

熱流動 CFD 技術の進展

Progress of CFD in nuclear thermal hydraulics

CFD 技術のリスク評価への発展 ―不確かさの定量化―

Application of CFD into Risk Assessment - Quantification of Uncertainty -

*高田 孝¹¹ 東京大学

1. はじめに

リスクは「目的に対する不確かさの影響」と定義される[1]。(ISO 品質マネジメントシステム[2]でも、ほぼ同様に「不確かさの影響」とされている。) 原子力発電所の場合、リスクの定義における目的は、原子力安全(人と環境を放射線の有害な影響から護る)となる。不確かさの影響は、起こり得る事象及び結果の組合せについて述べる[2]や、リスクトリプレット(シナリオ、頻度、影響)[3]によって表されるものといえる。

原子力分野における安全性評価において、熱流動 CFD の果たす役割は重要である。リスク評価は、発生頻度(確率)評価に着目されがちであるが、様々なシナリオの分析や効果的なアクシデントマネジメント(AM)の実施も含め、多岐にわたるリスク情報が重要となる。近年開発が進んでいる、プラントシステムの時刻歴変化も考慮した動的リスク評価は、これらリスク情報の活用において重要な役割を担っている。

2. 確率論的リスク評価(PRA)と熱流動 CFD

確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment, PRA)は、原子力発電所における効果的なリスク評価手法の一つである。原子力発電所における PRA では、炉心損傷に至るまで(レベル 1)、格納容器機能喪失に至るまで(レベル 2) および放射性物質の敷地外放出に伴う環境影響評価(レベル 3) に大別される。図 1 にレベル 1PRA の評価の流れを示す[4]。

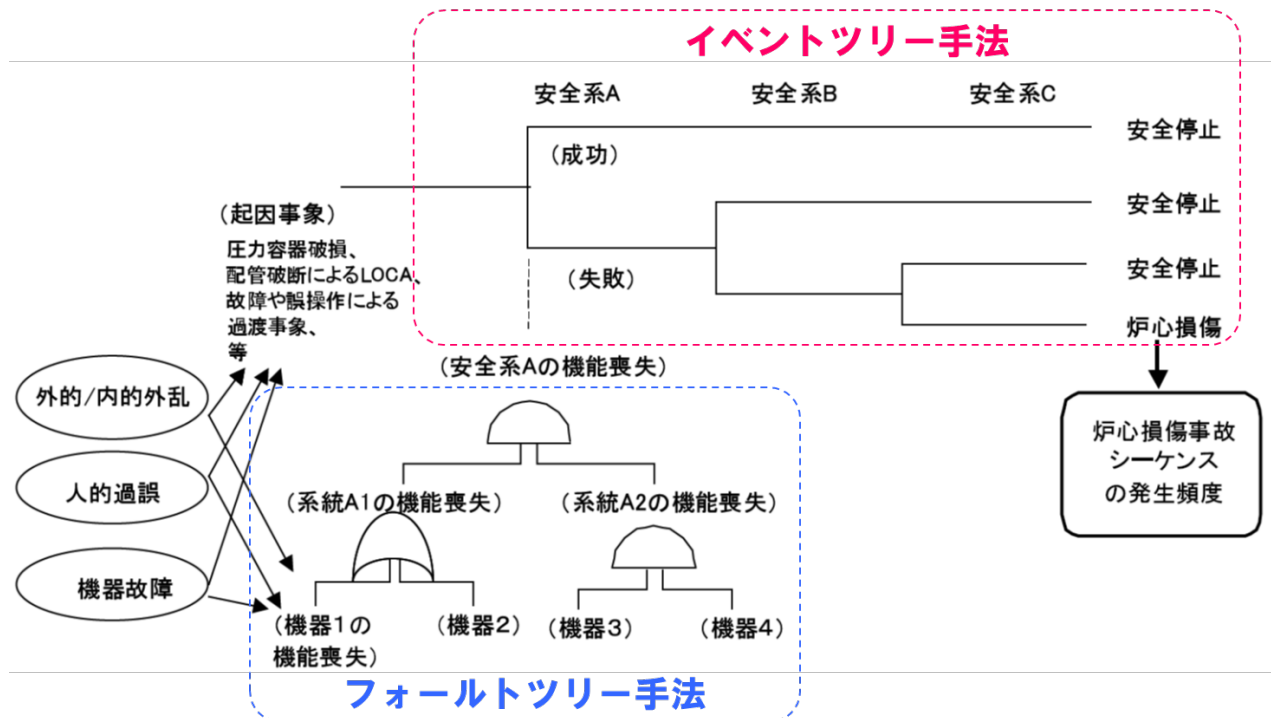


図 1 PRA 評価のフロー (内的事象レベル 1) [4]

*Takashi Takata¹¹The University of Tokyo

レベル 1PRA の場合、炉心損傷に至るまでのシナリオは、イベントツリーの各分岐（ヘディング）で示され、分岐確率はフォールトツリー手法により評価される。PRA においても、熱流動 CFD（主に動特性解析やシビアアクシデント評価ツール）は重要な役割を担っており、例えば成功基準（イベントツリーの終状態として、安全停止や炉心損傷を判断する基準）を評価するための解析や、代表的なシナリオにおける放射性物質の放出量やその種類の評価（ソースターム評価と呼ばれる。レベル 2PRA で評価）に用いられている。

PRA では、シナリオをイベントツリーの形で扱い、その順序を工学的判断で決定する。このため、ヘディングの発生時刻やその生起順序の観点で不足している。これを補う目的で動的なリスク評価手法の開発が進められている。

3. 動的リスク評価と熱流動 CFD

動的リスク評価では、様々なシナリオでのプラント状態を熱流動 CFD により評価することで、終状態の分類やその発生確率、リスク重要度指標等を評価する。具体的な評価ツールとしては、ADAPT[5], RAPID[6], CMMC 法[7], [8]等が挙げられる。一例として図 2 に CMMC 法の概要を示す[7]。

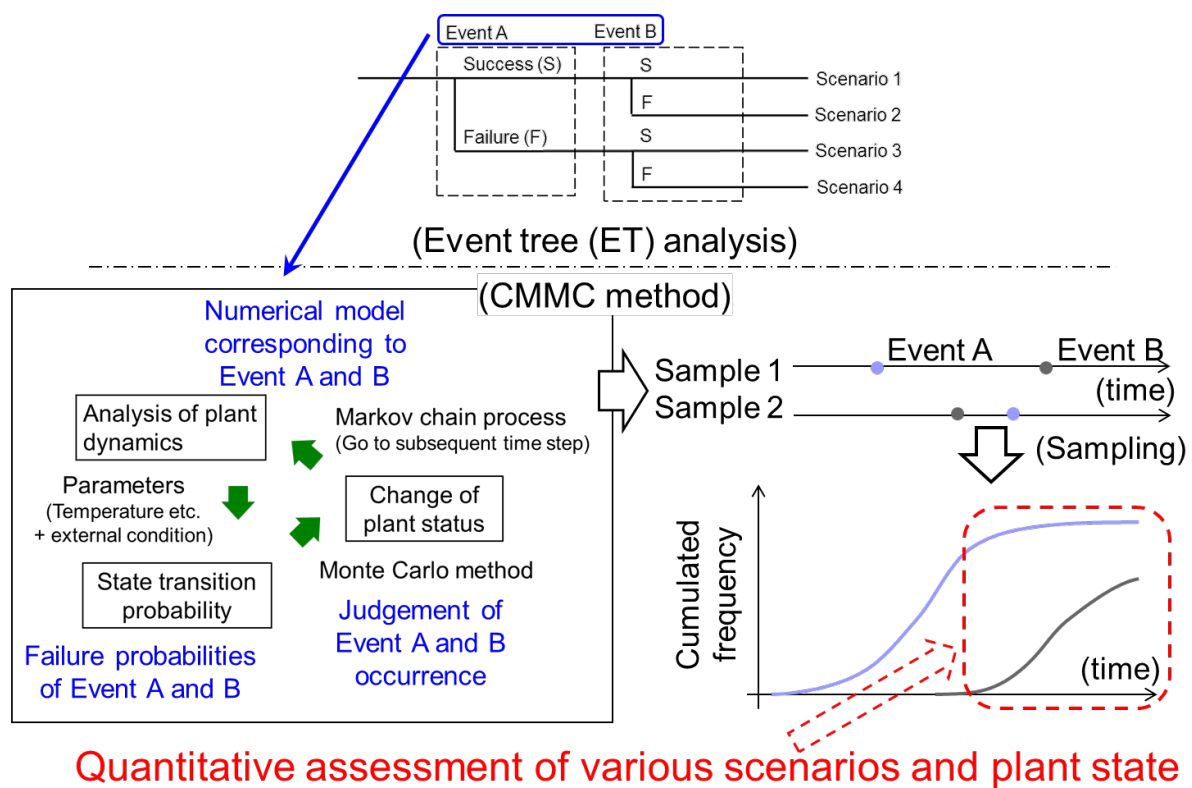


図 2 CMMC 法の概要[7]

熱流動 CFD では、イベントツリーにおけるヘディングをモデル化し、その時刻におけるプラント状態を考慮したヘディングの生起確率をもとにモンテカルロサンプリングを行う（図 2 左下）。この結果、ヘディングの発生時刻やその生起順序の不確かさも含めたリスク評価が可能となる（図 2 右下）。

動的リスク評価の例として、CMMC 法を用いたナトリウム冷却高速炉における積雪時のリスク評価結果を図 3 に示す。ナトリウム冷却高速炉では、空気冷却器を介した自然循環により崩壊熱の除去が可能であるが、積雪に伴う空気冷却器入口の閉塞が崩壊熱除去を阻害する可能性がある。これに対する AM の一つとして、定期的な除雪を検討した。解析では、異常な降雪に伴い、全交流電源喪失（Station Blackout, SBO）が発生し、炉心緊急停止が成功した後、自然循環による崩壊熱除去が機能している状態を初期としている。事象進展として、積雪に伴う空気冷却器（3 台）の機能喪失、除雪による機能回復（除雪成功確率は、アクセスルート確保も含め 0.5/demand とした）を SBO 発生後 24 時間まで 1000 サンプル評価した。

解析結果の例（炉心出口温度履歴（50 サンプル）および炉心出口最高温度の累積度数）を図 3 に示す。

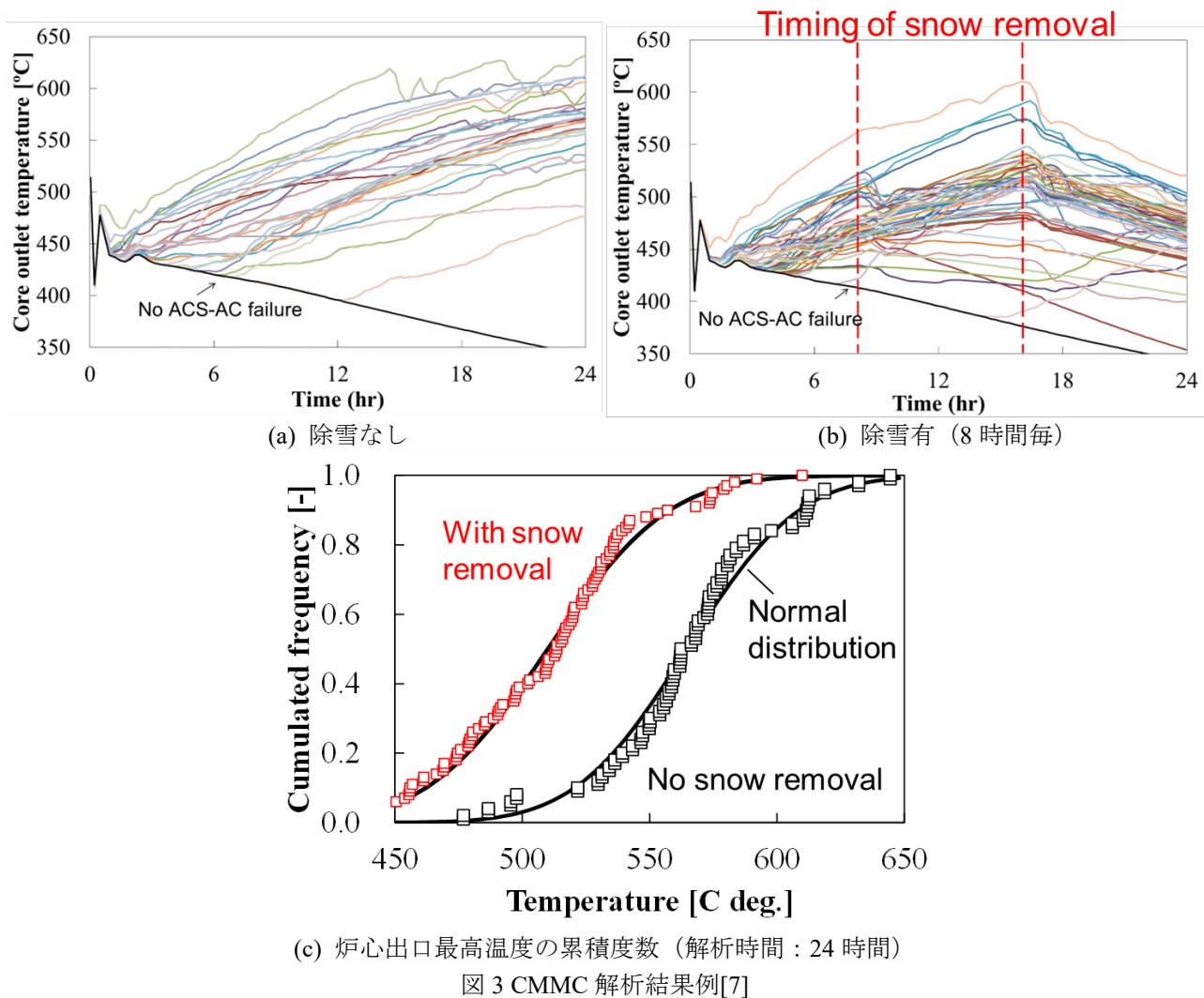


図 3(a), (b)中の黒実践は空気冷却器が完全に機能した状態である。除雪が無い場合（図 3(a)）では空気冷却器機能喪失に伴う炉心出口温度の上昇が見られている。一方、除雪（8 時間毎に実施）を考慮した場合（図 3(b)）、除雪に伴う空気冷却器の機能回復により炉心出口温度が低下している。また、それぞれの最高温度のサンプリングにより、炉心損傷（例えば炉心出口温度 650 度以上で損傷を仮定）の確率評価が可能となる。

動的风险評価の利点の一つとして、図 3(b)に示す通り、AM の実施時刻も含めた効果の定量化が容易であり、効果的な AM の実施に資することが可能となる。また、熱流動 CFD では BEPU（Best Estimate Plus Uncertainty）を含めた統計的安全評価が行われている[9]。統計的安全評価は広義にはリスク評価の一種であり、従来は確率論的リスク評価とは分けて実施されていたが、動的风险評価では、融合的に実施可能となる。

一方で、ヘディングの増加やサンプル数の増加に伴う計算負荷や、動的风险評価におけるリスク重要度に関する研究が挙げられる。前者については重みを用いたサンプル低減[10]や、サロゲートモデルを用いた効率化[11]が、後者についてはリスクトリプレットを考慮したリスク重要度指標の検討[12]が進んでいる。

4. おわりに

熱流動 CFD 技術やリスク評価は、原子力発電所における安全性の評価に重要な役割を担っている。熱流動 CFD とリスク評価との融合は、リスク（目的に対する不確かさの影響）を数値的に定量化することが可能であり、今後より一層発展させることで、合理的で効果的な安全性向上に寄与することができる。

参考文献

- [1] 日本工業規格, Q31000:2019 (ISO 31000: 2018), 2019.
- [2] 日本工業規格, Q9000: 2015 (ISO9000: 2015), 2015.
- [3] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/risk.html>
- [4] 村松健, 日本原子力学会誌, p. 409-417, Vol. 48, No. 6, 2006.
- [5] <https://www.sandia.gov/adapt/>
- [6] 鄭嘯宇他, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, 1L02, 2020.
- [7] T. Takata, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 1749-1757, 53, 11, 2016.
- [8] Chun-Yen Li, et al., J. of Nuclear Science and Technology, 935-957, 61, 7, 2024.
- [9] 日本原子力学会標準委員会, AESJ-SC-S001: 2021, 2021/
- [10] T. Takata, et al., Proc. of PSAM13, A-038, 2016.
- [11] Z. Xiaoyu, et al., Reliability Engineering & System Safety, 223, p.108503_1 - 108503_12, 2022.
- [12] 成川隆文他, 原子力学会 2023 年秋の大会, 1N14, 2023.