

多数基立地サイトのユニット間相互作用を考慮した 動的リスク評価手法の研究

Research on Dynamic PRA methodology considering dependencies of Multi-unit nuclear power plant

*浅野 翔, 山口 彰, 張 承賢

東京大学

2011年福島第一原子力発電所の事故以来、原子力プラントの安全評価における多数基立地サイト特有の事故リスクの考慮が重要性を増している。本研究では多数基立地サイトの事故リスクを定量的に評価するために、時間進展を考慮した動的なリスク評価手法を提案する。

キーワード：確率論的リスク評価、動的PRA、マルチユニットサイト、連続マルコフ過程モンテカルロ法

1. 緒言

2011年福島第一原子力発電所の事故では、隣接するユニット間の相互作用により事故の進展が悪化するというような、多数基立地サイト特有の事故リスクが明らかになった。しかし、既存の確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment, PRA）の手法ではユニット間相互作用を十分考慮した評価は困難である。そのため本研究では、時間進展を考慮した動的なリスク評価手法を用いてマルチユニットサイトの事故リスクを定量化することを目的とした。

2. 研究内容

2-1. マルチユニット影響の分析

Schroer ら^[1]はマルチユニット影響を、起因事象、共有設備、同一設備、近接依存性、人的依存性、組織的依存性の6つに分類した。これらの分類は、事故進展に与える影響の形態の観点から、外的依存性と内的依存性とに分けることができる。ここでは、福島第一原子力発電所事故^[2]の分析を行い、この分類が妥当であること及び、物資・機器・人員といったリソースの共有も重要なユニット間相互作用の一つとして追加した。このような分類をすることで、事故進展の段階ごとに考慮すべきマルチユニット影響を明示的に示すことができる。

2-2. マルコフ過程を用いたシナリオ定量化手法

事故シナリオ評価において考慮すべきマルチユニット影響は、事故進展中の隣接ユニットの状態に依存する。そこで、図1のように事故進展による各ユニットの状態の変化をマルコフ過程で表現する。状態はそれぞれ、健全、事故防止機能喪失（PS喪失）、影響緩和機能喪失（MS喪失）とする。このとき、安全機能の修復によって健全状態へ戻る状態の遷移も考慮する。各状態にある確率は微分方程式によって求められる。例えば単位時間当たりの健全状態の遷移確率は(1)式ようになる。

$$\frac{dP(\text{健全})}{dt} = -\lambda(\text{PS喪失}|\text{健全}) + \mu(\text{健全}|\text{PS喪失}) \quad (1)$$

ここで、 λ と μ はそれぞれ、時間当たりの損傷率と修復率を表す。このような事故進展マルコフ過程を複数ユニットに適用し、損傷率と修復率を隣接ユニットの状態に依存する条件付き確率として設定することで、マルチユニットサイトの事故シナリオが定量化できる。マルチユニット影響により時間的に損傷率、修復率が変化するモデルの定量化には連続マルコフ過程モンテカルロ（CMMC）法が適している。CMMC法はシナリオを連続マルコフ過程として扱い、次の状態への遷移をモンテカルロ法によって決定する。この手法によって多数のシナリオを解析することによって、網羅的に事故シーケンスを定量化できる。

モンテカルロ法は乱数を用いるため、CMMC法で得られる事故進展状態にある確率はサンプル数に応じた誤差を持つ。発生される乱数が真にランダムであり、サンプル数が十分に大きいと仮定すると、事故進展状態確率は正規分布に従う。サンプル数と事故進展状態確率の推定値の95%信頼区間の関係を表1に示す。表1より0.10%の低頻度の状態でもサンプル数100000の解析で、十分小さい信頼区間で推定値を得ることができることがわかる。また、図1の事故進展マルコフモデルについてCMMC法による100000サンプルの結果と連立微分方程式を解析的に評価した結果を比較した（図2）。それぞれの評価で初期時刻における健全状態の確率を1とした。それぞれの解析結果は表1に示す信頼区間の中で十分一致している。

3. 結論

マルチユニットサイトのユニット間相互作用について分析し、リスク評価手法への適用性の観点から影響の分類を行った。また、隣接ユニットの事故進展状態に依存するマルチユニット影響を考慮したリスク評価を行うために事故進展マルコフモデルを構築し、CMMC法を用いたシナリオ定量化手法の妥当性を示した。

参考文献

- [1] S. Schroer, M. Modarres, An event classification schema for evaluating site risk in a multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment, Reliability Engineering and System Safety, 117, pp40-51, (2013)
[2] 日本原子力技術協会、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言」, (2011)

*Kakeru Asano, Akira Yamaguchi and Sunghyon Jang
The University of Tokyo

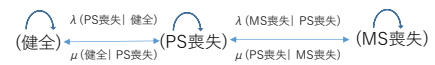


図1 事故進展状態のマルコフ過程

表1 サンプル数毎の事故進展状態確率の信頼区間

サンプル数\推定値	0.10%	1%	10%
1000	0.20%	0.62%	1.86%
10000	0.06%	0.20%	0.59%
100000	0.02%	0.06%	0.19%

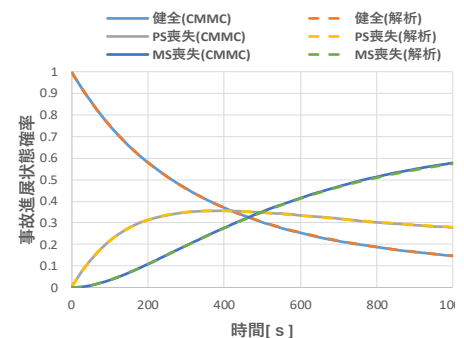


図2 CMMC法と解析的手法の比較