

# 博士論文審査結果報告書

## 論 文 題 目

大規模石油化学プラントにおける  
信頼性とコストを考慮した  
最適な設備管理に関する研究

申 請 者

林 和弘

情報生産システム工学専攻  
生産プロセス工学研究

2022年2月

社会や産業における多くのインフラが構築されてから 50 年を経ることも珍しくなくなり、事故防止のマネジメントシステムが要求される中、限りあるリソースを有効に活用することにより設備の信頼性を確保すると同時に設備管理コストを削減する事が重要となっている。本研究では、設備の信頼性の確保と管理コストの削減を両立させることを設備管理の最適化と定義しているが、世の中の様々な要求に対して最適化を目指す設備管理は人系の自動化が難しい分野で、要求も時代と共に変化し成果の評価も長期間を要することから、これまで論理的に体系化されてこなかった。一方で、日本のものづくりにおける設備管理技術は世界でも誇れるレベルにあり、最適化を目指すマネジメントを標準化し利用できるように体系化することが求められている。本研究では、1万台以上に及ぶ静動機器、総延長 1500km を超える配管を有し、大量の危険物を扱い過酷な環境条件下で連続運転されている大規模石油化学プラントを管理の対象としている。修繕費 100 億円/年の設備管理業務における設備管理の信頼性と管理コストのトレードオフを多目的最適化問題として捉えて定式化し、様々な箇所での適用を可能とする標準化された管理手法を示すことを目的としている。その解法として次の 2 項のアプローチ①「設備の信頼性と設備管理コストの妥協点の探索」、②「プラントの長期連続運転の実現」を提案している。

設備の信頼性と設備管理コストの妥協点の探索のアプローチは、信頼度指標と影響度指標から求められたリスクアセスメントを基にした優先度設定により定式化し、管理計画・実行に伴う検査の標準化と定量化を図ることにより最適な設備管理を目指している。

石油化学プラントは安全・安定した 24 時間連続運転を確実に実現するために、原則年 1 回装置を全停止して点検・修理のための定期補修を行うことが高圧ガス保安法で義務付けられている。ただし、経済産業省から設備管理業務が適切に行われ優良であると認められれば 2~8 年に 1 回の定期補修に緩和されるため、補修に伴う数百億円のコストを抑えることができる。プラントの長期連続運転の実現のアプローチでは、規制緩和の享受による長期連続運転の達成を目標とするが、優良認定の資格要件は示されているものの、そこに至る道程は企業側に委ねられ標準化された管理の指標は示されていない。そこで本研究では、設備の信頼性の向上を図って最適な設備管理を達成するために、以下に示す段階的な 5 ステップのアプローチを提案している。

1. 業務分掌による役割分担から知識や経験の維持向上を図る体制の構築
2. 異常兆候の早期発見を基にした安定運転の確保による設備の寿命の延伸
3. 顕在化した故障の結果系からのトラブル再発防止による信頼性向上
4. 阻害要因（腐食、経年劣化など）の原因系からの安定連続運転への対応
5. 網羅的な劣化モードの抽出による、寿命予測を基にした申請者考案の設備管理シートを使った長期安全安定操業の確保

以下に本論文の各章の概要と成果を述べる。

第1章では、本研究の背景である設備管理の現状や技術の動向から課題を整理して研究の必要性を述べ、目的と構成を示している。さらに、本論文では主にハード面のプラントの最適な設備管理を目指していることを挙げ、それを実現するための様々なアプローチを紹介している。

第2章では、対象であるプラントの設備管理の成り立ちを石油化学工業の概観から示し、解法であるアプローチの定式化と標準化について述べている。信頼性とコストの妥協点の探索では、リスクを影響度と信頼度のマトリクスで評価する「リスクアセスメントを基にした優先度設定」について論じている。設備管理の計画設定でトレードオフにある信頼性の確保とコストの低減の妥協点の探索は難しいが、リスクによる優先度設定を基にすれば合理的な解が得られる。有限リソースで効果的な計画を実現する標準化した管理手法は多数の関係者による合理的な意思決定手段として有効である。リスク評価による修繕費の優先度設定は、社員約4万人の事例企業で年間約5万件が20年以上にわたって適用されている。

法的制約のプラントの長期連続運転の実現では、申請者が実践してきた前述の5ステップの設備管理で信頼性の向上を図り、法律による審査を経て設備管理コストの低減と大幅な生産性向上の最適化を達成している。特に5番目のステップで導入された設備管理シートは、管理の部位ごとの形状や材質と流体の微量成分を組み合わせることで、劣化モードを抜けなく抽出する設備管理手法であり、検査や寿命予測とその評価で措置を含め供用期間を検証するツールとして長きにわたり認知されている。認定事業所取得の効果として、事業所単位で20~30億円/年の経費削減が見込まれる。

第3章では、上述の定式化手法を適用して設備管理業務を標準化した具体的な事例を示している。劣化の管理を取り上げ、工場設備、塗装、配管管理、外面腐食、ステンレス製機器、工業用水熱交換器で、信頼性とコストの最適化手法と長期連続運転を実現する信頼性向上の実例を述べている。

(1) 経年化による劣化の管理では、劣化を基点とした管理の方法について述べ、寿命予測を基にした設備管理に必要な検査や診断技術のコストと信頼性確保の最適化に、リスクアセスメントによる優先度設定を適用する手法を示している。劣化の管理には、個別で行う通常管理と集合体基準で行う管理があり、集合体基準で行う塗装の管理には合理的な劣化の評価による優先度設定を適用する。事例事業所に適用した結果、年間約3億円の塗装維持費が適用後に1/3以下に低減した。

(2) 配管の劣化管理では、広範囲で複雑に敷設され膨大な数の配慮すべき部位や部品を有し、経年劣化を懸念する箇所も増加して事故・トラブルのリスクが高まっていることが課題であった。管理するには論理的、体系的な取り組みが必要なことから、PDCA(Plan/Do/Check/Act)サイクルを意識した業務フローと具体的な管理の要領について述べている。事例企業での管理強化の効果は、従来の漏洩事故や生産に影響を与えた配管トラブルの年平均

24 件での推移が 3 年目には年 5 件に低減している。全トラブルに占める配管割合も従来が 25～30%であるのに対し、3 年目に 13%まで半減している。

(3) 外面腐食の劣化の管理では、特に外観では検知できない断熱材下外面腐食の管理のための検査に多額のコストが必要であるという問題に対し、リスク評価による優先度の設定を適用している。劣化メカニズムに基づき定めた指標を評価して検査の優先度設定を行った結果、機器では 3 年後、配管では 5 年後に故障 0 件を達成している。さらに評価の精度向上を目指し、検査データを基に多変量解析で炭素鋼製機器や配管の外面腐食速度の予測式を策定し寿命予測する技術についても述べている。

(4) ステンレス製機器の鋭敏化による劣化の管理では、原因系からの取り組みで鋭敏化の評価と復元の標準化した技術による信頼性向上を述べている。鋭敏化の許容しきい値とそれを満足する溶接入熱  $6,000 \text{ J/cm}$  以下に抑える補修法により、一基当たりの更新費用が数千万円ほど削減可能となった。

(5) 工業用水熱交換器の設備管理の最適化では、トレードオフの関係にある熱交換器の設備管理コストと工業用水の水処理コストに多変量解析を適用したアプローチを示している。工業用水熱交換器の結果系の日常管理の雑多なデータや設備管理のデータを使用して、設備管理と水処理の最適条件を求めることで、事例事業所の 31 のプラントに適用し 2 年後に保全費用と水処理費用の総費用 7 億円を 20%超低減している。

第 4 章では、本論文の研究テーマである大規模石油化学プラントにおける信頼性とコストを考慮した最適な設備管理に関する研究を総括して結論を述べている。

以上の成果を要約すると以下がいえる。本研究では、最適な設備管理を目指す 2 つのアプローチを定式化して、それを基に標準化した設備管理手法を示している。1 つ目は、標準化手法として様々な設備管理の活動に信頼度と影響度を当てはめ、そのマトリクスで設定する優先度を基に最適化を図る標準化手法である。また 2 つ目は石油化学プラントの長期連続運転を実現するために段階的に信頼性を向上する 5 ステップの設備管理手法であり、実例をあげてその有効性を実証している。2 つのアプローチを基に具体的な標準化した手法を用いることで、設備管理業務の効率化、標準化が実現できている。

これらの研究成果は、当該分野の研究に大きく貢献し、実用的な価値が高いと認められる。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2021 年 10 月 14 日

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）（九州大学）	立野繁之
副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	犬島 浩
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	吉江 修
	九州大学名誉教授	工学博士（東京大学）	松山久義