

リスク評価指標とレジリエンス指標を組み合わせた 経年プラントの総合評価

Development of Comprehensive Safety Assessment Method for Aging Nuclear Power Plant Using Risk Index and Resilience Index

| | | | |
|---------|-------|------------------|------------|
| 三菱総合研究所 | 杉山 直紀 | Naoki SUGIYMA | Non-Member |
| 法政大学 | 宮野 廣 | Hiroshi MIYANO | Member |
| 東京大学 | 山口 彰 | Akira Yamaguchi | Non-Member |
| 東京大学 | 出町 和之 | Kazuyuki DEMACHI | Member |
| 大阪大学 | 高田 孝 | Takashi TAKATA | Non-Member |

We have established a procedure for comprehensive safety assessment of aging plant using a combination of two indices; risk index and resilience index. And, we have identified important equipment using a simple resilience index and have extracted failure mode using a risk index with detailed plant model. Those were applied to three loop PWR plant as trials. We are reporting its summary and considering the effectiveness of the resilience index.

Keywords: Safety Assessment, Severe Accident, Accident Management, Aging Management and System Safety

1. 研究の背景

東京電力福島第一原子力発電所事故の反省を踏まえ、日本の原子力発電所においては、シビアアクシデント対策の大幅な拡充が行われた。また、個々の機器や部位に着目するだけでなく、プラント全体をシステムとして捉え、システム安全の考え方を採り入れる必要性・重要性が高まった。今後、プラントの経年化が進行する中で、新しく整備されたシビアアクシデント対策の経年変化がプラントの安全性に及ぼす影響を把握することが必要となってくる。一方で、多数の事故シナリオに対して、多様なシビアアクシデント対策の経年劣化の影響を把握し、高経年化対策に活用することは、その組み合わせを考えると、非常に困難な作業となる。

そこで、本手法開発では、原子力プラントの事故時におけるシステム安全機能の回復能力を簡易かつ定量的に評価する指標として開発されたレジリエンス指標と、確率論的リスク評価 (PRA) を用いた詳細なリスク評価指標とを組み合わせることで、効果的に経年プラントの総合的な安全評価を行う手法を開発した。そして、3 ループ PWR プラントを対象に、本手法の適用を試みた[1]。

連絡先: 杉山直紀、株式会社三菱総合研究所、
〒100-8141 東京都千代田区永田町 2-10-3、
E-mail: sugiyama@mri.co.jp

2. 評価手法の概要

レジリエンス指標については、別途、報告があることから、本稿ではリスク評価指標と総合評価手法の概要について述べる。

2.1 リスク評価指標

深層防護レベル4層のSA対策としては、著しい炉心損傷を防止するためのSA対策-Iと格納容器の閉じ込め機能を維持するためのSA対策-IIの2種類がある。それぞれの能力を評価するのに適した指標を検討する観点から検討を行った。

- ① 炉心損傷頻度 (CDF) は、炉心損傷の防止能力またはその変化を表す指標であることから、著しい炉心損傷への進展を防止するためのSA対策-Iの能力 (あるいはその変化) の評価には有効な指標である。その一方で、格納容器の機能喪失を防止するためのSA対策-IIの能力を比較することはできない。
- ② 条件付き格納容器破損確率 (CCFP) は、炉心損傷が発生したとの条件下での格納容器の閉じ込め機能の維持能力またはその変化を表す指標であることから、SA対策-IIの能力 (あるいはその変化) のみを評価する際には有効な指標である。その一方で、SA対策-Iについての能力を比較することはできない。
- ③ 格納容器破損頻度 (CFF) は、格納容器の閉じ込め

機能の維持能力またはその変化を表す指標であることから、SA 対策-I および SA 対策-II の両方を合わせた能力を評価するのに有効な指標であると考えられる。

これらの指標に対して、機器の経年劣化状態を代表する時刻歴として、過去（設計値、あるいは前回メンテナンス時）、現在、および将来（経年後、あるいは次回メンテナンス時）の3つの状態に着目する。

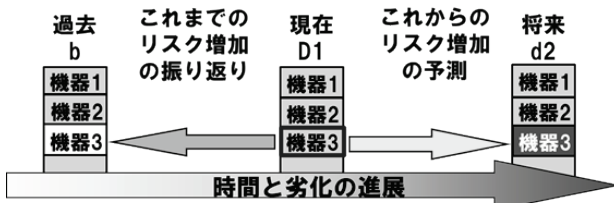


Fig.1 Representative time history in aging

現在の状態の CFF_{D1} をベース状態とする。ある機器に着目した場合、過去から現在までに対象となる機器により蓄積された指標（CFF）は、Fig. 1 に示すように他の機器を現状維持とし、対象機器のみを過去の状態とした指標を $CFF_{D1 \rightarrow b}^A$ とすると、過去から現在までのリスクの蓄積に関する指標を、下式で定義する。

$$\Delta CFF_{D1 \rightarrow b}^A = CFF_{D1} - CFF_{D1 \rightarrow b}^A \quad (1)$$

同様に現時点からの着目機器の経年化に伴うリスクの増加は、他の機器を現状とし対象機器のみを劣化させた状態における $CFF_{D1 \rightarrow d2}^A$ を用い、下式で定義する。

$$\Delta CFF_{D1 \rightarrow d2}^A = CFF_{D1 \rightarrow d2}^A - CFF_{D1} \quad (2)$$

経年化影響全体を示すリスク評価指標として、以下の通り定義する。

$$\Delta CFF \equiv \Delta CFF_{D1 \rightarrow b}^A + \Delta CFF_{D1 \rightarrow d2}^A \quad (3)$$

このようにリスクの過去から現在までの増分と、現在から将来までの増分を分けて考えることにより、今後の保全活動への示唆を得ることが期待できる。

2.2 総合評価手法

レジリエンス指標は、SA 対策の有効性を、SA 対策を単位として簡易的かつ定量的に評価することが可能な指標である。リスク評価指標は、機器あるいは故障モードを単位とし、詳細なモデルを構築し、評価するモデルである。このような特徴を活かし、経年プラントの総合評価するために、以下のような手順による手法を開発した。

1. レジリエンス指標を用いて、様々な SA 対策の有効性を簡易的に評価し、重要な SA 対策を抽出する。

2. 抽出された SA 対策を、PRA モデルに組み込み、機器・故障モード単位まで展開し、リスク評価指標の評価を行う。
3. 以上の結果に基づき、経年変化を考慮した場合に注意すべき機器・部位を抽出する。

このような手順を踏み、レジリエンス指標を有効な SA 対策を抽出するためのスクリーニングとして活用することにより、PRA でモデル化されている膨大な事故進展シナリオに対してモデル化する必要のある SA 対策を効果的に絞り込むことができる (Fig. 2)。

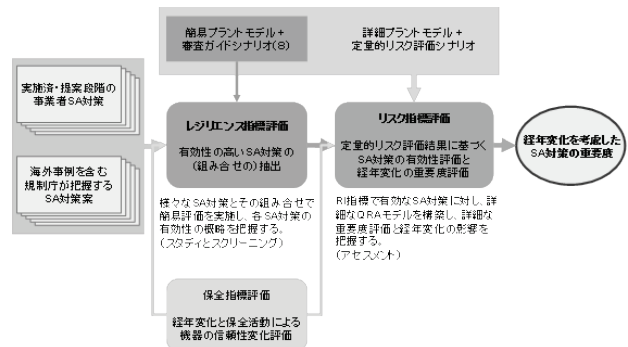


Fig.2 Framework of Assessment Method

3. 評価手法の試行

本 3 ループ PWR プラントを対象に、本手法の有効性を検証するための試行を実施した。実施に際しては、新規制基準適合審査等で公開されている資料をベースとした。

3.1 評価対象モデルの概要

試行実施時に適合審査資料の充実していた川内原子力発電所ならびに高浜原子力発電所の情報を基に、試行用の 3 ループ PWR プラントモデルを構築した。

文献[2]に基づけば、3 ループ PWR の起因事象別の格納容器破損頻度は原子炉補機冷却水系機能喪失が支配的であるが、試行にあたっては、レジリエンス指標とリスク評価指標で一貫した事故シナリオを評価する必要性があることから、今回は、外部電源喪失シナリオを対象とした。

3.2 重要な SA 対策の抽出

レジリエンス指標を評価する際には、機能喪失時点からの機能回復に着目することから、実際のシナリオは全交流電源喪失を起点としている。この起点から、①加圧器逃し弁による一次系減圧、②蓄圧注入系による炉心注

入、③移動式発電機、④格納容器スプレイ系の起動、⑤移動式ポンプ車による冷却水供給、の5つのSA対策を考慮した。その後、各対策の信頼性を1または0とし、いわゆるRAW重要度に相当する値(RAW相当値)と Fussell-Vesely 重要度に相当する値(FV相当値)を評価した。その結果をFig.3に示す。

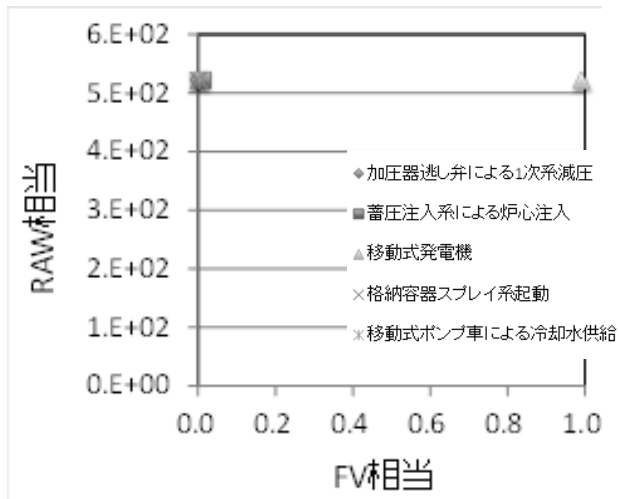


Fig.3 Results of Resilience index for SBO event

全ての対策が必要であるためRAW相当値は同じであるが、FV相当値では移動式発電機の値が大きくなっている。よって、リスク評価指標においては、移動式発電機を対象とすることに加えて、同じRAW相当値でFV相当値が異なる格納容器スプレイ系をモデル化することとした。既設の非重要系である消火水系を用いた手順が整備されており、この経年変化の影響を把握する観点も重要であることが、格納容器スプレイ系を選択したもう一つの理由である。

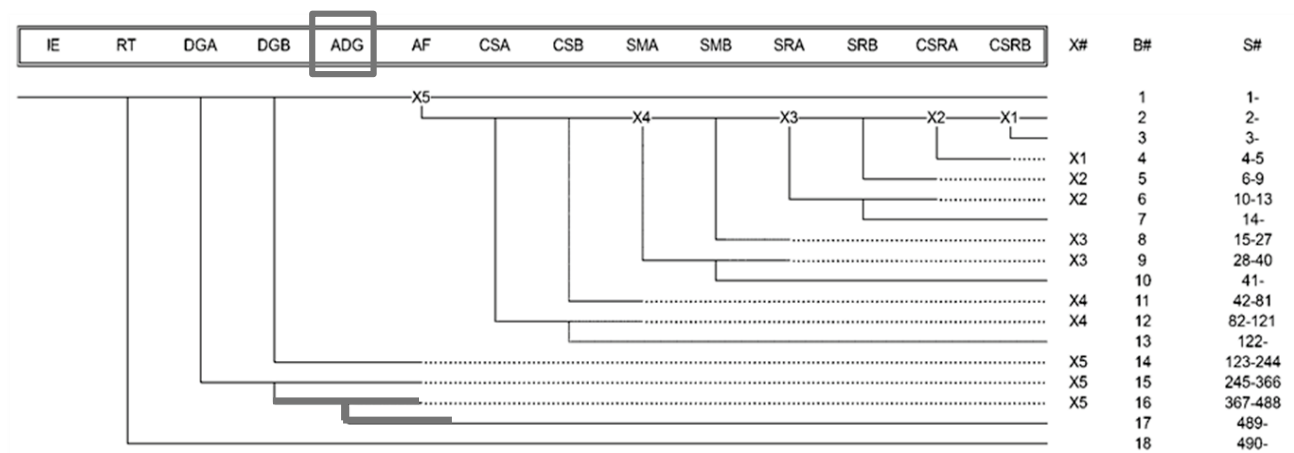


Fig.4 Event Tree for Loss of Offsite Power

3.3 リスク評価指標のためのモデル化

前節で抽出した2つのSA対策を考慮したイベントツリーと各SA対策のフォールトツリーモデルを構築した。代表として、空冷式非常用発電装置を考慮したイベントツリーをFig.4に示す。太線部が追加したヘディングである。また、空冷式非常用発電装置のフォールトツリーの一部をFig.5に示す。フォールトツリーの作成に際して、十分な情報が得られない場合、プラント情報に詳しい専門家の判断によるモデル化を行っている。

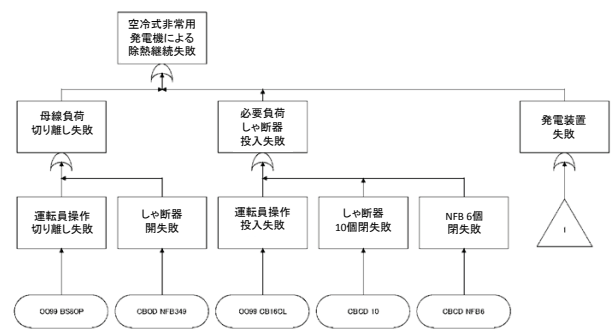


Fig.5 Fault Tree of Air-cooled Diesel Generator

3.4 経年変化を考慮した機器故障率の設定

機器故障率データベースはNUCIA[3]を参考に設定した。また、人的過誤率は一定の操作手順を仮定しTHERP[4]による評価を実施し、設定した。

現在を「高経年化技術評価を最初に受ける運転開始から30年目」とし、過去については「運転開始直後(30年前)」、将来については「次の高経年化技術評価の年(10年後)」とした。

動的機器については線形での故障率変化を、静的機器については指数的な故障率変化を仮定した。専門家判断により、それぞれのモデルにおいて将来値（40年値）は1.1倍、1.2倍に、過去値（設計値）は0.7倍、0.83（=1/1.2）倍としている。

3.5 リスク評価指標の結果

以上のモデルを用いてリスク評価指標の試解析を実施した。その結果をFig.6に示す。

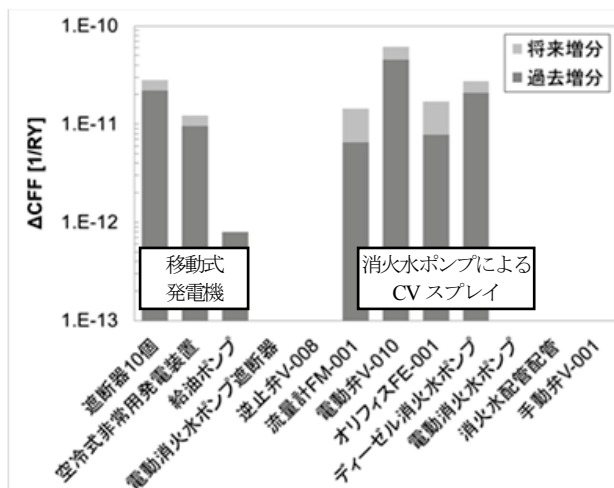


Fig.6 Results of Risk index for SBO event

リスク評価指標が過去から将来にわたるリスク増分を示す指標であることを考えると、レジリエンス指標において信頼性の改善効果を示すFV相当値が低い場合でも、RAW相当値が大きいSA対策は、リスク指標上で重要となる場合があることが確認された。また、空冷式非常用発電機と流量計との比較から、過去30年間のリスク増分に対して、今後10年でのリスク増分によりリスク増加の合計値が逆転する場合があることも示されており、経年変化パターンの違いを考慮できることも確認された。

4. 結論

レジリエンス指標をSA対策のスクリーニングに用い、リスク評価指標によって機器や部位の重要度を把握することで、経年プラントの総合評価を行う手法を開発し、3ループPWRプラントに適用し、その有効性を確認した。

今回は内的事象を対象としているが、レジリエンス指標が外力も扱えることを考えると、外的事象も含む包括的なPRAモデルを用いて、経年変化がプラントの安全性に及ぼす影響を効率的かつ効果的に把握する方法への拡張が期待される。

謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁から受託した高経年化技術評価高度化事業「経年プラントの総合的な安全評価手法に係る調査研究」による成果の一部である。

参考文献

- [1] 原子力規制庁委託事業・平成26年度高経年化技術評価高度化事業、「経年プラントの安全評価指標と評価データの枠組みに関する調査」成果報告書
- [2] 関西電力、「高浜3号炉及び4号炉 確率論的リスク評価 (PRA) について」(2013)
- [3] 故障件数の不確実さを考慮した国内一般機器故障率の推定 (1982年度~2002年21ヵ年49基データ) 2009年5月 有限責任中間法人日本原子力技術協会
- [4] A. D. Swain, H. E. Guttman : NUREG CR-1278, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications Final Report, 1983.