

より現実的な動的 PRA に向けた故障物理モデリング方法の導入

Implementation of Physics-of-Failure Modeling Techniques Toward More Realistic Dynamic PRA

*鄭 嘯宇¹, 玉置 等史¹, 柴本 泰照¹, 高田 毅士¹¹ 日本原子力研究開発機構

JAEA では、決定論的事故解析と確率論的信頼性評価を統合した動的 PRA 手法及び計算ツール RAPID を開発している。機器の故障確率の推定を例に、PRA 評価において認識論的な不確かさが潜在する具体的事象を同定し、その不確かさを低減するために、機器作動の環境変化を考慮した確率論的故障物理及びシミュレーションコード間のカップリング方法を RAPID ツールへ導入した。

キーワード：動的 PRA, 確率論的故障物理, 統合シミュレーション, RAPID, MELCOR2.2

1. 緒言

確率論的リスク評価 (PRA) は、プラントの運転データを基に機器の故障確率を推定し、リスク情報活用の需要に応じてリスク指標を算出するが、場合により必要な PRA のスコープと詳細度が異なる。簡素化されている静的 PRA では動的な事故進展に依存する故障確率を模擬できないため、その結果には認識論的な不確かさが含まれる。これらの認識論的な不確かさへの理解を深め、更にその低減方法を検討するために、機器故障状態とプラント運転状態の間の相互作用を定量的に評価できる動的 PRA 手法を開発する必要がある。

2. 統合した決定論的と確率論的シミュレーション

2-1. 確率論的故障物理

機器に潜在する故障は、一般に 3 種類の故障物理モデル (Stress-strength, Damage-endurance, Performance-requirement) のいずれかで模擬される [1]。Damage-endurance モデルは、繰返し負荷の条件で、突然起きる機器の機能喪失を模擬する。例えば、蒸気逃がし安全弁 (SRV) の熱的開固着故障が挙げられ、その故障率は蒸気温度を変数としたアレニウス式で算出される [2]。

$$\text{failure rate} = e^{\frac{EA}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{nominal}}} - \frac{1}{T_{\text{current}}} \right)} \quad (1)$$

2-2. RAPID の機能構築及び解析結果の例

RAPID [3]に、シミュレーションコード間のカップリング機能[4]を新たに構築した (図 1 (b))。統合したコードは、確率論的シミュレーションである図 1 (a) ランダム故障と従属故障の発生や事故シナリオの生成に係るモデル、及び決定論的シミュレーションである図 1 (c) のシビアアクシデントの進展を評価する機構論的なコード (MELCOR2.2 [5]) である。式(1)を用い、原子炉圧力容器 (RPV) の蒸気温度 (プラント情報) と SRV 開固着の累積故障確率 (機器信頼性評価情報) の依存性を模擬した。

図 1 (右) に BWR の全交流電源喪失事故を対象とした 2000 ケースの解析例を示す。蒸気温度 (c) に依存した SRV 開固着の累積確率 (a) を定量的に推定し、SRV の作動状態と原子炉炉心温度変化の相互作用を模擬できることを示した。SRV が開固着し緩和措置が取られない場合、継続した蒸気流出により RPV 内の水量が低下し、炉心が露出し炉心損傷に至る。また、炉心温度が急に上昇するシーケンスでは、SRV を通過する蒸気の温度が高いため、開固着の累積確率の上昇傾向が見られた。プラント運転故障データを用いた従来の PRA では、開固着が発生するまでの SRV サイクル数を保守的に 0 や確率分布として仮定する。図 2 に示すヒストグラムは、従来の確率分布を青色で、本研究のカップリングで得られたサイクル数の分布を黄色で示した。黄色分布は二峰性があり、シビアアクシデントでは低サイクル数で開固着に至る可能性が高く、炉心損傷に至らないシーケンスでは発生確率が低い (高サイクル数にならない) と発生しない。これは、事故シーケンス特有の故障確率を有する機器の存在を示しており、従来 PRA の認識論的不確かさの一つであると考えられる。この不確かさを低減のため、事故の特徴に応じた故障確率を用いる必要がある。このように本動的 PRA 手法は、事故シーケンスで特有な故障確率を有する機器の同定や定量化に対し非常に有用であり、今後重大事故対策の有効性評価 (実績データなし) への活用も期待できる。

3. 結論 動的 PRA を用いた確率論的故障物理と決定論的事故解析を同時に模擬することにより、現実的な故障確率分布を得るとともにその分布の解釈が可能となり、従来の静的な PRA により導かれる結果に含まれる認識論的不確かさの具体的な解釈を与えられることを示した。

謝辞 本研究は、原子力規制庁「令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費 (動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の改良及び活用方法の検討) 事業」の成果の一部である。

参考文献 [1] M. Modarres, et al. Probabilistic Physics of Failure Approach to Reliability. Wiley-Scrivener (2017) [2] B. Youngblood, LWRS Newsletter, Issue 4 (2011) [3] X. Zheng, et al. Dynamic Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants Using Multi-Fidelity Simulations. RESS Vol.223: 108503 (2022) [4] C.G. Cassandras and S. Lafortune. Introduction to Discrete Event Systems, Third Edition. Springer (2021) [5] L.L. Humphries, et al. MELCOR Computer Code Manuals Vol.1 (2018)

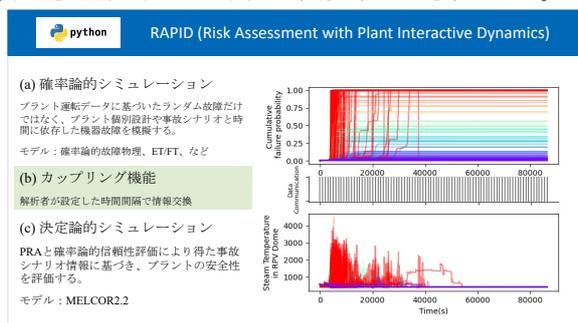
*Xiaoyu Zheng¹, Hitoshi Tamaki¹, Yasuteru Sibamoto¹ and Tsuyoshi Takada¹¹Japan Atomic Energy Agency

図 1 RAPID を用いた統合シミュレーションの結果

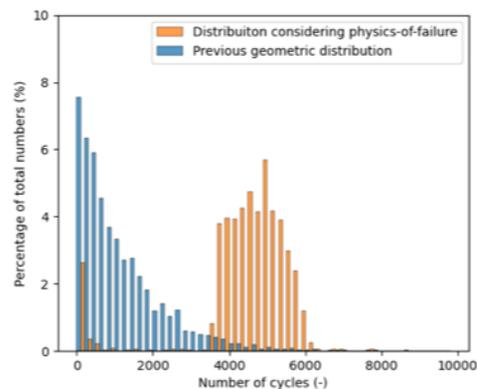


図 2 開固着まで SRV の開閉数の分布の比較

図 2 開固着まで SRV の開閉数の分布の比較