

リスク部会セッション

最近の PRA 手法の研究・開発動向

(2) 動的な PRA の手法の開発動向について

(2) The trend of research and development of Dynamic PRA

*木下 郁男

原子力安全システム研究所

1. はじめに

本稿では、従来の静的なイベントツリー(ET)やフォールトツリー(FT)に基づく評価手法に動的な解析技術を組み込んだ動的 PRA の開発動向を紹介し、その有効性について議論する。

2. 動的 PRA の研究動向

2-1. 手法概要

従来の ET/FT に基づく静的 PRA では、起回事象に続いて生起する事象を予め与えた上で評価を行う。このため、事象生起のタイミングや順序が固定されており、原子炉システムの状態の動的変化が考慮されないという欠点がある。一方、動的 PRA では、事故時の原子炉内の物理プロセスを模擬するシミュレーションコードと、これと安全装置の動作や運転員操作との相互作用を制御するコントローラコードをカップリングして評価を行う。この際、シミュレーションコードのモデルパラメータや安全装置の故障確率、人的過誤率は不確かさパラメータとして扱われ、これらの不確かさ伝播解析により炉心損傷確率等の評価が行われる。こうした観点から、動的 PRA はシミュレーションベース PRA とも呼ばれる。

2-2. 計算コード

動的 PRA のための計算コードとしては、ADAPT, ADS, MCDDET, PyCATSHOO など多くある。本稿では、米アイダホ国立研究所(INL)が開発中の RAVEN [1] を扱う。RAVEN は、当初 RELAP-7 の制御系、ポスト処理系として開発が始められたが、現在では、RELAP5-3D, MELCOR, MAAP などの様々なシステム解析コードとカップリングが可能な汎用的な感度解析・不確かさ解析のコードとして開発が進められている。RAVEN は、動的 PRA の解析で発生する大量かつ高次元のデータ処理を可能とするため、データマイニングや機械学習の適用に力を入れて開発されており、Topological Decomposition のような最新の次元削減の手法も導入されている。

RAVEN では、動的に ET を生成する branching laws として、①Threshold、②On demand、③Time driven の3つが用意されている。①Threshold は、パイプ破断等の確率の累積確率分布に対して閾値を設定して分岐させるものである。②On demand は、逃し弁の故障等の要求に応じて分岐させるものである。③Time driven は、ある指定した時刻で分岐させるものである。

2-3. 静的 PRA と動的 PRA の比較

Mandelli ら [2] は、BWR の SBO 事故シナリオを対象として、SAPHIRE を用いた従来の ET/FT 法による静的 PRA による炉心損傷確率と、RAVEN/RELAP5-3D によるシミュレーションベース PRA による炉心損傷確率の比較を行っている。その結果、全体の炉心損傷確率に顕著な相違は無いが、静的手法と動的手法とで異なった炉心損傷確率となるブランチがあり、その相違が生じるヘッディングを同定している。彼らは、各ブランチに対して被覆管表面温度(PCT)のヒストグラムを作成し、炉心損傷に至らないブランチに属するシナリオは、交流電源が炉心損傷の直前に回復したケースであるという分析を行っている。このように、評価結果に対してシミュレーション結果に基づく詳細な分析を行えるところが動的手法の長所である。また、感度解析においても動的手法は有効である。例えば、Mandelli ら [2] は出力向上などの場合における有効性を指摘している。この場合、従来の ET/FT 手法では、FT の再構築や ET の分岐確率の再設定が必要になると考えられる。一方、動的手法では、RELAP5-3D の入力を変更し不確かさパラメータは変更しな

い。したがって、感度解析を系統的に実施でき、評価結果の説明性も向上する。

一方、動的手法では、評価結果の情報が豊富になることと引き換えに、計算コストが増大する。これを解決するためには、適応サンプリング等のサンプリング手法の適用や、代替統計モデル等の機械学習の適用が有効になると考えられる。また、静的手法と動的手法のハイブリッドな運用が考えられても良いだろう。さらに、動的手法では、シミュレーションコードの精度が評価結果に影響することに注意が必要である。RELAP5-3D等の最適評価コードの精度は、その大半が構成式の精度であると言えるが、構成式の不確かさが動的PRAの評価結果に与える感度を把握しておくことが必要であると考えられる。特に、構成式の不確かさが大きいシビアアクシデント解析コードを用いて動的PRAを実施する場合に、この検討は重要になると考えられる。

3. INSSにおける取り組み

3-1. これまでの取り組み

これまで、INSSではRELAP5/MOD3.2コードを用いて統計的安全評価を実施してきた。小破断LOCA時高圧注入系不作動事象のアクシデントマネジメント策を対象に、主に構成式の不確かさがPCT評価に及ぼす影響を評価した。この際、IAEAのSafety Guideに示された第3のオプション”Best Estimate + uncertainty approach”に則り、境界条件はpartly most unfavorable conditionで与え、機器の稼働は保守的条件で与えた。しかし、アクシデントマネジメント策に対する安全解析としては、第4のオプション”Risk informed approach”に則り実施することが自然である。この方法は、動的PRAに最適評価コードの構成式の不確かさを考慮する方法とも言える。

こうした背景から、INSSの安全解析にRAVENを導入した。RAVENには構成式の不確かさを扱う機能はないため、構成式のモデルパラメータを統計的に振れるようにRAVENを拡張した。さらに、本コードを用いてROSA/LSTFの小破断LOCA/HPI不作動模擬実験を対象に統計解析を実施し、構成式の不確かさがPCT評価に与える感度を把握した[3]。以上より、構成式の不確かさを考慮した動的PRAを実施する基盤を整備した。

3-2. 今後の課題

今後は、関電のPWRプラントに対する動的PRAモデルの構築を行う予定である。これを用いて、2.3節で述べたような静的PRA手法との比較評価や、炉心損傷確率等に大きな影響を与える要因の分析を行う。さらに、最適評価コードの構成式の不確かさに係る感度解析を行い、炉心損傷確率等への影響が大きい構成式の同定、および構成式の改良を実施する。

4. まとめ

本稿で紹介した動的PRA手法は従来の静的PRA手法の自然な拡張と考えられる。今後、動的PRA手法の計算技術上の課題を解決し、静的PRA手法と併用しながら、プラントの運用・管理等における意思決定のための有用なツールとして活用することが望まれる。

参考文献

- [1] Alfonsi, A., et al., RAVEN Theory Manual and User Guide, INL/EXT-16-3817, INL (2017)
- [2] Mandelli, D., et al., Risk-Informed Safety Margin Characterization Methods Development Work, INL/EXT-14-33191, INL (2014).
- [3] Kinoshita, I. et al., Uncertainty and Sensitivity Analysis of LSTF Small Break LOCA Tests Using RELAP5 and RAVEN, PSA2017 (2017).

*Ikuo Kinoshita

INSS