

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	原子炉再循環系配管の保全優先度評価手法とリスク・コミュニケーション手法の開発に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	小嶋正義
Author(English)	Masayoshi Kojima
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11514号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:木倉 宏成,小林 能直,赤塚 洋,相樂 洋,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11514号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

## 論文の要約

論文題目： 原子炉再循環系配管の保全優先度評価手法とリスク・コミュニケーション手法の開発に関する研究

工学院・機械系・原子核工学コース 小嶋 正義

### 論文の概要

本論文では、原子炉再循環系配管に発生する応力腐食割れに伴うリスク評価のために、欠陥の検出後に配管の補修が不可能となる発生頻度、影響度、検出性の3つのリスク指標に着目し、3指標から保全対策の優先度を評価する手法と、3指標を活用してリスクと安全性を可視化する手法を開発した。3指標から保全対策の優先度を評価する手法を実用化するために、破壊力学理論にモンテカルロ法を組み合わせた数値解析の結果を活用することで3指標を機械的かつ定量的に算出する方法を構築し、試解析を行った。その結果、配管破損の潜在的リスクが高い材料条件であっても超音波探傷試験員の力量や検査間隔によって優先度の改善が見込めることを示した。さらに、3指標を活用してリスクと安全性を可視化する手法を実用化するために、複数のグラフツールを分析して視覚的評価の適切性を考察し最適な描画手法を構築した。そして、可視化した結果と優先度を評価した結果を比較することで、可視化手法が複数の保全対策を短時間で読み解くための視覚的かつ俯瞰的な評価に有効であること及びリスク低減と安全性向上に向けたステークホルダー間のリスク・コミュニケーションに有用な手段となることを明らかにした。

### 各章の概説

第1章「緒言」では、近年、原子力規制機関への報告の多い事象のなかで、特に、沸騰水型軽水炉の圧力バウンダリを構成する原子炉再循環系配管に発生する応力腐食割れの発生原因及び保全対策の変遷について概観した上で、同事象に伴う配管破損を回避するためには、リスク情報を活用して保全対策を決定することが重要であることを指摘した。また、その決定の過程を可視化してステークホルダー間でリスク・コミュニケーションすることが重要であることを指摘した。これらを踏まえ、配管破損リスクの低減に資するために、複数の候補からなる保全対策に対する優先順位を定量的に示して評価する手法及び定量化の過程で得られるリスク指標を可視化して優先順位を視覚的に評価する手法を開発するという本研究の意義と目的を述べた。

第2章「超音波探傷試験員の力量を考慮した原子炉再循環系配管の破損リスクの評価」では、原子炉再循環系配管の応力腐食割れに対する保全対策の優先順位を評価するためには、力量が異なる超音波探傷試験員による応力腐食割れの欠陥検出確率が配管破損確率（運転期間中に配管が破損する確率）に及ぼす影響を評価する必要があること示した上で、有資格及び無資格超音波探傷試験員による実験データを基に、非線形回帰分析によりそれぞれの力量を数種類の関数式でモデル化した。また、配管破損確率を算出するために、破壊力学理論にモンテカルロ法を組み合わせた確率論的破壊力学の解析コードを開発した。そして、モデル化した関数式における

回帰係数の中央値及び 95%上下信頼区間による条件並びに超音波探傷試験の検査間隔を変化させた条件で配管破損確率を解析した。その結果、検査間隔が短くなるに従い配管破損確率が力量に依存することを示し、また、検査間隔が長くなるに従って力量によらず配管破損確率が有資格者と無資格者と同等となるリスクを明らかにした。さらに、確率論的破壊力学の解析結果を用いた保全対策の優先順位の定量評価に必要となる信頼性の高い関数式を明らかにした。

第 3 章「原子炉再循環系配管の保守管理における保全優先度の評価手法の開発」では、まず、配管破損の回避と保全対策を関連付けるために、肉盛溶接工法による補修が可能な応力腐食割れの深さの目標基準を超えた場合を故障モードに設定し、その発生頻度、影響度及び検出性の 3 指標を評点で示すリスク指標として定義した。次に、確率論的破壊力学で算出される累積確率を用いて 3 指標の評点を指数方程式により機械的かつ定量的に決定する方法を構築した。また、発生頻度及び影響度から得られる配管破損の潜在的リスクと、3 指標から得られる保全対策の優先順位を定量的に示して分析する手法（保全優先度評価手法）を開発した。その際、故障モード・影響解析と呼ばれる品質管理手法の考えを利用した。最後に、超音波探傷試験員の力量、検査間隔、応力腐食割れ発生後の運転期間、配管材質及び配管呼び径を変化させた解析条件で 3 指標の評点を解析し、配管破損の潜在的リスク及び保全対策の相対的な優先順位を散布図で示して分析した。その結果、潜在的リスクが高い配管材質や配管呼び径であっても、超音波探傷試験員の力量や検査間隔の条件によって優先順位の改善が見込めること示すことで、保全優先度評価手法が配管破損のリスク低減に有用な手段となることを明らかにした。

第 4 章「原子炉再循環系配管の保守管理におけるリスク・コミュニケーション手法の開発」では、3 指標の可視化によって保全対策の優先順位を視覚的に評価する手法を開発するために、複数のグラフツールを分析して視覚的評価の適切性を考察した上で、レーダーチャートを使用し 3 頂点の位置と面積によって保全対策の優先順位を評価する手法がリスク評価において最適であることを示した。そして、第 3 章の保全優先度評価手法による相対的な優先順位の解析結果をレーダーチャートで描画し、第 3 章の散布図との比較を行った。その結果、レーダーチャートによるリスクの可視化は、3 指標及び優先順位の視覚的かつ俯瞰的な評価が可能で、複数の解析条件から得られた結果を短時間で読み解くための特別なスキルを要さないことを利点として示した。さらに、保全対策によるリスク低減と安全性向上との関係を数式化することで新たに 3 つの安全性指標を定義し、安全性評価には面グラフによる可視化手法が最適であることをグラフツールの分析により示した。そして、第 3 章の解析条件に対する絶対的な優先順位の結果を面グラフで描画した。その結果、面グラフによる安全性の可視化は、配管破損の潜在的リスクと保全対策の優先順位を同時に分析できることを利点として示した。これらの利点から、リスクをレーダーチャートで可視化する手法と安全性を面グラフで可視化する手法（リスク・コミュニケーション手法）が、原子炉再循環系配管の保全対策によるリスク低減及び安全性向上に向けたステークホルダー間のリスク・コミュニケーションに有用な手段となることを明らかにした。

第 5 章「結言」では、各章で得られた成果を要約し総括するとともに、開発した手法の運用定着と幅広い分野への活用に向けた今後の展望を示した。