規制庁としては、成功基準を変更した場合の感度解析を実施してリスク重要度への影響を把握する。また事業者が過度な保守性を排除した解析作業を実施していることから、事業者が実施する解析について、使用した解析コード、解析条件及び解析結果を確認するとともに、解析結果が適切にPRAモデルへ反映されていくことを確認する。

海外専門家レビューへの対応（中長期的な改善箇所5）については、事業者による海外専門家レビューのフォローアップ状況及びモデルへの反映状況等を確認する。

<sup>5</sup> <https://nrc.nrel.gov/AvgPerf/>

表1 事業者が作成したレベル1 P R Aモデル間の主な差異

		伊方 3号機	大飯 3 / 4号機	玄海 3 / 4号機	高浜 3 / 4号機	川内 1 / 2号機	炉心損傷頻度の計算結果への影響等
プラ ント 設 計	LOCA 時再 循環操作	手動操作	自動	手動操作	自動	手動操作	再循環切替については、設計（高浜3 / 4号機は自動、川内1 / 2号機は手動操作）を踏まえたP R Aモデルが作成されており、設計の違いが適切に炉心損傷頻度の違いになっていることを確認。
	ECCS 再循 環時のブ ースティ ング	なし	なし	なし	あり	あり	高浜3 / 4号機及び川内1 / 2号機は、充てん高圧注入ポンプを用いた再循環時には、余熱除去ポンプでブースティングして注入する設計となっており、この設計を踏まえたP R Aモデルが作成されていることを確認。
モ デ ル に 用 い る デ ー タ	起 因 事 象 の 数 及 び 評 価 期 間	4 4 事象 ～2016 年	3 1 事象 ～2017 年	3 2 事象 ～2018 年	3 1 事象 ～2017 年	3 1 事象 ～2018 年	評価対象から外れた起 因事象の発生頻度は十分 小さく、炉心損傷頻度 に影響しないことを確 認。
	機 器 故 障 率	国内平均 (29 か年 故障率)	国内平均をプラント個別データでベイズ更新				
			2004 年度～ 2010 年度の 7 年	2004 年度～ 2010 年度の 7 年	2006 年度～ 2010 年度の 5 年	2004 年度～ 2010 年度の 7 年	

表2 高浜3/4号機及び川内1/2号機レベル1 PRAモデルの主な要修正箇所・中長期的な改善箇所一覧

	番号	要修正箇所	プラント	指摘事項
要修正箇所	1	外部電源喪失の発生頻度	高浜3/4 川内1/2	電中研が、国内の原子力発電所（PWR及びBWR）における外部電源喪失事例を収集し、地震PRAに含まれない電源の喪失 <sup>6</sup> を抽出して起因事象発生頻度を試算しているものの、所内単独運転の可否といったプラント設計の違いを考慮しておらず、頻度の算出においてはプラント設計の違いを考慮することが適切である。
	2	交互運転している系統（原子炉補機冷却系等）のモデル化（フォールトツリー）	川内1/2	原子炉補機冷却系、制御用空気系等のように、非常時において必要な設備でかつ常時運転している系統は、定期的に運転するトレインを切り替える運用になっている。そのため、このような系統は、運用を考慮してモデル化することが適切である。
	3	共通原因故障の範囲	高浜3/4 川内1/2	共通原因故障を考慮する機器の範囲について、冗長性のある同種の複数機器のうち運転状態が異なる機器についても共通原因故障を考慮することが適切である。
	4	体系的な起因事象の抽出	高浜3/4	起因事象を適切に選定するために、故障モード影響評価(FMEA)等の分析ツールを用いて体系的に起因事象を選定することが適切である。
	5	ECCS再循環時のブースティング	高浜3/4 川内1/2	漏えいが小さい冷却材喪失事故時等において炉心に冷却材を注入する際、一次系圧力が高い状況では吐出圧力の小さい余熱除去ポンプを停止する手順になっている。そのため、もし、運転員の操作ミスにより停止操作に失敗した場合、同ポンプはミニマムフローラインを用いた低流量運転が長時間継続することにより、故障確率が上昇することになるが、この停止操作及び故障確率の上昇がモデル化されていない。このため、同ポンプの停止操作及び故障確率の上昇をモデル化することが適切である。
中長期的な改善箇所	1	複数の状態を安定状態と定義している	高浜3/4 川内1/2	低温停止、高温停止等の種々の状態を安定状態としているが、イベントツリーについては、炉心損傷となる事故シーケンスと区別するため、安定に停止したプラントの状態を成功の状態とする必要がある。
	2	緩和機能の継続を必要とする時間(使命時間)を一律24時間としている		安定状態の定義により、24時間以上の使命時間が必要な場合もあり、使命時間を適切に設定した根拠が不足している。
	3	機器故障率に、国内機器故障率を用いている		国内機器故障率は米国の機器故障率に比べ小さく、この差異を分析する必要がある。
	4	過度な保守性を含んだ成功基準解析を実施している		成功基準解析は、プラントの状態を精度良く解析できる最適評価コードを用い、評価対象プラントの状態に対応した解析条件を用いた最確推定が適切である。
	5	ピアレビューもしくは海外専門家レビューを実施していない		PRAモデルの品質を確保及び維持するため、第三者によるレビューが必要である。

<sup>6</sup> 地震時を対象にしたPRAにおいては、一般的に、地震によりプラントが停止するような事象を評価対象にする。

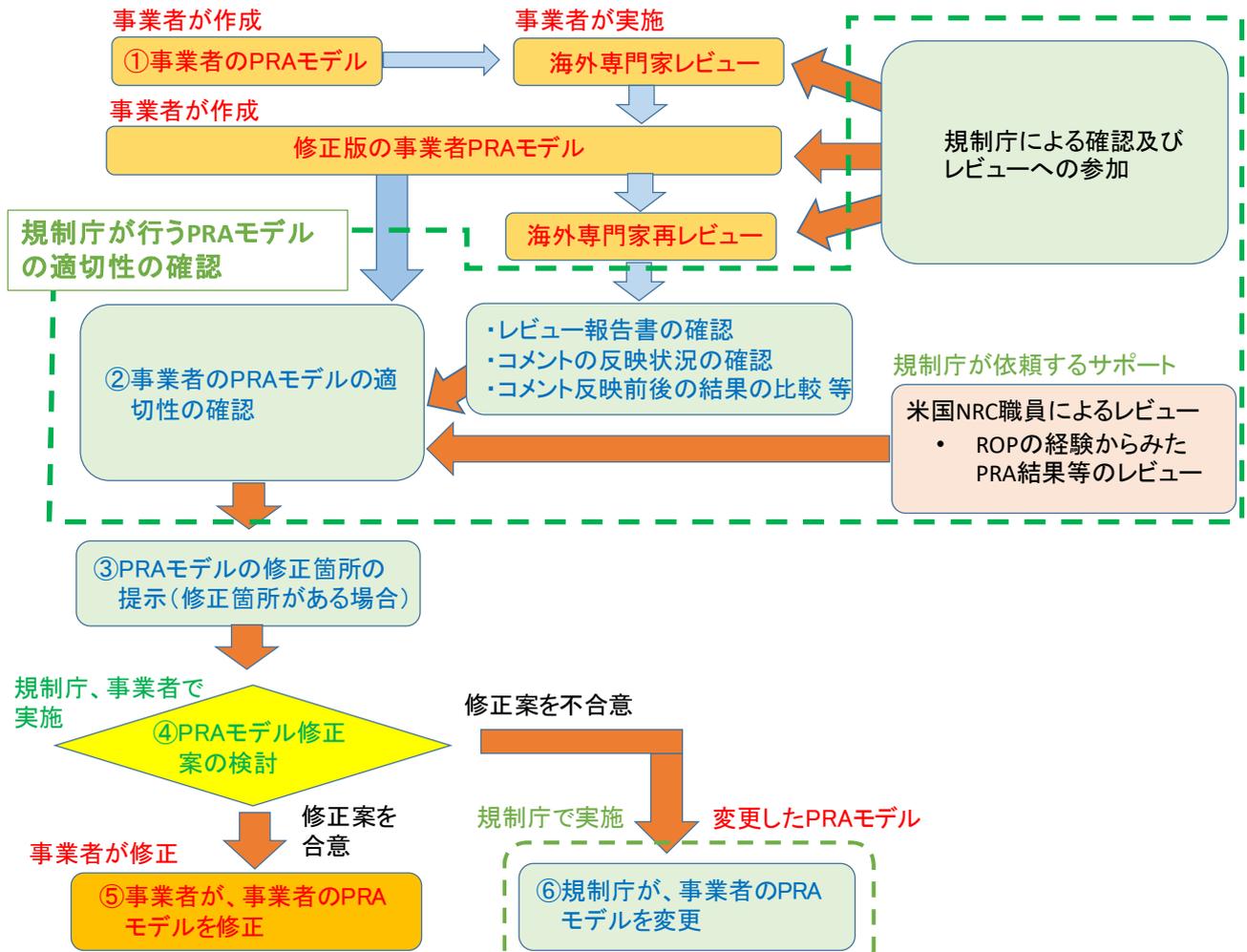


図1 原子力規制検査で使用するPRAモデルの確認フロー

表 事業者が作成したレベル1 PRAモデルの主な要修正箇所及び対応状況等

番号	要修正箇所	プラント	事業者の対応状況	原子力規制庁の今後の予定
1	外部電源喪失の発生頻度	伊方 3 大飯 3 / 4 玄海 3 / 4 高浜 3 / 4 川内 1 / 2	・電中研が、国内の原子力発電所（PWR及びBWR）における外部電源喪失事例を収集し、地震PRAに含まれない電源の喪失を抽出して起因事象発生頻度を試算した。	・試算では、所内単独運転の可否に伴うプラント設計の違いが排除され、所内単独運転ができない原子力発電所においても同運転ができる原子力発電所と同一の結果になっていた。プラント設計の違いが外部電源喪失の発生頻度や炉心損傷頻度にどのような影響を及ぼすのか、引き続き確認する。
2	交互運転している系統（原子炉補機冷却系等）のモデル化（フォールトツリ一）	伊方 3 大飯 3 / 4 玄海 3 / 4 川内 1 / 2	・大飯 3 / 4 号機は昨年度末にモデルを修正済み。 ・伊方 3 号機は今年度上期、川内 1 / 2 号機は今年度末、玄海 3 / 4 号機は来年度上期に修正完了予定。	・原子炉補機冷却系、制御用空気系等のように、非常時に必要な設備でかつ常時運転している系統は、定期的に運転するトレインを切り替える運用になっており、モデル上で適切に反映されているか等について、事業者から修正されたモデルを受領後、順次確認する。
3	共通原因故障の範囲	伊方 3 大飯 3 / 4 玄海 3 / 4 高浜 3 / 4 川内 1 / 2	・大飯 3 / 4 号機、高浜 3 / 4 号機は昨年度末にモデルを修正済み。 ・伊方 3 号機は今年度上期、川内 1 / 2 号機は今年度末、玄海 3 / 4 号機は来年度上期に修正完了予定。	・冗長性のある同種の複数機器のうち運転状態（運転中と待機中）が違う機器についても共通原因故障を考慮することが適切であり、モデル上で適切に反映されているか等について、事業者から修正されたモデルを受領後、順次確認する。
4	体系的な起因事象の抽出	大飯 3 / 4 高浜 3 / 4	・故障モード影響評価(FMEA)を実施中(今年度上期完了予定)。	・事業者がFMEAを実施した後に、その内容を確認する。
5	ECCS 再循環時のブースティング	高浜 3 / 4 川内 1 / 2	—	・漏えいが小さい冷却材喪失事故時等において炉心に冷却材を注入する際、一次系圧力が高い状況では吐出圧力の小さい余熱除去ポンプを停止する手順になっているが、PRAモデルでモデル化されていないため、同ポンプの停止操作等をモデル化することを事業者に求める。

表 事業者が作成したレベル1 PRAモデルの主な中長期的な改善箇所及び対応状況等

番号	中長期的な改善箇所	プラント	事業者の対応状況	原子力規制庁の今後の予定
1	複数の状態を安定状態と定義している	伊方3 大飯3 / 4 玄海3 / 4 高浜3 / 4 川内1 / 2	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温停止状態、低温停止状態等、種々の安定状態について事業者と議論しつつ、安定状態の定義や使命時間の違いによる影響を評価する。</li> </ul>
2	緩和機能の継続を必要とする時間(使命時間)を一律24時間としている			
3	機器故障率に、国内機器故障率を用いている		<ul style="list-style-type: none"> <li>電中研が、27基における2004年から2010年の7か年を対象にした新しい国内一般機器故障率を作成・公表した<sup>7</sup>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力規制庁が機器故障率を米国一般機器故障率に置き換えて算出した結果を示しつつ、日米間の機器故障率に関する差異の要因について、事業者と議論する。</li> <li>27基を含む全プラントを対象とした7か年のデータ及び2011年以降の再稼働プラントを対象としたデータに拡充するよう事業者に求める。</li> </ul>
4	過度な保守性を含んだ成功基準解析を実施している		<ul style="list-style-type: none"> <li>最確推定の成功基準解析を実施中(終了時期未定)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力規制庁が成功基準を変更した場合の感度解析を実施しリスク重要度への影響を把握する。</li> <li>事業者が解析を実施した後に、過度な保守性を含んでいないか確認する。</li> </ul>
5	ピアレビューもしくは海外専門家レビューを実施していない		<ul style="list-style-type: none"> <li>伊方3号機に関する海外専門家レビューを実施した。</li> <li>コメント134件中、現時点で対応済みは39件。残りのコメントについて、今年度に23件、来年度に28件、2024年度以降に44件対応する予定。</li> <li>他プラントについては、海外専門家レビュー未実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>伊方3号機については引き続き、事業者による海外専門家レビューのフォローアップ状況及びモデルへの反映状況を確認する。</li> <li>伊方3号機以外のプラントについても、同機のモデルと差異がある箇所についてはレビューを受けるよう、事業者に求める。</li> </ul>

<sup>7</sup> <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=NR21002>