2021年秋の大会

2G_PL03,04 は同予稿

リスク部会セッション

将来にわたる確率論的リスク評価の活用のために
-リスク活用研究専門委員会からの提案，並びに今後の研究動向について-

For continuous application of PRA to future
- Suggestions from Research committee of Risk application and research trend in future -

研究専門委員会の提案 (1) (2)

Suggestions from Research Committee (1) (2)

*牟田　仁[1]，*當房　拓朗[2]
[1]東京都市大学，[2]東芝エネルギーシステムズ

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降，重要な活動の一つとして，「リスク」情報を活用した意思決定に基づいて効果的に安全性の向上を図る取り組みがなされてきている．確率論的リスク評価（PRA）は原子力施設の設計から廃止措置に至る各段階において多岐にわたる応用が可能な技術であり，1990 年代以降，評価手法の研究が行われ，更にはアクシデントマネジメント，新しい原子力安全規制の考え方，リスク情報を活用した検査に適用されてきた．

PRA による知見の実務への応用には，適切なデータやパラメータの設定，目的に合致した合理的・科学的な解析・評価手法の構築，不確かさの評価等，幅広い科学・技術分野の知識が必要であり，多くの研究者，技術者がこれらを共有している必要がある．また，最新知見を適時に評価・応用し，得られた情報を PRA の研究・開発．実務を行う主体で共有することは，効果的・効率的な PRA 手法の発展に向けた重要なステップとなる．

以上の観点に鑑み，現在から将来においてリスク情報の活用に参照される PRA に必要となる技術開発の方針の策定に資すること，並びに PRA に携わる若い世代の研究者･技術者の育成にも寄与することを目的とし，令和元年度に「確率論的リスク評価の活用及び手法調査」研究専門委員会を設置した．

本委員会では，検討領域をレベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析以外の領域），レベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析），レベル２および３PRA の３つのグループに分類し，議論を進めた．特にレベル１PRA は，近年の論文数が比較的多かった人間信頼性解析（HRA），従属故障，動的解析等を重要トピックとして取り扱い，その他の領域とは別個に取り扱った．この結果，各分野の現状の認識から，①今後の展開と提言，②人材育成方針の２つの観点から提言をまとめた．

1.　PRA の各分野の今後の展開と提言

1-1. レベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析を除く）に関する提言

内的事象レベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析を除く）の技術は，一般的に出力運転時と停止時の運転状態を区別して PRA が分類されているものの，事故の発端となる事象の特性に応じて，発電システムの内部で起きる機器故障及び人的過誤などの内的事象に起因して，評価する指標の範囲として炉心損傷頻度までを評価する目的においては，技術的にほとんど成熟していると考えられる．

また，資源に乏しい我が国では，資源を有効活用する観点で，原子力発電所で発生した使用済燃料から再利用可能なプルトニウムやウランを取り出して，燃料として加工し，もう一度発電に利用する核燃料サイクルを推進していることもあり，潜在的なリスク（公衆や環境への影響の頻度と大きさ）が大きい原子力発電所の PRA 技術の研究開発が優先されるべきではあるが，再処理施設や加工施設などの核燃料施設や原子力発電所の廃止措置に対する PRA 技術の研究開発も重要である．

国内外での内的事象レベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析を除く）の近年の研究開発に係る動向を踏まえると活用する目的を踏まえて取り組むことの重要性を確認した．しかしながら，リスク情報活用の拡充のためには，安全目標の議論が未完，未制定である現状では活用の道筋が見えていない．

これらの課題を解決していくことが必須であると考えられる．

レベル１～３の各区分で PRA 評価がなされてきたが，このような区分を取り払って，STEP1：何が起こるのか，STEP2：どう対策するか，STEP3：どう活かしていくか，の 3 段階で PRA 評価が実施されることが重要である．例えば，地震ハザード評価を担当するエンジニアとフラジリティ評価を担当するエンジニアが交流し，お互いが専門性を有する分野の理解促進などを進めるべきである．また，リスク情報の設計への活用の観点からは，リスク評価を担当するエンジニアと設計を担当するエンジニアの交流も進めるべきである．

1-2. レベル１PRA（人間信頼性解析/従属故障/故障データ/動的解析）に関する提言

人間信頼性解析の分野では，現状の解析評価技術の拡張，データ収集或いはデータベース構築，簡易手法の開発，外部事象への適用といった課題がある．福島第一，福島第二，女川，東海第二のいずれの発電所においてもレジリエンスな対応の好例が多く見られたことから，人間の緊急時の認知メカニズムやレジリエンス能力を考慮したモデルの開発と実プラントにおける対応データの収集の必要性を指摘したい．IDHEAS-ECA（Event & Condition Assessment）を用いた評価により米国での FLEX の有効性を示した例もあり，日本においても，Phased Approach など緊急時においてレジリエンス能力による現場力の有効性を定量的に示し，緊急時対応を安全評価においてヒューマンクレジットとして認められる努力が重要であると考えられるが，評価の枠組みは依然課題が多い．

マルチユニットのリスク評価は手法の研究開発段階であり，安全目標の議論に資する PRA モデルの開発が求められる．また，リスク情報活用の観点から，マルチユニット，マルチサイトのリスク評価のニーズは何か，リスク情報活用として評価をどのように活かすか，評価することのメリットは何か，といった議論も必要である．リスク情報活用の観点での評価のメリットを示すことで，産業界における研究予算の確保や人材育成の動きを活発化させることも求められる．外的事象（特に地震）のマルチユニット，マルチサイトのリスク評価モデルの構築においては，相関のモデル化が重要となるため，地盤や建物，構築物に係る土木建築系の専門家，及び機器，設備の損傷の評価に係る専門家の更なる関与が求められる．

共通原因故障（CCF）に関しては，実機プラントからの CCF データ拡充は殆ど見込めないため，実データ不足を補完する可能性のあるシミュレーション技術開発は重要である．但し，検証データが少ないことから，詳細評価を狙うよりも，保守性を取り込んだ簡易評価モデルを志向すべきと考える．また外的事象の相関性についても重要な課題と考えられるが，合理的な範囲での詳細さを探っていく必要があろう．

動的 PRA の課題としては，過大な計算コスト，成功/失敗の分岐確率データ及び評価式の拡充，及び人的過誤モデルの妥当性検討にあると考える．計算コストの低減には，より革新的な動的 PRA 手法開発，もしくは，合理的な簡素化 PRA モデル開発が重要になると考える．国内外において動的 PRA 手法開発が精力的に行われているにも関わらず，実機適用が思うように進まない背景には，計算コストへの強い懸念があると推測される．現在の PRA はより多くの SSC を取り込む事で詳細化の一途を辿っており，リスク定量化に要する時間は内的事象で数時間/プラントとなることもある．そのため，数万ケースの解析を流す必要のある CMMC のような手法を高度化するだけでは，実用に足る評価ツールの構築は困難と考える．一方，PRA モデル自体を合理的に簡素化することで 1 ケースあたりのリスク評価時間を低減する方法は，計算コスト低減に有効であると考える．しかしながら，PRA モデルを簡素化する際には，動的 PRA の評価結果（リスク）の使用目的を明確にしておく必要があると考える．

1-3. レベル２及び３PRA に関する提言

軽水炉のレベル２PRA 研究は現行の枠組みで今後も継続していくことが期待される．OECD/NEA の下で行われた福島第一原子力発電所の事故解析に関するベンチマーク解析（BSAF）国際研究プロジェクトの経験を通じ，溶融燃料のリロケーションモデル，ヨウ素化学挙動モデル，また，格納容器へ影響を与える MCCI や水素爆発等の解析モデルに不確かさが残る現象として当該プロジェクトの報告書において指摘されている．さらに１Ｆ事故のような長期間の事故を解析する場合，一旦沈着，沈降した FP が再度浮遊して格納容器内及び建屋内を移動する現象をとらえることが必要であると指摘しているが，現状のシビアアクシデント総合解

析コードではこのメカニズムを考慮していない．このため今後検討を進める分野であると考えられる．

軽水炉を対象としたレベル３PRA 研究では，大気拡散・沈着解析において各国開発を進めているが，近年これらコード間の比較や実測データとの比較はあまり報告されていない．このためこのような比較計算等は今後行うべき課題である．また，複合災害を考慮した場合には予定していた避難経路を利用できない場合も考えられ，そのような場合の避難時間推計の結果をレベル３PRA に反映させる方法など，検討すべき課題が残っている．健康影響評価についても同様，近年の最新知見を取り込んだ評価を行う必要がある．

高速炉を対象としたレベル２PRA 研究では，ソースターム評価手法開発がリスク情報活用の観点から重要視されている．しかしながら基礎的な試験データが不足しておりかつ実験実施が容易ではない．このためこの分野へのリソースの投入が必要と考えられる．また，国際協力による効率的な研究開発を通じて，試験データや解析モデルのデータベース化を進めていくことも重要である．炉型横断的なリスク情報活用アプローチを国内に取り入れるためのステークホルダー間の交流が必要である．

高温ガス炉を対象とした PRA 研究では，より現実的なリスク評価に向けた評価手法改良や不確実さ低減に向けた研究，多目的利用に向けた研究，リスク情報の活用に係る研究等が重要である．具体的には，異常状態における被覆燃料粒子からの核分裂生成物放出挙動評価手法，水素製造施設の異常を起因とする高温ガス炉のリスク評価手法，及びリスク情報を活用した安全重要度分類や耐震設計上の重要度分類，防護措置範囲の適正化手法の研究である．

核燃料施設を対象としたレベル２PRA 研究では，すでに簡易的なソースターム評価を行う手法及びデータは整備されているが，リスク情報活用や重大事故等対処設備の有効性評価を行うためには対象事象ごとに詳細な解析モデルを構築する必要がある．特に重大事故として取り上げられている高レベル廃液貯槽の冷却機能喪失事故では，高レベル廃液が蒸発及び乾固する過程で放出される Ru の建屋内移行挙動は雰囲気に依存する．このため Ru の放出挙動に係る実験及び解析モデル化は進めるべき研究の一つと考える．

2. PRA に関する人材育成方針

本研究専門委員会の設置目的である“PRA に携わる若い世代の研究者・技術者の育成に寄与すること”のため, 各委員の知見や調査結果をもとに, PRA の関連分野で活躍する人材育成方針に関する提言をまとめた．

2-1. PRA に関する全般的な人材育成方針

PRA 人材の育成にあたっては，属性と責任または関心に応じた教育の提供がなされる必要がある．新人エンジニアの育成では，ポイントを押さえた講習が有効である．原子炉施設のリスクマネジメントを行うマネージャー以上の育成では，深層防護の観点で説明できるマネージャーを育成し，実務メンバーに説明できるよう促すことを理想として，教育内容に含めることが重要である．リスク情報活用の観点では，意思決定のための情報とプロセスを文章化し，実際に適用した事例を収集及び蓄積してリスク情報活用集とすることで広く共有することが有意義である．

2-2. レベル１PRA に関する人材育成方針

本節では人間信頼性解析，従属故障，故障データ，動的解析等の分野に関する人材育成方針を述べる．人間信頼性解析（HRA）に関しては，プラント，PRA，ヒューマンファクターの 3 つの知識をバランスよく習得する必要がある．このような人材は不足していることから，HRA 研究のロードマップや HRA 専門家へのキャリアパスを提示し，若手研究者の参画を促すこと，大学での講義・研究を促進すること，HRA の原子力以外への他分野展開を促進し，研究開発及び人材確保を継続して行う環境を整備する必要がある．マルチユニットに関しては，今後主流となるテーマであり，多数の人材がこの分野に入ってくることが望ましい．安全目標等の社会性の議論もあり，社会系を専門とする人材の参加も求められる．従属故障（内的事象）に関しては，現状採用されている米国モデルが成熟しており，開発に携る人材育成は不要と考える．CCF モデルに関しては, 不断の検証努力が粛々と必要で, 場合によっては新たなモデル構築が必要となる可能性が残る．従属故障（外的事象）に関しては，主要な外的事象（地震・津波）を起因とする CCF は地震 PRA や津波 PRA の一部に限定され，外的事象 CCF 専門の人材育成は不要と考える．一方，外的事象 PRA には，リスク評価

に係る知識以外に，構造力学系の専門知識が必要となる．そのため，HRA 同様に，専門家へのキャリアパスの提示が重要である．故障データ分析に関しては，統計の専門家を継続的に育成する必要がある．動的解析（動的 PRA）に関しては，静的 PRA に必要となる幅広い知識に加えて，動的 PRA に係る広範な知識を習得する必要があり，あらゆる知識を有する 1 人の専門家を育成するのではなく，各分野の専門家が集まり，議論できる環境も重要である．

2-3.レベル２及びレベル３ PRA に関する人材育成方針

レベル２及びレベル３PRA に関しては，物理・化学等の現象解析の部分があることから，大学での教育・育成に期待する．また，シビアアクシデント研究においては，個々の事象についての深い知識とともに事象全体を把握できる人材を育成する必要がある．加えて，レベル１及びレベル２，レベル２及びレベル３と境界を超えてシームレスに事象進展を把握するような教育も必要である．我が国においては，高速炉及び高温ガス炉はともに，研究開発段階であり，安全研究に関わる人材は非常に限定されるものの両炉の PRA にも軽水炉の評価手法や知見を適用可能である．このため，大学での講義を通じて，両炉の認知度の向上や基礎知識の習得，公募事業を活用して大学や研究機関の研究への参画の促進が必要と考える．

2-4. 若手技術者からの提言

若手技術者が，PRA 評価を習得するためには，大きく３つの習得が必要であると考える．１つ目は，プラント・現象に対する理解である．評価対象のプラントと機器，設備に生じる現象を正しく把握することで，リスク評価のシナリオ設定が正確なものとなる．２つ目は，PRA 技術の習得である．PRA の概念や決定論との違い，PRA 分野毎の評価方法等の習得が必要となる．３つ目は，PRA 評価ツールの習得である．PRA 評価を実際に行う PRA 評価ツールの操作方法等の習得を行うことで実際に PRA 評価が可能となる．

上記１つ目のプラント・現象に対する理解は，様々な図書を参考にすることで，習得可能と考えられる．２つ目の PRA 技術の習得は，現状 PRA 技術に関して基礎から習得することが可能な教科書が少ない．練習問題等を含む教科書を広く公開，共有することで，若手技術者だけではなく，学生等にも広く PRA 技術の習得を促進することができるのではないかと考える．３つ目の PRA 評価ツールの習得は，各社において OJT 等で行われているものと想像されるが，早期の人材育成の観点では，学会が中心となり，若手技術者等に対して演習を含む講習会を開催することで，効率的な人材育成が可能となると考えられる．

---

*Hitoshi Muta [1] and *Takuro Tobo[2]
[1]Tokyo City Univ., [2] Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation