

原子炉構造レジリエンスの可視化手法

Visualizing method for resilience of nuclear power plant

| | | | |
|-------------|-------|------------------|----------------|
| 東京大学大学院 | 桑原 悠士 | Yuto KUWABARA | Student-member |
| 東京大学大学院 | 出町 和之 | Kazuyuki DEMACHI | Member |
| 東京大学大学院 | 笠原 直人 | Naoto KASAHARA | Member |
| 東京大学大学院 | 陳 実 | Shi CHEN | Member |
| 日本原子力研究開発機構 | 西野 裕之 | Hiroyuki NISHINO | Non-member |
| 日本原子力研究開発機構 | 小野田雄一 | Yuichi ONODA | Non-member |
| 日本原子力研究開発機構 | 栗坂 健一 | Kenichi KURISAKA | Non-Member |

In order to quantitatively evaluate the ability of a nuclear plant to recover its safety functions, we are developing a method to simulate accident management in chronological order according to an accident scenario, rather than simply evaluating the probability, and to evaluate whether or not a major accident will eventually occur, i.e., whether or not the minimum necessary safety functions can be recovered within a time limit. In this presentation, we will discuss the development of a method to evaluate whether or not the minimum necessary safety functions can be recovered within the time limit. In this presentation, the specific procedure and management examples of the method will be explained.

Keywords: Resilience index, PRA, Fracture Control, Sodium-cooled Fast Reactor

1. はじめに

福島第一原子力発電の事故以前、原子炉の構造強度評価は、設計基準事象に対する破壊防止に専ら重点を置いていたが、福島第一原子力発電所事故により設計想定を超える事象が原因となる破壊が発生した。また、破壊後の構造が安全機能の回復力（レジリエンス）に影響を与えることも想定しておく必要があることが認識された。したがって、事故時におけるアクシデントマネジメントの重要性、すなわちハザード等の原因により一時的に喪失した安全上重要な機能をいかに早く・いかに必要なレベルまで回復させられるかという機能の向上が、今後の原子力発電所の構造強度評価に求められている。

原子力プラントの安全機能回復能力を定量的に評価するためには、事故シナリオに沿って時系列でアクシデントマネジメントをシミュレーションし、最終的に重大事故に至らないか否か、すなわち必要最小限の安全機能を使用時間内に回復できるか否かを評価しなければならない。本論文では、シビアアクシデント時に破壊制御によって起こる事象を想定し、破壊制御がプラントの回復力

に与える影響を可視化するために、現在のレジリエンス指標の4つの課題を掲示するとともに、その解決のための手法を提案する。

2. 破壊制御とは

本研究では破壊制御を導入した原子炉構造のレジリエンス向上効果の可視化を行う。破壊制御とは、安全性への影響の小さい破壊を先行させることで荷重やエネルギーを低減させ、安全性への影響の大きい破壊を抑制することである。[1]破壊制御の導入例として、自動車を題材として説明する。自動車は設計上、衝突時にフロント部分がつぶれやすい設計になっている。これは、車両事故時に衝突箇所が変形し、エネルギーを効果的に吸収することで搭乗者を守る役割を担う。破壊制御を原子炉構造に導入することで、安全上重要な機器構造物の事故時の破損拡大抑制効果や回復能力向上効果が期待できる。

3. レジリエンス指標

3.1 手法の検討

原子力プラントの安全機能回復能力を定量的に評価するためにレジリエンス指標という評価手法を用いる。[2]レジリエンス指標は、プラントのレジリエンス性能とし

て、安全裕度、時間裕度などを動的かつ定量的に評価する手法である。PRA と異なり、シーケンス上の時間 t における安全機能レベル $L(t)$ の回復を評価する。したがって、破壊制御導入による破損拡大抑制効果や回復能力の可視化のためには、レジリエンス指標が有用であると考えたため、レジリエンス指標を採用する。

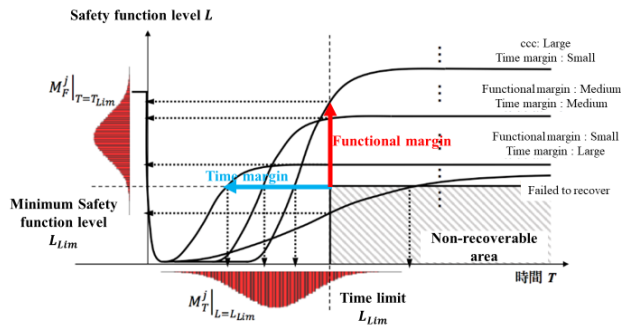


Fig.1 Concept of safety function recovery in resilience index

3.2 課題

レジリエンス指標を破壊制御に適用する上で障壁となる4つの課題が挙げられる。

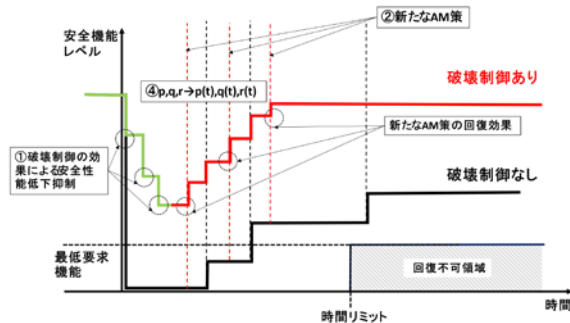


Fig.2 Concept of safety function recovery in resilience index with fracture control

1つ目は、安全機能低下の抑制・遅延効果の可視化である。破壊制御の導入により、損傷の拡大を緩和する機能が期待できる。さらに、機能レベルの低下がゆっくりと進行するため、AMを実施する時間的余裕が生まれる。

2つ目は、新たなAM策の追加である。破壊制御による抑制効果と遅延効果により、今まで実行できなかったAMを実行することができる。

3つ目は、新たなAMによる安全機能回復効果の定量的な評価である。新しく追加されたAM策の回復効果を定量的に評価する必要がある。

4つ目は、動的評価の改善である。安全装置の損傷が遅

延することにより、時間の経過を考慮することが重要になる。つまり、すべての現象とAMアクションは時間の関数として実行されるべきである。

3.3 解決案

上記の各々の課題に対する解決策を提案する。

1点目はフラジリティ曲線の導入である。破壊制御の効果を考慮したフラジリティ曲線を導入し、その結果をフォールトツリーに反映させることで安全機能低下の抑制効果を可視化することができる。Fig.3は地震フラジリティ曲線である。黒線は従来の地震フラジリティ曲線、赤線が破壊制御を導入した場合に予想される地震フラジリティ曲線である。破壊制御の抑制効果により、フラジリティ曲線の右シフトが予想される。また、従来フラジリティ曲線はハザード強度の関数であった。しかし、引数に状態や時間の関数を挿入することで、時間経過に伴う評価を正確に行うことができると考える。

以下は破壊制御を導入していない地震フラジリティ曲線の数式である。ここで、地震フラジリティパラメータ A_m , B_R , B_U を設定し、地震フラジリティ曲線 $f(a)$ として算定した。また、 p は信頼度、 a は想定ハザード強度である。

Seismic Fragility Curve :

$$f(a) = \Phi \left(\frac{\ln(a/A_m) + \beta_U \Phi^{-1}(p)}{\beta_R} \right) \quad (1)$$

$$\Phi(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{a^2}{2} \right) \quad (2)$$

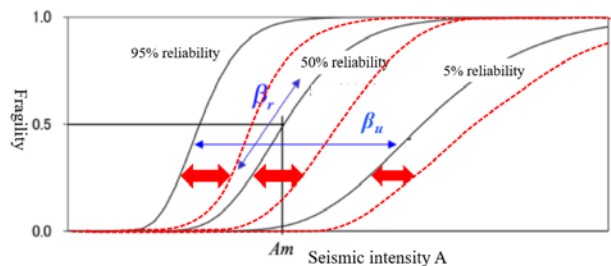


Fig.3 Concept of fragility curve shift by fracture control

2点目は、新たなAM策の追加である。Fig.4のN-1~N-5は、新しいイベントと実行可能なAMの例である。

実行可能なAMを導入するために、JAEAグループとの議論を通じてイベントツリーを改訂し、イベントツリーに示されているように、シナリオに新しい利用可能なAM策を追加した。

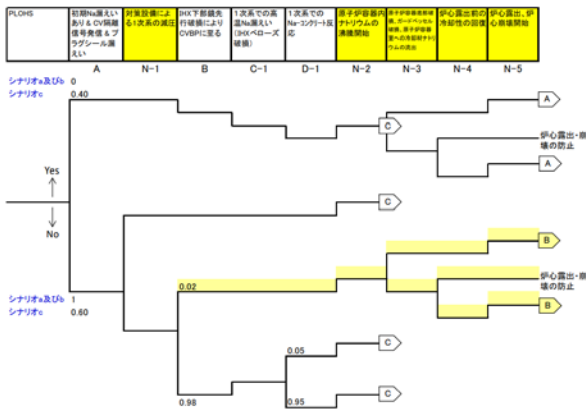


Fig.4 New AM implementation by fracture control by JAEA

3点目は、フォールトツリーの相関関係を考慮することだ。破壊制御によって脆弱性を低減することで、目標とする安全機能の成功確率が高まる。また、他の安全機能の向上は、目標とする安全機能の向上と相関がある可能性がある。そのため、通常PRAなどでは、安全機能を単独で検討するが、ここでは相関関係を考慮する必要がある。Fig.5は相関関係の一例で、機能#Bの成功は機能#Aの装置#A-xの成功を増加させる。

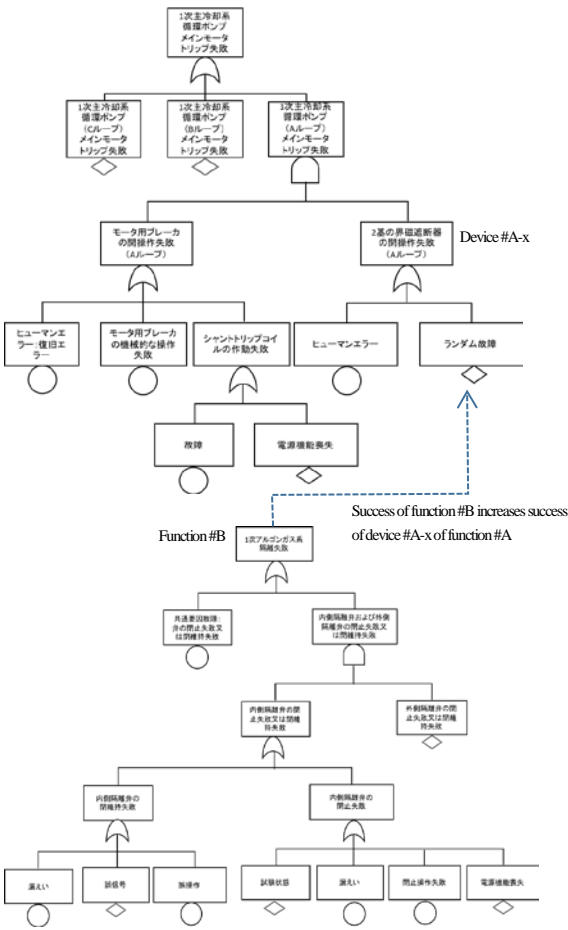


Fig.5 Example of Correlation between Fault trees

4点目は連続マルコフ連鎖モンテカルロ (CMMC) 法の導入である。[3]課題4に関連して、状態 $p(t), q(t), r(t)$ と脆弱性 $f(a, p(t), q(t), r(t))$ は時間の関数とする。また、状態変化の確率や、AMの成功/失敗の確率は、時間に対して動的に計算されなければならない。

動的に計算するためには、2つの改善点を提案する。1つ目は、CMMC法の採用である。CMMC法では、リアルタイムの状態を常に反映させることが可能になる。

2つ目は、前回の状態だけでなく、履歴を考慮することです。履歴を反映させることで、より正確な状態の評価が可能になる。

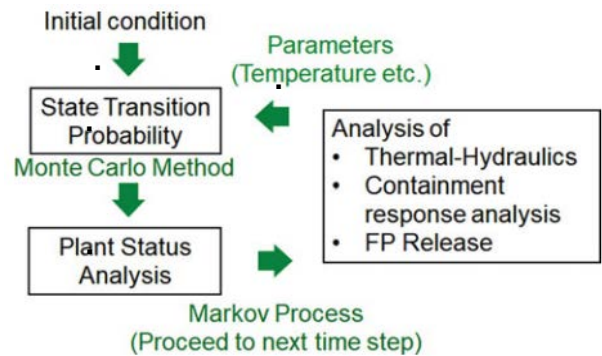


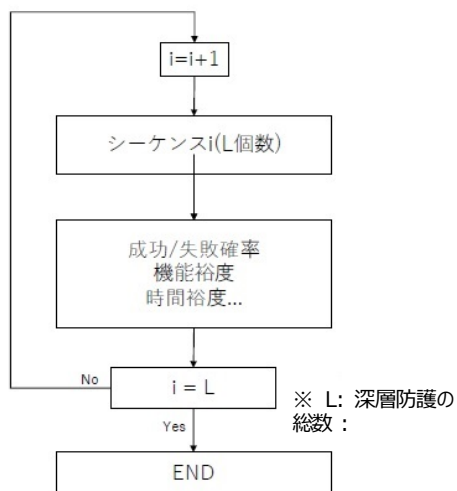
Fig.6 Continuous Markov chain and Monte Carlo method

Fig.6は、連続マルコフ連鎖モンテカルロ法の具体的な手順を示している。

- ① 初期条件の決定
- ② 各時間ステップにおけるプラントシステムのパラメータを評価する
- ③ 各機器などの「状態遷移確率」をパラメータで推定する
- ④ モンテカルロ法によるプラントの状態の決定
- ⑤ マルコフ過程に基づいて、次のステップのプラント状態を分析する

②~⑤の手順を繰り返すことで、その時々々のプラントの状態を反映したシナリオを得ることができる。また、シナリオの変更に伴う、AM対策の成功/失敗確率の変化、AM対策の順序の変化、新たなAM対策の追加などを考慮したレジリエンス指標が得られる。

Fig.7は、レジリエンス指標評価手法をCMMC化したときのアルゴリズムである。図のように、シーケンスiの中で動的な評価を行うことでリアルタイムでの安全機能レベルを評価することが可能となると考える。



↓ CMMC化 :

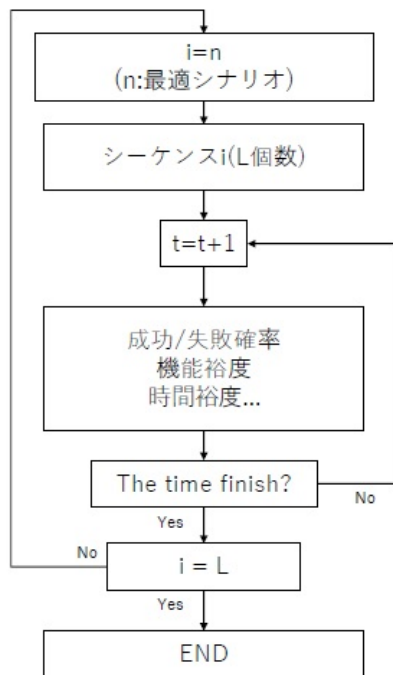


Fig.7 Resilience index algorithm that introduced the CMMC method

4. 結論と今後の課題

本論文では、破壊制御技術の導入がプラントの破壊事故時の回復力に与える効果を可視化するために、現在のレジリエンス指標の課題を4点掲示し、解決案を提案した。

今後、提案したレジリエンス指標の解決策を開発する予定である。

謝題

本研究は文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD0220353828 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Naoto KASAHARA, Takashi WAKAI, Izumi NAKAMURA and Takuya SATO, “Application of fracture control to mitigate failure consequence under BDBE”, Proceeding of the ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2020
- [2] Kazuyuki DEMACHI, Masaaki SUZUKI, Tatsuya ITOI, Kenta MURAKAMI, Naoto KASAHARA, Hiroshi MIYANO, Takao NAKAMURA, Shigeki ARAI, Masayuki KAMAYA, Masaaki MMATSUMOTO, “Development of Resilience Evaluation Method for Nuclear Power Plants”, E-Journal of Advanced Maintenance Vol.8-1: 23-31 (2016)
- [3] Sunghyon Jang and Akira Yamaguchi. “Dynamic scenario quantification for level 2 PRA of sodium-cooled fast reactor based on continuous Markov chain and Monte Carlo method coupled with meta-model of thermal-hydraulic analysis.” Journal of Nuclear Science and Technology, 55(8):1-9 (2018)