多忠実度モデルを用いた動的 PRA 手法の開発

Development of Dynamic PRA Using Multi-Fidelity Models

*鄭嘯宇¹,玉置等史¹,杉山智之¹,丸山結¹

1日本原子力研究開発機構

動的確率論的リスク評価(DPRA)は、確率論的な手法と決定論的なシミュレーションを緊密に結合すること により、多数の事故シーケンスを生成して炉心損傷頻度を推定できるが、計算コストが膨大である。JAEAは、 異なる忠実度を備えた複数のシミュレータを共用し、従来の PRA に比べて信頼性が高く、計算コストを低減 できる多忠実度(マルチフィデリティ)モデルを用いた DPRA 手法を開発した。 キーワード:動的 PRA, 炉心損傷頻度, 多忠実度モデル, MELCOR 2.2, サポートベクターマシン, RAPID

1. 緒言 DPRA でリスク指標(例えば、炉心損傷頻度 CDF)を計算する場合、モンテカルロサンプリング法 などの確率論的な手法を用いてシーケンスの発生頻度を推定すると共に、決定論的な計算コード(例えば、 MELCOR [1])によるシミュレーションを用いて事故の影響を同定する。しかし、炉心損傷に至る事故シーケ ンスの発生頻度が低く、シミュレーションの実施時間が長いため、DPRA を現実のリスク評価に適用するに は膨大な計算コストが必要になる。そこで、信頼性向上と計算コスト低減を両立する手法を開発した。

2. JAEA の多忠実度 DPRA 手法

2-1. 手法の構築 図1は多忠実度モデルを用いた DPRA の手順を示した。①モンテカルロ法を用い、 イベントツリー(ET)の重要なヘディングの発生時 間に影響するパラメータの確率分布を定義し、解析 対象の事故シーケンスをランダムサンプリングによ り生成する。②サンプリングした入力条件により、 代替評価モデルの予測結果と不確かさに基づき、 MELCOR2.2 の実施必要性を判断し、シミュレーシ ョンを実施する。③事故解析の結果から、条件付き 炉心損傷確率(CCDP)を推定する。④CCDPの収束 状況に応じて解析終了可否を判断する。



図1 多忠実度モデルを用いた DPRA 手法

2-2. 事故シナリオの選定と解析条件 事故シナリ ロンスタビナルを用いたとかれて」な オは BWR における「TBP: 全交流電源喪失(SBO) +SRV 再閉失敗」である。図 2 のように、公開された INL の簡略的な ET モデル[2]を対象として DPRA 解析を行なった。高忠実度モデルは、MELCOR2.2 用の BWR モデルを、低忠実度モデルは、MELCOR2.2 の結果に基づきサポートベクターマシンにより訓練・更新した代 替評価モデルを用いた。JAEA の DPRA 解析ツール RAPID により、事故シーケンスの生成、大型計算機での シミュレーションの制御、代替評価モデルの訓練・更新及び条件付き炉心損傷確率の推定を行った。 2-3. 解析結果 図 2 に従来の PRA 手法、動的 PRA と多忠実度 DPRA の結果を比較した。モデルを単純化し、 保守的に代替注水の投入時間を仮定した従来の PRA により、DPRA はさらに複雑な事象の組合せを考慮した ため、多くの事故シーケンス(#4、#7、#10、#11)が生成された。多忠実度モデルを用いた DPRA 手法の結 果は、高忠実度モデルを用いた DPRA 手法の結果(20000 ケースの MELCOR 解析)が一致し、従来の PRA 結果と比べて大きな乖離がなかった。多忠実度モデルを利用した場合、90.3%の計算コストを削減できた。 3. 結論 開発した多忠実度 DPRA 手法を利用する場合、従来の PRA と比べて事故シナリオの網羅性を向上 させると共に、計算コストを大幅に削減することが可能になった。

SBO	SRV Close	HPCI or RCIC	Alternative	Offsite or EDG	#	End	Traditional PRA	High-fidelity DPRA	Multi-fidelity DPRA
			Water Injection	Recovery	ry "	State	(INL PRA Model)	(MELCOR)	(MELCOR+Surrogate)
					- 1	OK	2.10E-01	2.27E-01	2.26E-01
		-			- 2	OK	7.70E-01	7.54E-01	7.54E-01
				- 3	CD	1.70E-02	1.25E-02	1.23E-02	
4 (OK	N/A	8.99E-04	1.30E-03	
					- 5	OK	8.60E-04	2.90E-03	3.50E-03
					- 6	CD	3.30E-03	1.40E-03	1.50E-03
					- 7	OK	N/A	1.90E-04	1.94E-04
					- 8	OK	8.20E-04	6.04E-04	6.00E-04
					- 9	CD	1.10E-04	5.81E-05	5.70E-05
					- 10	OK	N/A	1.37E-06	1.03E-06
					- 11	OK	N/A	2.31E-06	2.14E-06
					- 12	CD	4.00E-06	5.99E-07	2.14E-06
	CCDP						2.04E-02	1.40E-02	1.39E-02
Methods						Boolean-Logic-Based	Simulation-Based	Simulation-Based	
		Cinnal	Simulations (Number of Runs)		MELCOR		-	2.00E+04	1.63E+03
		Simu			Surrogate		-	-	2.00E+04
Total CPU Time (Hours)							_	2 39E±04	2 33E±03

図 2 従来の PRA、DPRA と多忠実度 DPRA の比較:条件付き炉心損傷確率と計算コスト

謝辞 本研究は原子力規制委員会原子力規制庁「令和3年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 評価手法の開発)事業」として実施し、JAEA のスーパーコンピュータ「HPE SGI8600」を利用して得られたものである。 参考文献 [1] MELCOR Manuals, SAND2018-13559 (2018) [2] D.Mandelli, et al. Dynamic and Classical PRA, PSA2015 (2015)

^{*}Xiaoyu Zheng¹, Hitoshi Tamaki¹, Tomoyuki Sugiyama¹ and Yu Maruyama¹

¹Japan Atomic Energy Agency