

本資料は2022年6月3日付で技術諮問委員会より提出された報告書を原子力リスク研究センターにて仮訳したものです。正式な報告書は英文版の原文のみとなりますのでご注意ください。

原子力リスク研究センター (NRRC)  
一般財団法人 電力中央研究所  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1

2022年6月3日

ジョージ・アポストラキス博士  
一般財団法人 電力中央研究所  
原子力リスク研究センター所長  
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1

件名： 浜岡モデルプラントレベル2津波PRAプロジェクトの成果

アポストラキス博士殿：

2022年5月23日～27日に開催された第16回原子力リスク研究センター (NRRC) 技術諮問委員会 (TAC) において、浜岡4号機をベースとするモデルプラントを用いた津波リスクレベル1・レベル2PRA評価研究プロジェクトから、技術基盤および成果に関する最終報告を受けた。

### 結論と提言

1. モデルプラントの津波リスクを評価するレベル1・レベル2PRA研究プロジェクトを完了させたことは、日本の原子力産業にとって大きな節目となる成果であり、世界中の津波が生じやすい地域におけるリスク解析に適用可能な手法とモデル化ツールの進展をもたらした。
2. 本プロジェクトで用いたモデル、データおよびこれらの裏付けとなる解析は、独立した掘り下げた技術レビューを受ける必要がある。
3. 対象を絞った感度解析として、原子炉建屋内の津波浸水による圧力抑制室 (S/C) の冷却効果および核分裂生成物 (FP) のスクラビング効果を除いた条件で、レベル1・レベル2モデルを定量化する必要がある。
4. 研究チームは、津波解析用のより詳細な事象シナリオタイミングモデルを開発する前に、実際のフルスコープのPRA全体にわたってタイミングに関する考慮事項が通常どのようにモデル化されているか、検討する必要がある。
5. 上記の諸提言の課題が解決されれば、この研究モデルを、浜岡4号機における津波リスクを評価するための、技術的に根拠がありかつ現実的なレベル1・レベル2PRAモデルへと

効率的に変更することができるはずである。そうすれば、浜岡プラント固有のPRAを、リスク情報を活用した意思決定に活用することが可能になるだろう。

6. NRRCは、日本の電力会社や標準委員会が利用するための津波リスク評価ガイダンスを作成する必要がある。

## 背景

この研究プロジェクトの主目的は、解析手法の高度化およびレベル1・レベル2のPRAモデルの統合により、津波リスク評価の技術的基盤を開発することであった。TACは、このプロジェクトが進展していく中で、津波ハザード解析、フラジリティ解析、PRAモデルおよび事故解析の研究成果、炉心損傷および格納容器破損の頻度に関する中間結果など、複数回の説明を受けた。2016年11月27日付レター報告書では、予備的なモデルや解析を支援する研究に関する結論と提言を示した。今回の会合では、NRRC研究チームから、レベル2PRAのソースターム評価と不確実さ解析の結果報告を受けた。

## 議論

モデルプラントの津波リスクを評価するレベル1・レベル2PRA研究プロジェクトを完了させたことは、日本の原子力産業にとって大きな節目となる成果であり、世界の津波が生じやすい地域におけるリスク解析に適用可能な手法とモデル化ツールの進展をもたらすものである。このモデルは、不確実性の評価に用いる体系的プロセスや津波起因リスクシナリオを幅広くカバーするなど、詳細な解析レベルを有するので、価値あるリスク管理ツールとして利用可能である。

すべての先駆的な研究と同様、この最初の適用を通じて重要な教訓が得られただけでなく、技術的な妥当性と発展性をさらに高める高度化の可能性を有している。

### 独立した技術レビュー

現在のところ、本プロジェクトで用いたモデル、データおよびこれらの裏付けとなる解析について、主にプロジェクトチームが、通常の研究開発・試験業務の一環としてレビューを行ってきた。同チームは、プロジェクトスポンサーである経済産業省の専門委員会からの助言も得ている。TACは定期的な説明において、個別の課題について各メンバーがコメントを提供してきたが、プロジェクト全体およびその結果についてレビューを行っていない。

このような技術的に複雑かつ重要な研究には、独立した掘り下げた技術レビューを受けることが不可欠である。このレビューは、手法、モデル、結果の技術的な質に対する信頼性を与えるために必要である。それによって、国内および世界の様々なサイトにおけるプラント固有のPRAに適用することが可能となる。

このレビューはまた、全体的な視点で行う必要がある。しかし同時に、このプロジェクトにおいて特別に開発したモデルや解析に焦点を当てた特別な注意が必要である。— 例えば、津波ハザード解析、構造物や機器のフラジリティ解析、コントロールポイントにおける波高の関数としての津波起因事象の選定、津波シナリオイベントツリー、浸水モデル、統合人間信頼性解析、格納容器の破損モードと破損個所、S/C外部冷却に対するMAAPモデルの修正、

原子炉建屋の浸水・非浸水エリアでのFPの放出・移行に関するMAAPモデルなどが挙げられる。

### 原子炉建屋の浸水解析

PRAモデルは、波高や浸水防止施設の状態に応じて、原子炉建屋に津波が浸水する可能性がある複数の経路を評価している。その結果生じる建物内の水位とそれに伴う機器の損傷は、個別の事象シナリオと適用される浸水モデルによって変わる。

本研究におけるレベル2解析の目的のひとつは、原子炉建屋内への浸水による以下の影響を検討することであった：

- S/C外部冷却
- 浸水区画に放出されたFPのスクラビング

研究チームは、以下のすべての解析において、忠実度を改善するためにより詳細なモデルが望ましい、と指摘している。

- 原子炉建屋内への水の流入と建屋全体での分布
- S/C外部冷却に関するMAAPモデル
- 原子炉建屋内浸水区域へのFP放出および建屋内全体での移行に関するMAAPモデル
- 浸水区画へのFP放出時のスクラビングに関する除染係数評価の改善

この研究の結果、セシウムソースタームに寄与する最重要要因は、原子炉建屋の非浸水領域への放出を伴う事故シナリオであることが示されている。しかし、これらの結果は、上述の冷却・スクラビング効果を考慮したものである。プロジェクトチームとの会合では、これらの効果によってソースタームや全体のリスクがどの程度低減されているのか判断することはできなかった。

対象を絞った感度解析として、原子炉建屋内の津波浸水による圧力抑制室（S/C）の冷却効果および核分裂生成物（FP）のスクラビング効果を除いた条件で、レベル1・レベル2モデルを定量化する必要がある。感度解析では、原子炉建屋浸水による機器損傷による影響を保持する必要がある。ただし、S/Cから原子炉建屋水への熱伝達（例：熱伝達係数をゼロ<sup>1</sup>に設定）と原子炉建屋の浸水によるFPのスクラビングの効果を取り除くこと（例：除染係数をゼロに設定）が必要である。

感度解析の結果と元の研究の結果（炉心損傷頻度やセシウムソースターム等）を比較することで、原子炉建屋浸水モデルを適用したことでもたらされた、全体的なリスク上の効果の推定が可能となる。また、比較により、最も重要なリスク上の効果がS/Cの冷却効果によるものか、FPのスクラビング効果によるものか、あるいはその両方によるものかが特定される。

---

<sup>1</sup> 感度解析では、S/Cから原子炉建屋内の水への熱伝達のクレジット(考慮)を除く必要がある。また、解析は、S/Cの温度上昇が炉心損傷の条件付確率とS/CでのFPのスクラビングに及ぼす影響を考慮する必要がある。

その上で、チームはより詳細なモデルが必要であるかについて、リスク情報を活用した意思決定を行う必要がある。

### シナリオタイミングの扱い

研究チームは、イベントシナリオのタイミングとダイナミクスをより詳細に扱う必要性について議論を重ねてきた。例えば、地震によって発生した津波であれば、詳細なシナリオタイミングのひとつとして、最初の地震動の到着から津波第一波の到着までの間における、プラントシステムの応答と運転員の対応が考えられる。他にも、事象シナリオの進展が熱水力モデルに及ぼす影響も考慮して、特定機器の故障や運転員対応が必要となる時点を決める、ダイナミックな浸水モデルの開発も含まれる。

現行の数多くのフルスコープPRA経験では、通常、詳細にタイミングを考慮するよりも、解析者が多くの単純化した仮定を行い、機能的影響を保守的に評価することが示されている。選ばれたリスク上重要なシナリオに対してはタイミングが明示的に評価される可能性があるが、比較的粗いレベルでは、タイミングの評価は、最も重要な機能的影響（例：外部電源喪失、所内の非常用発電機の故障、外部電源の回復のタイミングモデル）を説明できれば十分である。津波解析における事象シナリオタイミングのより詳細な扱いは、それによってプラント全体のリスクに大きな影響が生じるのであれば、正当化される。さらに、潜在的な緩和措置の扱いとそのタイミングについては、実際の運転経験を考慮する必要がある。

研究チームは、津波解析専用のより詳細な事象シナリオタイミングモデルを開発する前に、実用的なフルスコープのPRA全体にわたってタイミングに関する考慮事項がどのようにモデル化されているか、検討する必要がある。

### プラント固有PRAへの移行

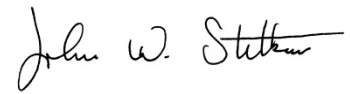
プロジェクトチームとの議論の中で、モデルプラント評価結果は、浜岡4号機のアクシデントマネジメントガイダンスに関する、優先度の高い事故シナリオの特定およびリスク情報を活用した意思決定を支援するための参考として活用し得るという報告を受けた。

上記の諸提言への方策を見いだせば、この研究モデルを、浜岡4号機における津波リスクを評価する、技術的に根拠がありかつ現実的なレベル1・レベル2PRAモデルへと効率的に変更することができるはずである。そうすれば、浜岡プラント固有のPRAを、リスク情報を活用した意思決定に活用することが可能になるだろう。例えば、重要な最初のリスク情報を活用した適用として、津波に対する既存の非常に重要な防止・緩和措置の有効性の確認や、過酷な津波に対応するためのアクシデントマネジメント措置の最適化などが考えられる。このモデルは、提案された追加的な予防・緩和措置に見込まれるリスク上の効果を評価すること、または過度の負担がかかる制約につながる保守性の特定に用いることも可能であろう。

### ガイダンス開発

この先駆的取組みが、津波リスクの高度かつ総合的な解析の土台となり、国際的なリスク評価コミュニティに多大な貢献を果たすものであることを踏まえ、NRRCは、日本の電力会社や標準化委員会が利用できる詳細な津波リスク評価ガイダンスを作成する必要がある。

敬具

A handwritten signature in black ink, reading "John W. Steetcar". The signature is written in a cursive style with a long horizontal flourish at the end.

ジョン W. ステットカー  
委員長