

# 劣化による機器故障率時間変化を考慮した保全最適化手法

## The Optimization Method of Maintenance in Large Scale Plant Systems Considering Time-Dependent Degradation of the Components

東京大学工学部 岡田 裕介 Yusuke OKADA Student Member  
東京大学工学系研究科 関村 直人 Naoto Sekimura Member

In this paper, we propose an advanced method to optimize maintenance in complex systems composed of many components which can degrade under service. Total lifetime cost of the system in nuclear power plants is estimated adopting condition-based maintenance in addition to the time-based maintenance considering both Fussell-Vesely factor and degradation behavior of the component.

**Keywords:** Degradation Model, Optimization of Maintenance, Fussell-Vesely, Fault Tree Analysis

### 1. 緒言

大規模プラントを構成する多数の機器の保全手法最適化を図るためには、大規模な信頼性最適化解析が必要である。本研究では、昨年度の発表に引き続いて、各機器の保全重要度を加味した時間計画保全・状態監視保全等の保全手法最適化評価法に対して、さらに各機器の時間経過に伴う劣化過程を取り込み、プラント運用期間内の保全費用最適化を可能とする評価システムを構築した。ここでは具体例として、軽水炉のタービン系を対象として検討を行った結果について、報告する。

### 2. 解析の対象と手法

#### 2.1 解析対象

本研究ではタービン系における不具合事象を頂上事象として設定してフォルトツリー解析を行い、信頼性解析と保全最適化を行った。

このフォルトツリーのミニマルカットセットは非常に多数となるため、最適化計算の効率化が必要となる。ここで想定した頂上事象は、2つの事象の同時発生に起因することから、その2つを中間事象として、各々をミニマルカットセットに分けて最適化解析を進めた。

#### 2.2 各機器の重要度評価と保全方式

膨大な数の機器全てについて最適保全政策を決定する事は容易ではないため、機器を重要度に応じて分類し、重要であると判断された機器に対し最適化を行う

ことが現実的である。本研究では、Fussell-Vesely (FV) の重要度指標を用いた。この指標は、頂上事象の発生を仮定した時に該当する機器の故障が頂上事象の発生にどの程度寄与しているかを示すものであり、次式で定義される。

$$FV = \frac{P(top) - P(top/i=0)}{P(top)} \quad (1)$$

ここで、 $P(top)$  は頂上事象の発生確率を表し、 $P(top/i=0)$  は機器  $i$  が故障していない場合に頂上事象が発生する確率である。

各機器の保全手法については、初期状態としては時間基準保全を採用することとし、これに加えて重要度指標に基づいて、状態監視保全、事後保全の組合せによって保全最適化が図れないかを検討した。

#### 2.3 解析方法

##### (1) 故障率とその時間変化

各機器の故障率は、初期故障期間と故障率一定の期間を経て、劣化による故障率の上昇が起こるものと仮定した。機器種別ごとの具体的な故障率データについては、NUREG/CR-2815 及び NUCIA のデータベースを参考に仮定を行った。また、劣化に伴う故障率上昇については、ワイブル分布に従うものとして、設定した。

##### (2) 復旧期間と復旧コスト

各機器には、故障した際に復旧するまでの期間と復旧にかかるコストを取り込んだ。また定期的な検査の頻度を設定し、系統全体の経済性について検討した。

### 3. 結果と考察

本検討の結果、頂上事象の発生に大きく寄与するクリティカルな機器と事象を抽出することができた。また、頂上事象発生確率の時間的依存性を明らかにするために、故障率の時間変動を考慮した場合の中間事象と頂上事象の発生確率の変化を、機器故障率が時間に依存しない場合と比較して評価した。この結果、頂上事象発生確率の時間的変動には、特定機器の時間変動が大きく関わっていることが明らかにされ、タービン系の故障率増加を防ぐ保全策をとることによって、頂上事象発生確率上昇を効果的に抑えうることを定量的に示すことができた。

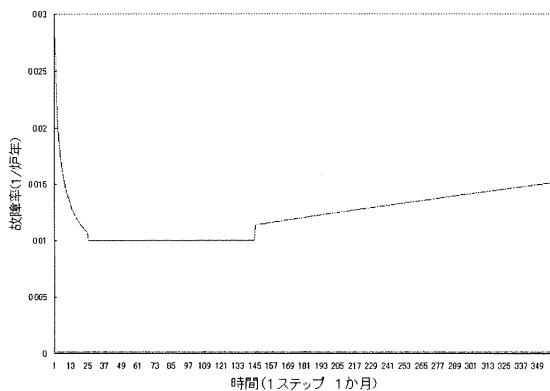


図1 故障率時間変動を考慮し、重要度の高い機器に状態監視保全を適用した場合の頂上事象発生確率（時間は1ヶ月を単位とし、故障率を1/炉年で示した）

頂上事象発生確率低減の観点から、機器重要度の高い機器に状態監視保全を適用し、他の機器には時間基準保全を適用して、30年間の保全費用最適化を評価した場合について、頂上事象発生確率の時間変化を図1に示す。ここでは初期故障を仮定しているために、運転開始当初の頂上事象発生確率は高くなっているが、重要機器に状態監視保全を適用した場合には、タービン系の頂上事象発生確率が個々の機器の劣化に伴い大幅に上昇することはない。

図2に長期間にわたる総コスト（相対値）を比較して示す。総コストには、機器の交換や状態監視などの保全費用に加え、故障の際のシステム停止による損害を含んでいる。全ての機器を時間基準保全による保全方式にするよりも状態監視保全での保全を用いる方が総コストを少なくできる。さらに、機器の劣化傾向を

適切に把握して、運用期間中に時間基準保全から状態監視保全に切り替える保全最適化を行った場合には、図2の右端に示すように、さらにコストを削減できることができた。

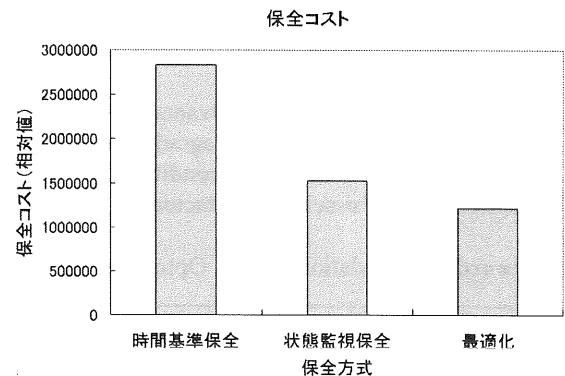


図2 頂上事象の発生に伴う復旧コストを考慮した30年間の総コストの比較

以上のように、開発した評価手法を用いて、個々の機器の損傷に対応した故障率時間変化の評価を、その機器自体の保全方式の適正化に活用するのみならず、系統全体の保全最適化の観点から利用しうることを明らかにできた。

### 4. 結論

本研究で行った故障率の時間変化を考慮した信頼性解析手法は、保全重要度の高い機器について、その劣化データに基づいた適切な保全政策への改善を提案することができる点で有用である。また本手法は、高経年化原子力発電プラントの保全高度化に活用できるほか、多くの経年劣化事象を考慮すべき複雑システムへの適用が可能であると考えられる。

今後は、ワイブル分布のみならず故障物理に基づいたシミュレーション結果の導入等についても議論を進める予定である。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、日本原子力発電（株）及び三菱重工業（株）にお世話になりました。ここに記して、謝意を表します。