

本資料は2021年12月30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留意ください。

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

2021年12月30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: 2022年度NRRC研究計画案

アポストラキス博士殿:

2021年、原子力リスク研究センター（NRRC）研究チーム及び技術諮問委員会（TAC）は、前年同様コロナ禍による多大な影響を受けた。非常に困難な状況の中、重要な研究を止めることなく取り組み続けたNRRCスタッフ全員に対して称賛の言葉を贈りたい。

通常の形式ではチームとの会合を行うことができなかったため、TACは別の方法で2022年度研究計画のレビューを実施した。まず10月後半、NRRC研究チームより、各主要研究分野プロジェクトの概要を示したプレゼンテーション資料を受領した。これまで会合前に実施してきたように、TACはそれらの資料をレビューし、各トピックに対して個別のコメントと質問を準備した。そして、各メンバーによるコメントと質問をいくつか送付し、各研究チームで事前に検討を行うよう求めた。その後、2時間のビデオ会議を開催し、各主要研究分野に関するコメントと質問について議論を行った。口頭での議論の補足資料として、研究チームから詳細かつ丁寧な書面回答も受領した。会議での議論及びこれらの回答を踏まえ、このレター報告書で示すTACとしての統一見解、結論、提言を作成した。このレビューの目的は、研究計画の技術的な利点及びその計画がNRRCの現在のミッションを支えることとの関連性について、コメントを提供することであった。

なお、今回の取組みを通じて、対面式の会合で積極的に意見を交わすことの重要性が改めて浮き彫りとなった。今回のレビューに用いた方法で基本的な目的は達成されたが、直接的な技術交流が一人ひとりにもたらすメリットは、リモートのビデオ会議や書面による質問と回答では得られないものである。2022年は再び通常の会合形式に戻ることを心から願っている。

## 結論と提言

1. 2022年度研究計画全般において何ら大きな欠点はないと判断した。
2. TACは、マルチハザード確率論的リスク評価（MHPRA）に関する新規研究プロジェクトの開始を全面的に支持する。このプロジェクトは、地震による津波の評価手法・モデルを扱うものである。これは複合的なトピックであり、国際的なPRA経験も極めて少ない。NRRCの研究は、自然外部事象の総合的リスク解析に関する国際的慣行の進展に大きく寄与するものとなる。
3. レビューにおいて、TACは2022年度以降の計画でさらに注目に値する複数の研究活動を特定した。それらの活動に関する提言は、本報告書の「議論」セクションで概説している。

## 背景

2014年以降、NRRCの研究は、原子力発電所のリスクに寄与する事象、現象及び事故シナリオに関する科学的・工学的知識を大きく進展させている。そうした知識は、リスク評価手法及びモデルの現実性を大幅に向上させるものである。さらに、リスクとその寄与因子に関する理解を深め、各電力会社が実施するリスク管理活動のための科学的根拠の信頼を支えるものである。これらの便益は、すべての内部事象、内部ハザード、外部事象がもたらすリスクに対する包括的かつバランスの取れた評価を可能にする確率論的リスク評価（PRA）の枠組みの下、研究を実施することで達成される。PRAは、各原子力発電所サイトの最も重要なリスク源に焦点を当てる、効果的な「リスク情報を活用した意思決定（RIDM）」プログラム及びその実施を支える重要なツールである。したがって、各研究プロジェクトの範囲と詳細さは、総合的リスク管理に対する電力会社のニーズを満たすよう、注意深く調整を図ることが不可欠である。

研究計画の最も重要な目的の1つは、研究の優先度と範囲の理由付け、最新知見、NRRCの目標に対する研究の寄与の可能性及び重要性を含む研究ニーズの技術的背景を示すことである。研究計画に対するレビューでは、各研究プロジェクトの目的と、その支援タスク、技術的な関連性、これらの活動の相対的な優先度、及び追加研究に対する主要なニーズに焦点を当てた。今回は、研究活動が計画全体を通してどのように統合されているかを理解するために必要となる場合を除き、個々の研究活動の詳細事項または完了までのマイルストーンをレビューしていない。個々の研究プロジェクトの技術要素については、各プロジェクトの詳細レビューで個別にコメントする予定である。

## 議論

研究の全体的な範囲及び、主要研究領域における個々のプロジェクトの技術目標は、NRRCの短期的、中期的及び長期的目標と合致している。2022年度研究計画全般に

において何ら大きな欠点はないと判断した。個々の研究活動に関する議論には、4つの研究プロジェクトの特定要素に対する提言が含まれる。

### 研究適用

NRRCの研究活動の大部分は、手法及びモデルがフルスコープPRAにどのように組み込めるのか、実務的に実証できるレベルまで成熟している。2021年度研究計画に関する報告書において、こうした実証に伊方発電所3号機と柏崎刈羽発電所7号機の高品質PRAを用いるべき技術的理由を説明した。純粹に技術的視点から、TACは引き続き、研究チームに対して「モデルプラント」手法ではなくこれらのPRAを用いることを強く勧告する。「モデルプラント」研究は、様々なプラントサイトの多様なPRAを用いるものであり、技術的品質に違いがある形で目下開発が進められている。「モデルプラント」解析は、NRRCの研究者や電力会社のエンジニアに対して、統合フルスコープPRAの開発に向けた実務的な経験を提供するものではない。さらに、これらの多様な研究を行った結果、効果的な「リスク情報を活用した意思決定（RIDM）」にプラントリスク全体に関する知見やその寄与因子をいかに用いるか、その方法が実証されるわけでもない。

伊方・柏崎刈羽発電所それ以外の「モデルプラント」PRAの使用は、両発電所のプラント設計固有の特徴とは関係ないハザードに関する解析手法及びモデルの実証にとどめることを推奨する。

### 研究の拡張

TACは、2021年度研究計画に対する報告書において、いくつかの研究チームが様々な解析手法及びモデルのさらなる改善と拡張を提案している点を指摘した。また、特定のハザード及び損傷メカニズムを評価するためにより詳細かつ計算量の多いモデルを開発・使用しようとする傾向が顕著に見られる点についても指摘した。こうした詳細モデルへの志向は、本質的に大きな不確かさを含む現象がもたらすリスクの評価を行う上で妥当とは言えない数字の精度を信用することにつながりかねず、TACは引き続きこの点について懸念している。より詳細な解析ツールの開発を進める前に、各研究チームは、偶然的（aleatory）／認識論的（epistemic）不確かさをもたらす重要な源を特定すること、その特性を評価すること、そして定量化することが、適用方法・モデルの不可欠な一要素としていかに重要であるか説明し、文書化する必要がある。

また、非常に手の込んだ手法やツールを開発しても、技術的・資源的制約から電力会社のPRAエンジニアによるそれらの利用は大幅に制限される場合があることもこれまでの経験が示すとおりである。不確かさの注意深い取り扱いが容易にできる、より単純なモデルの方が、複合的な計算による不確かさを暗に含んだ精度よりも、実務的なPRAの適用においてより意味のある現実的なサポートになる場合が多い。したがって、研究チームに対して、まず、技術課題とそれに関連する不確かさの統合的な評価を提供できるよりシンプルな高度化を推進することを慫慂する。そのように改善した方法、モデル、ツールの適用によっていかなるメリットが得られるか、統合化した高品質PRAにおいて実証し、精査する必要がある。こうした初期段階で

の適用で得た実務的な経験と知見を元に、改善案に求められる範囲と詳細レベルを決定すべきである。より詳細な方法及びモデルについては、全体的なプラントリスク及び寄与因子の大幅な理解向上につながる場合及び、プラントエンジニア及び電力会社幹部の実務でのリスク情報を用いた意思決定(RIDM)の円滑化につながる場合にのみ継続すべきである。

まとめると、特定の解析方法、モデル及びツールのさらなる高度化に関する優先度と資源配分は、リスク情報を活用した統合的視点で決定する必要がある。その際には、特定の技術課題及び高度化案が、全てのハザード及びプラント運転モードによるレベル1・2リスク（関連する不確かさを含む）の理解向上にどのような影響をもたらすか検討すべきである。電力会社のエンジニア及び幹部は、各高度化案が、実務的なリスク情報活用のために、いかに自分たちのPRAの利用を改善するのか、明確に理解しておく必要がある。

### 個々の研究活動

以下の項目は、いくつかの個別研究活動の再検討のための勧告を要約したものである。

#### (1) 低出力／停止モード

TACは、低出力／停止（LPSD）運転モード中に発生する事象に起因するリスクを評価するための汎用的に適用可能な手法・モデルの研究について、日本の電力会社は何ら短期的な優先事項は見いだしていない、という報告を受けている。各電力会社は現在、プラント固有のLPSD解析の改善を図っている。したがって、2022年度から2024年度にかけてのNRRC研究計画では、この分野における具体的活動を定めていない。

国際的経験から、LPSD中に発生する事象による炉心損傷頻度（CDF）は、全出力運転中のCDFに匹敵することがわかっている。さらに、オフサイト放出の条件付き確率は、定検中の格納容器隔離系及び格納容器除熱系の状態変化により、ずっと高くなる可能性がある。したがって、各原子力発電所におけるリスクを完全に評価・理解するためには、日本の電力会社がLPSD中のリスクについて包括的かつ一貫性あるレベル1及び2PRA評価の実施を推奨する。

現行のLPSDリスク評価手法及び慣行をより深く理解するために、NRRC2022年度研究計画においては各電力会社のLPSD PRAに関する正式な調査及び体系的なハイレベルの技術評価を含めることを勧告する。

係る調査においてはまず、PRAで明示的にモデル化したLPSDプラント運転状態（POS）の範囲と定義を確定する必要がある。その上で調査により、各POSについて、PRAモデルが以下の主要課題をいかに取扱っているかを確定すべきである。

- 通常の系統運転配置

- 検査、保守、改造などによる、複数の機器や系統トレインの同時（連動した）停止
- 格納容器隔離の状態
- 機器故障による起因事象の特定
- 運転、試験、メンテナンス及び改造中のヒューマンエラーによる起因事象の特定
- 内部溢水・火災及び外的事象による起因事象の特定
- 炉心損傷及びオフサイト放出を防止する運転員行動の成功基準及び時間枠の定義

この調査結果から、意味のある技術的改善は不要と結果的に確認される可能性もある。そうした情報は、日本の原子力産業におけるLPSDリスク評価方法に大きな信頼をもたらすとともに、フルスコープPRAの重要な要素についてTACがこれまでに挙げてきた多くの疑問点を解消するのにも役立つ。一方、この調査によって知識のギャップや不完全性の原因、不整合等が明らかになれば、そうした情報はNRRCが特定の研究を立案する際や実務的ガイダンスを策定する際に役立つと思われる。

## (2) 使用済燃料

NRRCの使用済燃料リスク研究は現在、再臨界状態の可能性、燃料被覆管挙動のモデル化、代替策としてのスプレイ冷却及び自然対流冷却の効果等、特定の課題に対する決定論的解析の精緻化に注力している。2022年度活動計画には、国際的PRA経験及び知見に基づく、これら課題の潜在的なリスクの重要性に関するレビューが含まれるとTACは理解している。研究チームは適宜、より詳細な評価の優先度を決定する際にそうした情報を活用していく。TACは、これら重点活動の範囲や詳細さの指針となるリスク情報を活用した視点を全面的に支持する。

国際的経験から、使用済燃料の損傷を招く恐れがある事象のリスクの統合評価は、フルスコープPRAの重要かつ困難が予想される要素であることがわかっている。係るPRAは、全てのプラント運転モードにおける使用済燃料冷却に影響をもたらす事象に対して、一貫性をもって対応可能なものでなければならない。例えば、多くのPRA起因事象（オフサイト電源喪失、サポート系故障、内部溢水、内部火災、地震、津波、強風等）は、同時に炉心及び使用済燃料の冷却にも影響をもたらす恐れがある。その結果生じる事象シナリオの統合した評価は、利用可能な緩和策を注意深く評価し、また、炉内の燃料の損傷、使用済燃料の損傷、及びオフサイト放出の可能性を防ぐために必要な運転員の連携した行動もカバーしなければならない。PRAは、使用済燃料の損傷を招く恐れがある他の要因についてもカバーしなければならない。これには、ホウ素希釈による反応度効果や、原子炉燃料交換のための燃料移動、燃料プール貯蔵パターンの再構成又は輸送コンテナや乾式貯蔵キャスク積込み時に発生し得る事故等が挙げられる。

研究チームは、2022年度における使用済燃料リスク評価に関する国際的経験レビューの一環として、使用済燃料リスク解析を全出力／低出力／停止モードPRAモデルに統合する手法と慣行についても検討を行う必要がある。この取り組みの目的は、実務的なPRA実証を裏付けとして、使用済燃料に関するリスクの統合評価ガイダンスを作成することである。

### (3) 重畳ハザード

TACは、マルチハザードPRAに関する新たな研究プロジェクトを全面的に支持する。このプロジェクトは、地震による津波の評価手法・モデルを扱うものである。これは複合的なトピックであり、国際的なPRA経験も極めて少ない。NRRCの研究は、自然外部事象の総合的リスク解析に関する国際的慣行の進展に大きく寄与するものとなる。

この研究の範囲に関しては、これら解析の中でも最も困難な2つの要素—(1)地震と津波に対するサイト固有の合成ハザードの導出及び(2)これらの事象によるリスクの定量化するためにPRAモデルを適応させること—にまず焦点を合わせるべきである。

完成したPRAがいかにかに一貫性を持って完全に、以下の種類の事象全てに起因するリスクをカバーできているか、実証することが非常に重要である。

- 津波を伴わない地震（＝地震の影響のみ）
- 発電所構造物または設備に損傷をもたらさない地震または海底地滑りに起因する津波（＝津波の影響のみ）
- 発電所の構造物、系統、あるいは機器の少なくとも1つに損傷をもたらす地震に起因する津波（地震・津波の複合的影響）

ハザード解析は、これら事象の超過頻度が一貫性を持って定量化されているか実証するものでなければならない。例えば、地震による津波の相関ハザード曲線では、サイト固有の地震ハザード全範囲にわたり、津波を伴う地震に起因し得る様々な津波波高の条件付き確率を評価する必要がある。これはすなわち、実際に、PRAで定量化された各地震起因事象について、係る起因事象に寄与する海底地震により発生し得る津波波高の範囲の相関確率分布が必要であることを意味する。これは非常に複雑な評価である。夥しい数の海底地震源の位置、規模、変位を注意深く考慮に入れたものでなければならない。また、地震ハザード全体に対する各震源の寄与や、震源に対応した断層運動によって発生し得る津波波高の範囲についても評価が必要となる。発電所固有の地震及び津波のハザードを相関させる方法案や、合成ハザードにおける不確実さを定量化する手法案の検討に際しては、地震ハザード評価専門委員会（SSHAC）のポイントを絞った評価が必要となる可能性がある。

研究プロジェクトにおいて、PRAモデルが地震及び津波によるリスクの包括的かつ統合的評価を提供できるよう構築されているか実証する必要がある。また、いくつかのリスク寄与因子が「二重計上」されることのないよう論理的に構築されていることの実証も求められる。実務的なリスク解析に向けた主要技術目標を達成するためには、地震による津波の評価に限定せずに実証を行うべきである。実証において、すべての地震と津波（すなわち上記3種類の事象すべて）による全体的なリスクを正しく定量化するPRAモデルの開発方法を解析者に示す必要がある。

#### (4) 降下火山灰

研究計画は、火山灰の堆積によるリスクの評価方法・モデルのPRA実証を2022年度より開始する、としている。

このリスク解析は、数日間ないし数週間継続する可能性がある火山噴火中の火山灰堆積を考慮する必要がある。例えば、初期の影響として、火山灰の堆積前または堆積中に、自動プラントトリップや強制的な手動（すなわち先行した）停止につながる可能性がある。これらの影響は、全出力運転時のPRAモデルに含められる。しかし、火山灰の堆積が続いた場合、原子炉の停止後、長期間（全出力運転時のPRAで一般的に用いられる24時間のミッションタイムを大幅に超える期間）にわたり、崩壊熱除去維持に必要な系統に影響が生じる恐れがある。これらの影響は、プラント停止後の時間の関数として、崩壊熱レベルとプラント固有の系統運転構成を考慮するプラント停止モード時のPRAモデルに含めることが可能である。これらのモデルは、時間経過とともに閉塞した吸気フィルタ（及び場合によっては冷却水フィルタ）の清掃や交換に必要な作業員の行動についても考慮することが可能である。したがって、実証においては、全出力運転／停止モードの組み合わせたPRAモデルを用いて、噴火が長期に及んだ場合の全体リスクを説明できるようにする必要がある。

TACは、全体的な研究プログラム及び個々の研究プロジェクトをレビューし、NRRRC及び日本の原子力産業界が包括的なリスク情報を活用した意思決定という目標を達成するためにNRRRC研究チームと引き続き業務を続けていくことを楽しみにしている。

敬具

ジョン W.ステットカー  
委員長

#### REFERENCES

1. "NRRCOverview:ResearchProgramforFY2022,RiskAssessment,"PresentationtoNRRCTechnicalAdvisoryCommittee,November15,2021,Proprietary.
2. "NRRCOverview:ResearchProgramforFY2022,ExternalNaturalEvents,"PresentationtoNRRCTechnicalAdvisoryCommittee,November18,2021,Proprietary.
3. "NRRCOverview:ResearchProgramforFY2022,RIDMPromotion,"PresentationtoNRRCTechnicalAdvisoryCommittee,November18,2021,Proprietary.
4. TechnicalAdvisoryCommitteeindividualmembers'commentsandquestionson"NRRCOverview:ResearchProgramforFY2022,RiskAssessment,"November11,2021,Confidential.

5. Technical Advisory Committee individual members' comments and questions on "NRRCO verview: Research Program for FY2022, External Natural Events," November 11, 2021, Confidential.
6. Technical Advisory Committee individual members' comments and questions on "NRRCO verview: Research Program for FY2022, RIDM Promotion," November 11, 2021, Confidential.
7. Videoconference on NRRCFY2022 research program for Risk Assessment, November 15-16, 2021, Confidential.
8. Videoconference on NRRCFY2022 research programs for External Natural Events and RIDM Promotion, November 18-19, 2021, Confidential.
9. NRRC Research Team responses to comments and questions on "NRRCO verview: Research Program for FY2022, Risk Assessment," December 11, 2021, Confidential.
10. Technical Advisory Committee of the Nuclear Risk Research Center, "Proposed NRRC Research Plan for Fiscal Year 2021," February 16, 2021.