

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について

令和3年2月10日
原子力規制庁

1. 経緯

令和2年3月4日の第68回原子力規制委員会及び令和2年3月25日の第74回原子力規制委員会において、「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」を基に確認した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。）の出力運転時内部事象レベル1確率論的リスク評価モデル（以下、「PRAモデル」という。）の確認結果及び今後の進め方について了承された。

本ガイドは、設計情報や起回事象の選定等の確認項目、次の3つの適切性に係る視点及び適切性の判断基準を定めている。

- 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 起回事象の発生箇所や規模を特定するなど、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。

原子力規制庁は、関西電力株式会社が作成した大飯発電所3号機及び4号機（以下、「大飯3／4号機」という。）のPRAモデル及び九州電力株式会社が作成した玄海発電所3号機及び4号機（以下、「玄海3／4号機」という。）のPRAモデルを対象に伊方3号機との差異を中心に適切性の確認を進め、令和2年12月22日の第3回検査制度に関する意見交換会合において、確認結果及びPRAモデルの修正箇所を議論した。

原子力規制庁では、これらの事業者PRAモデルについて、同ガイドを基に確認を終了したことから、確認結果を報告するもの。

2. PRAモデルの確認結果

大飯3／4号機及び玄海3／4号機のPRAモデルについて、伊方3号機PRAモデルとの差異を中心に適切性の確認を行った結果、別紙のとおりPRAモデルは適切にかつ詳細に作成されており、原子力規制検査で活用するにあたり大きな問題は確認されなかった。

また、先行して適切性を確認した伊方3号機のPRAモデルとの主な差異として、表1に示すように起回事象、機器故障率等の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。

主な確認結果は以下のとおり。

- ① **設計、運転管理、運転経験**：詳細な設計情報がフォールトツリーに反映され事故進展解析に基づきイベントツリーが作成されるなど適切に設計情報が反映
- ② **起回事象のモデル化**：起回事象の数や評価対象期間について適切に設定
- ③ **他の類似 PRA モデル**：伊方 PRA モデルと比較して大きな支障はなかった

ただし、PRAモデルの一部において、修正することが望ましい箇所が以下4つ確認された（表2参照）。

- ① 外部電源喪失の発生頻度（伊方、大飯、玄海）
- ② 交互運転している系統のモデル化（伊方、大飯、玄海）
- ③ 共通原因故障の範囲及び発生頻度の算出（伊方、大飯、玄海）
- ④ 体系的な起回事象の抽出（大飯）

また、中長期的にPRAモデルを精緻化するために検討を継続すべきものとして、安定した停止とするプラント状態の設定方法、機器故障率の更新及びピアレビューの実施（大飯）があげられた。

3. 今後の予定

修正箇所や中長期的な改善箇所について留意しつつ原子力規制検査で活用していくとともに、事業者の反映状況については面談等で確認していく。

表1 伊方3号機のPRAモデルとの主な差異

	伊方3号機	大飯3／4号機	玄海3／4号機	炉心損傷頻度等の計算結果への影響
起回事象の数	44事象	31事象	32事象	評価の対象としなかった起回事象があったものの、それら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
起回事象の発生頻度を求めるための評価対象期間	～2016年	～2017年	～2018年	評価対象期間の差は少しであるため、起回事象の発生頻度の差は各プラント間で小さく、炉心損傷頻度への影響は微少であることを確認
機器故障率	国内平均 (1982年～2010年の 29ヶ年56基データ)	プラント個別 (2004年～2010年の 7ヶ年を考慮)	プラント個別 (2004年～2010年の 7ヶ年を考慮)	大飯3／4号機及び玄海3／4号機では、各プラントの運転経験を用いて国内平均の機器故障率から更新しているものの、故障率への影響は微少であることを確認

表2 修正することが望ましい箇所

番号	伊方3号機 ¹	大飯3／4号機	玄海3／4号機	今後の方針（P）
1	外部電源損失の発生頻度がPWRの運転経験のみに基づき設定されている。	同左	同左	令和3年度末（大飯）及び令和4年度末（玄海）までに事業者がPRAモデルを修正
2	交互運転している系統（原子炉補機冷却系等）が適切にモデル化されていない。	同左	同左	令和3年度末（大飯）及び令和4年度末（玄海）までに事業者がPRAモデルを修正
3	共通原因故障を考慮すべき同種の複数機器 ² について、一部考慮されていないものがある。また、発生頻度が1ヶ月間のみを基に算出されている。	共通原因故障を考慮すべき同種の複数機器について、一部考慮されていないものがある。	共通原因故障を考慮すべき同種の複数機器について、一部考慮されていないものがある。	令和3年度末（大飯）、令和4年度末（玄海）までに事業者がPRAモデルを修正なお、発生頻度については、令和元年度末（伊方）に事業者がPRAモデルを修正済
4	（体系的 ³ に起因事象の抽出をしている。）	伊方3号機の情報をもとに検討しているものの、体系的に起因事象の抽出をしていない。	（体系的に起因事象の抽出をしている。）	令和3年度末（大飯）までに事業者がPRAモデルを修正

¹ 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について（第2回）の別紙2（第74回原子力規制委員会（令和2年3月25日）資料3より一部抜粋及び変更）

² 例えば、交互運転している系統において、運転している電動ポンプ及び待機している電動ポンプは共通原因故障を考慮すべきである。

³ 体系的な抽出方法としてFMEA手法、マスターロジックダイヤグラム手法等の分析手法がある。代表的な手法の1つであるFMEA手法は、機器を網羅的に選定し、その機器の故障モード毎に故障による影響を分析する方法である。

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）

令和3年2月10日
原子力規制庁

1. 経緯

原子力規制庁において事業者が作成した確率論的リスク評価（以下、「PRA」という。）モデルを活用するため、原子力規制庁は関西電力株式会社（以下、「関西電力」という。）が開発した大飯発電所3号機及び4号機（以下、「大飯3／4号機」という。）並びに九州電力株式会社（以下、「九州電力」という。）が開発した玄海発電所3号機及び4号機（以下、「玄海3／4号機」という。）の内部事象出力運転時レベル1PRAモデルについて各々65個の質問を提示し、PRAモデルを確認した。

2. 確認の方法

原子力規制庁は、「原子力規制庁において使用する事業者PRAモデルの適切性確認ガイド」（以下、「確認ガイド」という。）に沿って、大飯3／4号機のPRAモデル及び玄海3／4号機のPRAモデルを確認した。

3. 確認結果

（1）適切性の判断

大飯3／4号機のPRAモデル及び玄海3／4号機のPRAモデルに関しては、確認ガイドに沿って確認した結果、原子力規制庁で活用するにあたり大きな問題は確認されなかった。ただし、伊方3号と共通の指摘として、要修正箇所が3点及び中長期的な改善箇所が4点あることが確認された。さらに、大飯3／4号機のPRAモデルについては、これらの指摘に加え、要修正箇所が1点及び中長期的な改善箇所が1点あることが追加で確認された。

（2）PRAモデル適切性について

①設計、運転管理、運転経験等のプラント情報

適切にプラントのリスク評価を行うためには、プラントの設計情報、運転管理及び運転経験の情報を下記のモデル及びパラメータに反映することが必要である。

- 起因事象の選定、起因事象の発生頻度
- 事故の進展の解析
- 事故の進展を模擬したイベントツリー
- 緩和設備のフォールトツリー
- 機器故障の確率及び共通原因故障の確率
- 運転員の操作過誤

確認の結果、

- 詳細な設計情報を基にフォールトツリーが作成されていた。
- 事故進展の解析に基づきイベントツリーが作成されていた。
- 運転管理及び運転経験は、起因事象の発生頻度及び機器故障確率を算出する際におおむね適切に使用されていた。

ことなどから、適切にプラントの設計情報、運転管理及び運転経験がモデル及びパラメータに反映されていることを確認した。

②起因事象の発生箇所等のモデル化

起因事象の発生箇所、発生原因などの設定において、適切に評価できるように、発生箇所ごとに評価すること、発生原因をフォールトツリーなどでモデル化することをして、リスク評価を実施する必要がある。

冷却材喪失事故については、発生規模ごとに評価しており、発生原因をフォールトツリーなどでモデル化していることを確認した。また、緩和設備をサポートする原子炉補機冷却系統などの故障を原因とする起因事象については、詳細にフォールトツリーを用いてモデル化していることを確認した。

③PRAモデルの品質の確保及び維持に向けた活動

大飯3/4号機のPRAモデルを対象としたピアレビュー又は海外専門家レビューを実施していないことを確認した。

④他の類似プラントのPRAモデルとの比較

大飯3/4号機のPRAモデル及び玄海3/4号機のPRAモデルを対象に伊方3号機のPRAモデルと比較した。

比較の結果、PRAモデル間に大きな差はなく、大飯3/4号機のPRAモデル及び玄海3/4号機のPRAモデルは伊方3号機のPRAモデルと同様に、原子力規制検査で使用するうえで支障となるような大きな課題はないことを確認した。

(3) 修正が必要な事項

PRAモデルの一部において、表1及び表2に示すように要修正箇所が各々4点及び3点確認された。また、表3及び表4に示すように中長期的な改善箇所が各々5点及び4点確認された。

①設計、運転管理、運転経験等のプラント情報に係る箇所

起因事象の一つである外部電源喪失の発生頻度は、伊方3号機で用いていた外部電源喪失の発生頻度と同じように、適切に算出されていないことが確認された。さらに大飯3/4号のPRAモデルについては、体系的に起因事象が選定されて

いなかった。

また、イベントツリーについては、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が、冷温停止、高温停止等の種々の状態を安定状態としていくことが確認された。用いるべき安定状態については、今後も議論を継続していく必要がある。さらに、安定に停止したプラントの状態に至るまでの時間を24時間と統一しているが、安定に停止したプラント状態を冷温停止で統一した場合、事故シーケンスによっては緩和設備に長期間の動作が要求されるものがある可能性がある。

上記の箇所に加え、成功基準解析については、使用したコードが許認可解析で用いたコード（SATAN-M、WREFLOOD、LOCTA-IV等）であり、さらに解析条件は許認可解析の条件もしくは許認可解析の条件に類似した条件を用いており、過度な保守性を含んだ解析であることが確認された。

さらに、使用している国内機器故障率は、米国の機器故障率に比べ1桁から2桁小さい値であるにも関わらず、この差異について分析されていないことが確認された。

これらの箇所は、直ちに修正することが困難であるものの、今後修正すべき箇所として中長期的な改善箇所とした。

②起因事象の発生箇所等のモデル化に係る箇所

緩和設備のサポートをする原子炉補機冷却系統などは定期的に運転を切り替える運用になっているにも関わらず、フォールトツリーにこのような運用が反映されていないことが確認された。

さらに、冗長性のある機器のうち運転状態が違う同種の複数機器について、共通原因故障がモデル化されていなかった。例えば、交互運転している系統において、運転している電動ポンプ及び待機している電動ポンプは共通原因故障を考慮すべきである。

③PRAモデルの品質の確保及び維持に向けた活動

大飯3/4号のPRAモデルを対象としたピアレビュー又は海外専門家レビューを実施していないことは、原子力規制検査で使用する上で直ちに支障となるものではない。しかし、このような第三者によるレビュー活動はPRAモデルの品質を確保及び維持する上で重要であることから、この箇所は直ちに修正することが困難であるものの、今後修正すべき箇所として中長期的な改善箇所とした。

4. 原子力規制検査での活用に係る留意点

上述した修正が必要な事項に係るリスク評価については、リスク重要度が適切に算出されない可能性があることから、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

外部電源喪失事象の発生頻度については、令和3年度末もしくは令和4年度末までに事業者が修正することになっているが、令和3年度からのPRAモデルの活用の際には、原子力規制庁が暫定的に算出した外部電源喪失の発生頻度を使用することとする。

また、原子炉補機冷却系統等の交互運転をしている系統に関する検査指摘事項については、リスク重要度が低く算出される可能性があることから、実際の重要度評価にあたっては感度解析を実施するなどの対応が必要である。

(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については、原子力規制庁が、安定状態の定義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。

また、使用している機器故障率が米国の機器故障率と比べて低く、リスク重要度が低く算出される可能性があるため、原子力規制庁が、米国の機器故障率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、このデータをもとにプラント平均の故障率を算出する予定となっている。その後、関西電力と九州電力は全プラントのデータ等を用いて、大飯3/4号機及び玄海3/4号機の故障率をそれぞれ整備する予定となっている。

さらに、過度な保守性を含んだ成功基準解析については、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てリスク重要度への影響を把握する。また、事業者が最確推定の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していく。

表1 大飯3/4号機のPRAモデルの修正箇所一覧

番号	修正箇所	理由	今後の方針
1	外部電源喪失の発生頻度	外部電源喪失の原因となる自然災害（地震、風雪等）、送電網の不具合、送電線の不具合等の特徴は、プラント型式で大きな差異はないため、PWR及びBWRの運転経験を含めることが適切である。なお、これまでに発生した地震のうち、直接プラント内の機器等に影響を与えず外部電源を喪失させた地震については、内部事象PRAの外部電源喪失に含めることが適切である ^{注1)} 。	令和3年度末までに事業者がPRAモデルを修正
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）	原子炉補機冷却系、原子炉補機冷却海水系、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。	令和3年度末までに事業者がPRAモデルを修正
3	共通原因故障の範囲	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る。	令和3年度末までに事業者がPRAモデルを修正
4	体系的な起回事象の抽出	起回事象を適切に選定するために、FMEA等の分析ツールを用いて体系的に起回事象を選定することが適切である。	令和3年度末までに事業者がPRAモデルを修正

注1) 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。

表2 玄海3／4号機のPRAモデルの修正箇所一覧

番号	修正箇所	理由	今後の方針
1	外部電源喪失の発生頻度	外部電源喪失の原因となる自然災害（地震、風雪等）、送電網の不具合、送電線の不具合等の特徴は、プラント型式で大きな差異はないため、PWR及びBWRの運転経験を含めることが適切である。なお、これまでに発生した地震のうち、直接プラント内の機器等に影響を与えず外部電源を喪失させた地震については、内部事象PRAの外部電源喪失に含めることが適切である ^{注1)} 。	令和4年度末までに事業者がPRAモデルを修正
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）	原子炉補機冷却系、原子炉補機冷却海水系、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。	令和4年度末までに事業者がPRAモデルを修正
3	共通原因故障の範囲	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る。	令和4年度末までに事業者がPRAモデルを修正

注1) 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。

表3 大飯3/4号機のPRAモデルの中長期的な改善箇所一覧

番号	修正箇所	理由	今後の方針
1	複数の状態を安定状態と定義している	安定状態を複数設定することで、全炉心損傷頻度、機器の重要度等に及ぼす影響が定かではないため。	原子力規制庁が、安定状態の定義の違いによる影響を評価
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るため。	
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1桁から2桁程度小さい値であるため、この差異を分析する必要がある。	事業者が機器故障率の算出方法を検討中
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好ましいため。	事業者が最確推定の成功基準解析を実施中
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に第三者によるレビューが重要なため。	事業者がピアレビューもしくは海外専門家レビューの実施を検討中

表4 玄海3／4号機のPRAモデルの中長期的な改善箇所一覧

番号	修正箇所	理由	今後の方針
1	複数の状態を安定状態と定義している	安定状態を複数設定することで、全炉心損傷頻度、機器の重要度等に及ぼす影響が定かではないため。	原子力規制庁が、安定状態の定義の違いによる影響を評価
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るため。	
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1桁から2桁程度小さい値であるため、この差異を分析する必要がある。	事業者が機器故障率の算出方法を検討中
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好ましいため。	事業者が最確推定の成功基準解析を実施中