

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2月16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: 2021年度NRRC研究計画案

アポストラキス博士殿:

2020年は特別な年として記憶されるだろう。世界中の個人、家族、組織と同様、原子力リスク研究センター (NRRC) および技術諮問委員会 (TAC) もまた、絶えず変化する課題と不確かさにいかに適応していくか、様々な方法を創出してきた。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2021年度研究計画のレビューを実施した。まず11月、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。今回、会合での活発な議論を通じて我々の理解を明確化することが叶わなかったため、代わりに各チームメンバーにコメントと質問を送付し、検討を求めた。各研究者から、各質問について詳細かつ丁寧な回答を受領した。これらの回答について議論を行い、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メリット及びその計画がNRRCの現在のミッションを支える上での妥当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、書面による質問と回答では得られないものである。2021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. 2021年度研究計画全般において重要なギャップはないと判断した。
2. 特定のハザード及び損傷メカニズムに対して、より精緻な計算モデルを開発すると、本質的に大きな不確かさを含む現象をもたらすリスクの評価を行う上で正当化できない、数値的な精度ばかりを重視することにつながりかねない。より詳細な解析ツールをさらに開発する前に、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原因が、適用方法・モデルの不可欠な一要素としてどの程度重要なのか特定し、その特性を評価し、そして定量化することを説明し、文書化する必要がある。
3. NRRCの研究活動の大部分は、これらの手法及びモデルがプラント固有の確率論的リスク評価（PRA）にどのように組み込めるのか、具体的に実証できるレベルまで成熟している。完全に統合されたPRAが実現すれば、リスクとリスクに影響を与える因子について、バランスのとれた評価と理解の重要性が実証されるだろう。こうした統合的な物の見方を通じて、個々の課題を単独で検討しては分からない、プラント固有の「リスク情報を活用した意思決定」（RIDM）及びリスク管理に対する実際的知見を得ることができる。また、この物の見方を通じて、リスク情報に基づく枠組みも提供され、こうした枠組みを用いて、特定の方法及びモデルの一層の改善に焦点を絞った研究に関する優先付けを整理することが可能となる。NRRCの各研究トピックにおいて、現時点で利用可能な方法及びモデルは、直ちに伊方発電所3号機及び柏崎刈羽発電所7号機で進行中のパイロットプラントPRAに含めるべきである。
4. レビューの中で、TACは2021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。特定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。また、TACは「地震課題に関する2021年度NRRC主要研究計画」について、このレターと対になるレター報告書を別途発行した。その報告書では、地震研究計画の2領域について、より詳細な議論と提言を行っている。

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、現象およ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、リスク評価方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の深化や各電力会社が実施するリスク管理活動の科学的根拠に対する信頼を支えるものである。これらのメリットは、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ている。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）」プログラムおよ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、統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、慎重

に調整を図ることが不可欠である。NRRCの研究活動への電力会社のRIDMプログラムの統合の現状については、別のレター報告書でコメントする。

研究計画の重要目的の1つは、研究ニーズの技術的背景を示すことであり、これには、理論、最新知見、NRRCの目標に対する研究の潜在的な寄与及び重要性が含まれる。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、これらの活動における相対的な優先度、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は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および、各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、中期的および長期的目標と合致している。2021年度研究計画全般において重要なギャップはないと判断した。個々の研究活動に関する議論には、複数の研究プロジェクトにわたる特定構成要素に対する提言が含まれる。

研究の拡張

現在、いくつかの研究プロジェクトがNRRCの6年間に及ぶ活動で開発された解析手法・モデルの改善と拡張に注力している。その多くは、従前の研究プログラムから継続してきたものである。TACは、特定のハザードおよび損傷メカニズムを評価するために、より詳細な、有限要素モデル、熱水力モデル、火災シミュレーションモデル等を開発したり使用するという傾向が明確に見られる点を指摘した。我々自身の経験と研究チームとの議論から、これらのツールは通常、入力パラメータ及び物理現象および機能的相互関係に関する選定モデルにより決定される「点推定」結果のみを提供するものである、と理解している。これらの結果は、非常に詳細で集中的な計算から導かれるため、本質的に大きな不確かさを含む現象を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ない。不確かさを、明示的に特定し、その特性を評価し、定量化することは、リスク評価プロセスの基本的要素である。設備がもたらすリスクの全体的レベル、リスクの寄与因子および、そうしたリスクの最も効果的な管理方法を理解することが、全体を構成するうえで不可欠である。

提案された解析方法が、制御パラメータの固有の不確かさおよび、適用モデルの不確かさの影響をどのように定量化するか、および解析結果がそれらの不確かさをどのように説明するかについて、研究チームに質問した。また、「点推定」結果の周りに形式的に不確かさ分布を単純に後付けするのは適切ではない点についても指摘した。複雑な物理的・機能的相互関係を適切に説明するには、不確かさを計算プロセスの一部に統合した形で定量化する必要がある。したがって、不確かさを十分に統合した定量化を提供できないモデルや解析は、今のフルスコープリスク評価を支

えるには十分な価値がない。実際のところ、不確かさの厳密な取り扱いが容易にできる、より単純なモデルの方が、複雑な計算による不確かさを暗に含んだ精度よりも、リスク評価にとってより意味のある現実的なサポートになる場合が多い。より詳細な解析ツールをさらに開発する前に、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根本原因を特定すること、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。

研究適用

日本の産業界は、伊方発電所3号機及び柏崎刈羽発電所7号機の2つのパイロットプラントに対し良質のPRAの開発を積極的に支援している。これらのPRAはNRRC及び産業界の全体的な目標にとって非常に重要である。これらは、プラント固有のリスク及びその寄与因子を包括的に評価するために、国際的な先行事例のある（state-of-the-practice）手法及びモデルをどのように適用するか実証する。また、望まれる品質レベルを達成するために現在のモデル及び解析を更新及び拡張していくこととなるため、全ての日本の電力会社のPRA実施者に対して重要な経験及び教訓も提供する。各パイロットプロジェクトの範囲は現在、全出力運転中に生じる内的事象からのリスクを評価するためのレベル1及びレベル1.5PRAモデルの開発に主に焦点を当てている。TACはまた、パイロットプラントが低出力及び停止モード中に発生する内部事象をもたらすリスクを評価するPRAモデルも開発しているが、保管中の使用済燃料の損傷からのリスクについては評価対象外となっている、と理解している。

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、具体的に実証できるレベルまで成熟している。いくつかの事例では、開発された手法及びモデルは国際的な先行事例と機能的に合致している。その一方で、研究がまだ相対的に予備的な段階にあり、保守性やむしろ大きな不確かさをもたらす何らかの内在的要因を抱えている事例もいくつかある。それでも、たとえその様な予備的な段階にある手法及びモデルであっても、フルスコープPRAの観点で検討を行うには、十分によく理解されている。

現行の研究プログラムには、様々なプラントサイトから選定され、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別々の「モデルプラント」PRAを用いて、各解析技法を実証する計画が含まれている。以前のレビューにおいて、各研究プロジェクトの手法及びモデルの実際的な実証では、利用可能な最善の国内PRA—すなわち、伊方発電所3号機と柏崎刈羽発電所7号機の高品質PRAの最新版—を用いるよう強く提言した。TACは引き続き、「モデルプラント」手法ではなく上述の方法を用いることを強く推奨する。

NRRC、日本の原子力産業界、およびこれらの重要な取組みを支援している各電力会社にリソース上の制約があることは十分理解しており、注意も払っている。しかし、こうした提言を行う技術的根拠についても説明する義務がある。

リスク評価は、ばらばらの数学的演習問題ではない。リスク評価の力は、すべての運転モードでプラントの安全性を脅かす可能性のある、様々な内部事象、内部ハザ

ード、外部事象の広い範囲を包括的に評価することで発揮される。PRAは、固有の不確かさを含め、これらのリスク源を統合的、客観的、かつバランスの取れた評価を行う枠組みを提供するものである。こうした統合的な視点を通じて、プラント固有のRIDM及びリスク管理に対する実用的な知見を得ることができる。これは、個々の問題を単体で検討したのでは実現できないものである。

進展する手法及びモデルを良い品質のフルスコープPRAに統合することで、特定の解析技術に焦点をあてた改善を行うにあたり研究優先課題を特定するために、リスク情報を活用した極めて重要なフィードバックが得られる。実際、PRAには、リスクの最も重要な寄与因子を体系的に検討する反復的な精緻化プロセスが常に含まれている。場合によっては、より精緻化された解析を実行することにより、有意な保守性または不確かさの原因を削減することが可能である。その他、プラントのハードウェア、操作手順、または保守方法を変更することで、最も有益なリスク管理の選択肢が得られる場合もある。

統合リスクという観点に照らして、各問題の全体的なプラントリスクへ寄与度が低い場合、保守的かもしれない解析をさらに精緻化することは、正当化されず必要でもない。原則としては、それらの解析はさらに改善しうるかもしれない。しかし実際のところ、そうした改善がプラントのリスク及びその寄与因子の理解に意味のある効果を与えることはなく、さらなる労力を費やす理由はない。したがって、例えばある特定の損傷メカニズムが特定のハザードによるリスクの90%に寄与する場合でも、この損傷がプラント全体のリスクの1%にしか寄与しない場合、これらのモデルと解析をさらに精緻化する必要はない。

多様な「モデルプラント」研究を用いて各研究トピックの適用性を実証し、さらなる研究改善に向けた優先順位に関する情報を得ることは、バランスの取れたRIDMのための統合リスク評価ツールおよび能力を開発するという日本の産業界およびNRRCの目標とは合致しない。一方、伊方発電所3号機と柏崎刈羽発電所7号機をPRAのパイロットプラントに使用すれば、これらの目標を支え、プラントリスクとRIDMに関する統合的視点の重要性を高めるだろう。

個々の研究活動

以下の項目は、各研究活動の再検討に向けた提言を要約したものである。

(1) マルチユニットPRA研究の範囲

マルチユニットPRA (MUPRA) 研究範囲は、2021年度以降、レベル1及びレベル2リスクの統合評価を含めるよう引き続き提言する。

一部のレベル2PRAモデル及び解析手法は、現時点でレベル1PRA技法ほど進展していない、ということは理解している。しかし、統合マルチユニットリスク評価というトピック全体は、国際的なPRAコミュニティでも進化しつつある研究分野である。NRRCの研究チームは、複数のユニットが損傷した場合に発生する可能性がある、オフサイト放出のリスクを検討することが重要であると認識している。したがって、

この研究はその目的に焦点を当てるべきである。現行のレベル2PRAモデルは今後改善していく可能性はあるが、この研究では今すぐにでも、格納容器損傷およびオフサイト放出の寄与因子をMUPRAモデル及び解析の主要指標として、明確に検討すべきである。特定のレベル2PRAモデルが不十分であっても、研究はオフサイトリスクの寄与因子となる現象、故障モード、既知の事故シナリオに対応可能である。

2020年度研究計画に関する報告で記したように、レベル1の炉心損傷頻度のみに限定していると、予期せぬ技術課題やプロセスの繰り返し、研究上の非効率性が生じる可能性がある。さらに重要なことに、レベル1リスクに限定している場合、適用する解析方法、複雑なモデルを統合または分離する技法、その他の慣行に関する意思決定に微妙な影響をもたらす可能性もある。それによって、例えばオフサイト放出に影響をもたらすマルチユニット事故シナリオの重要な寄与因子を不適切にも見落としたり、隠してしまう恐れもある。これらの潜在的な落とし穴を回避するために、MUPRA研究活動では、2021年度以降、統合レベル1・レベル2リスクを明示的に評価するよう提言する。

(2) 地震による津波のリスクを評価するための方法とモデル

2020年度研究計画に関する報告書では、2021年度以降、本研究を拡張し、サイト毎に地震による津波の複合リスクのモデリング・定量化方法を実証する追加活動を含めるよう提言した。この問題が外部事象によるリスクの解析の完全性にとっていかに重要であるか、また、これらの相互に関連するハザードの頻度およびそれらがもたらす結果について理路整然と分かりやすいモデルを開発することがなぜ技術的に困難であるかを説明した。

NRRCはこのトピックを研究計画に含めるか検討中、ということであった。2021年度研究計画には、地震による津波に対する実用的なハザード解析手法を開発するため、地震及び津波による両者の影響を考慮した試験的なPRAの適用を行うための具体的なプロジェクトおよびスケジュールを含めることを提言する。

(3) オフサイト電源喪失に寄与する降下火山灰の評価

火山リスク評価に向けた研究計画案には、電気絶縁への火山灰の堆積が、特定のサイトでオフサイト電力喪失を招くレベルのアーク発生をもたらす条件付き確率を評価するモデル及び解析方法を開発する、というタスクが含まれている。この研究活動については、継続しないことを提言する。

実際のところ、重大な火山事象とそれに伴う地震動および地域的／局地的な大量の降灰の発生中に、オフサイト電力喪失をもたらす原因は多数存在する。絶縁やがいしに堆積する可能性のある火山灰の厚さを推定する数値解析手法を開発しても、これらの事象発生中におけるオフサイト電源喪失の条件付き確率について有意な推定値は得られない。実際のところ、これらの解析では、条件付き確率の絶対最小下限（の概算推定値）しか得られない可能性がある。さらに、火山灰の輸送および堆積、含水率、潜在的な絶縁設備の汚損、アーク発生、その他様々な地理的条件、物理的

配置、電気設備構成における、複数の送電線、変圧器、遮断器上の絶縁体せん絡による影響に関するモデルには、重大な不確かさがある。

重大な火山噴火の頻度、複数の電源喪失要因および解析の重大な不確かさを考慮すると、重大な火山事象によるリスクの合理的な境界評価としては、単にオフサイト電源が長期間（例えば、24～48 時間以上）喪失するとの想定でよいように思われる。次にPRAモデル及び解析は、結果的に生じる事象シナリオを軽減するために必要なプラント固有の設備（非常用発電機への給気、建物の換気、冷却水系等）に、火山灰がどのような影響をもたらすか、という点に焦点を向けることになるだろう。これらの解析を実施するための方法とモデルは、この研究の現行の範囲に適切に含まれている。

もちろん、想定されるオフサイト電力喪失には、特定の噴火、特定の原子力発電所サイト、およびその周辺の電力網に対する大きな保守性が含まれる可能性がある。しかし実際のところ、噴火に関連するすべての原因によるオフサイト電源喪失の条件付き確率と喪失期間を推定する複雑かつ詳細な解析を進めるかどうかは、そうした事象がプラント全体のリスクの重要な要因である場合に限られる。

(4) PRAピアレビューガイダンスと実施

包括的で独立したピアレビューは、PRAの技術的品質およびリスク情報を活用した適用に向けたPRAの利用に関する信頼を確立する上で不可欠である。電力会社のエンジニア及び管理者は、これらのレビューを通じて、プラント固有のPRAモデル及び解析の各要素が、明確に定義された技術的能力基準にどのように準拠しているか、客観的フィードバックを得ることができる。PRAの能力と限界を理解することは、そのツールを効果的に使用して、プラントの運用、保守、改造案および緊急問題に関する日々の意思決定を支える上で極めて重要である。米国の場合、一貫して適用されるピアレビューは、電力事業者のPRAを使用して、プラントの許認可ベースの「リスク情報を活用した変更」案の裏付けとして使用できるという、規制上の信頼をもたらす。また、標準化されたピアレビューガイダンス、基準、および評価をあらゆるPRAで使用することによって、すべての電力事業者または選定されたプラント群に適用される、リスク情報を活用した産業主導の取組みに対する規制上の信頼も向上する。

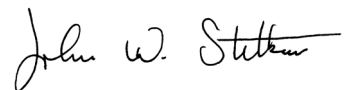
NRRCは、現行のPRAピアレビューガイダンス案の作成に主導的な役割を果たしてきた。我々は、日本の原子力産業界、そして最終的には各原子力発電所が、ピアレビューの実施に責任があると理解している。米国での経験から、訓練を受けた経験豊富なPRA専門家によって実施された、これらのレビューにおける技術的一貫性がいかに重要であるか分かる。また、これらのレビュー能力と必要な技術的専門知識の開発には、相当の努力と時間が必要である。

現在、NRRC等の組織において、PRAの様々な技術分野や方法について、国内電力会社の技術者能力拡大を目的とした研修が実施されている。日本のすべての原子力発電所PRAに対して一貫性ある技術慣行に沿ったピアレビューが確実に実施される

よう、NRRCに対して、2021年度以降、具体的なピアレビュー研修プログラムを開発することを提言する。

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、NRRC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NRRC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