

計算科学技術部会セッション

計算科学技術分野におけるモンテカルロ（MC）法の活用 ～現状と将来展望～
Applications of Monte Carlo method in computational science and engineering field
-challenge and foresight-

(2) モンテカルロ法を用いた動的リスク評価研究

(2) Study on Dynamic PRA with Monte Carlo Method

*張 承賢

東京大学

1. 確率論的リスク評価（Probabilistic Risk Assessment）

PRA とは施設を構成する機器・系統等を対象として、発生する可能性がある事象（故障・異常）を網羅的・系統的に分析・評価し、それぞれの事象の発生確率（又は頻度）と、万一それらが発生した場合の被害の大きさを定量的に評価する方法である。

原子力発電所を対象とする場合には、過度事象、原子炉冷却材喪失事項等の事象（起因事象）の発生に、事象を収束させる或いは影響を緩和するための設備の機能喪失等が加わり、炉心の損傷、格納容器の破損等に至る可能性がある事故シーケンスを網羅的に抽出し、その発生確率（又は頻度）を評価し、さらに周辺公衆が受ける健康リスクを評価する。

PRA では評価の範囲を着目する指標（現象）に応じて次の3つのフェーズに分けて評価を行う。

- ・レベル1 PRA：炉心損傷に着目し、炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を評価。
- ・レベル2 PRA：環境へ多量の放射性物質を放出する事故（格納容器機能喪失事故）に着目し、それに至る事故シーケンスの発生頻度とそのソースターム（環境に放出される放射性物質の種類、性状、放出量、放出時期、放出期間、放出エネルギー）の評価を行う。
- ・レベル3 PRA：ソースタームとその発生頻度をもとに公衆への健康リスク等を評価

PRA 手法では、事故シーケンスの分析（事故シナリオの定量化）はイベントツリー（ET）手法を用いて行い、またフォールトツリー（FT）手法を用いてシステム信頼性解析を行い、イベントツリー上の各分岐の失敗確率を算出する。

しかし、このようにイベントツリーとフォールトツリー手法を用いる従来の PRA 手法には下記のような事象の特性を評価することが難しいという問題点がある。

- 1) 事象の発生順序の多様性：ET 上における事象の発生順序は実際に一つに定まらないため、事象の進展によって事象順序が変わると、事故シーケンス分析のために、新しい ET が必要になり、事故シーケンスを網羅的に評価するためには、膨大な数の ET が必要となる。
- 2) 分岐の失敗確率の時間依存性：ET 上の分岐失敗確率は、事象の進展によって変化するプラントの状態に依存する。しかし、従来の手法では ET 上における分岐確率の変化を反映することが困難である。
- 3) 不確かさ：PRA で用いる機器故障率に関するデータなどには、不確かさが存在するため、不確かさを考慮した事故シーケンスの定量的評価が困難である。

2. 確率論的リスク評価における不確かさ

一般に PRA に関連した不確かさには、偶然性不確かさ（Aleatory uncertainty）と認識論的不確かさ（Epistemic Uncertainty）がある。前者は、物理現象や機器の特性に由来する不確かさであり、避けることのできないものである。後者は、知識の限界やデータ不足に由来するものである。

*Sunghyon Jang

The University of Tokyo

NUREG-1855 によると認識論不確かさはさらにパラメータ不確かさ (Parameter Uncertainty) とモデル不確かさ (Model Uncertainty)、完全性不確かさ (Completeness Uncertainty) に分類することができる。

(1) パラメータ不確かさ

パラメータ不確かさは PRA の理論モデルにおける事象の発生確率を計算するのに使われるパラメータの入力値の計算における不確かさに関係している。このパラメータの例として、起因事象発生確率、機器故障確率、人的過誤率などが挙げられる。

(2) モデル不確かさ

モデル不確かさは意見の一致した手法またはモデルが一致しない問題や、その手法やモデルの選択が PRA モデルに影響を及ぼすと考えられる事象に関連している。具体例として、新規基事象の導入、基事象の発生確率の変化、成功基準の変化、新規起因事象の導入などがある。

(3) 完全性不確かさ

リスク寄与因子として、マイナーであるためにスクリーニングアウトされるか、その存在を認識していないために PRA モデルに考慮されないことがある。これらの PRA モデルの範囲や詳細度に含まれないリスク寄与因子が本当に意思決定に影響することがないのかどうかに関連した不確かさが完全性不確かさである。

1 章及び 2 章で述べた既存の PRA 手法における問題点を克服するために、様々な方法を用いて動的 (Dynamic) リスク評価手法が研究されている。その一つの方法として、モンテカルロ手法とマルコフ過程を用いたモデル (連続マルコフ過程モンテカルロ手法、Continuous Markov process and Monte Carlo Method) にプラント動特性解析コードをカップリングさせた手法を用いて事故シナリオを定量化することができる。

3. 連続マルコフ過程モンテカルロ手法を用いた動的リスク評価

連続マルコフモンテカルロ手法 (CMMC 手法) の適用では、考慮可能な不確かさとして、偶然性不確かさ及びパラメータ不確かさが挙げられる。これらの不確かさは見方を変えると、

- ・事象が発生する前提 (発生確率等) として、周囲の環境に影響される不確かさ
- ・事象発生に伴い結果として得られる現象の不確かさ

に分類することができる。前者については CMMC 法の適用が効果的であり、後者については MC 法の適用が有効である。CMMC 法と MC 法の違いは、分岐確率を評価する際にプラント状態を考慮するかしないかの違いである。

CMMC 手法による事故シナリオの定量化では、プラント熱流動解析コードや FP 拡散解析コードを用いて、各時刻におけるプラントの状態を解析する。これらの解析コードから得られたプラント内各構成要素の温度や圧力などのパラメータによって、各時刻の状態遷移確率を求める。この状態遷移確率は各構成要素に与えられ、モンテカルロ法によって、この状態遷移確率と乱数の大きさを比較し、それぞれの時刻の構成要素の状態を決定する。そして、現在の時刻のプラント状態は次の時刻のプラント状態解析のための入力値となる。CMMC 手法ではシナリオの遷移はマルコフ過程であると考ええる。即ち、現在の時刻のプラント状態 (各構成要素の状態の組み合わせ) は、ひとつ前の時刻のプラント状態のみに依存し、それより前の時刻のプラント状態には依存しないと考ええる。

この手順を任意の解析終了時刻までに繰り返すことによって、固有な事故シナリオが作成される。またこれらをモンテカルロサンプリングで作ったサンプルを用いて同じ行程を繰り返すことによって、多数の事故シナリオが作成される。それぞれのシナリオにおいては、モンテカルロ法を用いて状態遷移を決定するため、CMMC 手法で作成される事故シナリオは互いに固有となる。そのため、多数のシナリオを解析することで網羅的な事故シナリオを定量化することができ、全シナリオ中大量放射性物質放出にいたるシナリオの割合などといった不確かさを伴った統計的な確率情報を得ることができる。