

早稲田大学審査学位論文（博士）

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

A Study on Optimal Maintenance Management  
Considering Reliability and Cost  
for Petrochemical Plants

林 和弘

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

2022年2月

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.1.1 設備管理の背景 .....	2
1.1.2 設備管理の技術背景 .....	4
1.2 本論文の概要 .....	5
第2章 最適な設備管理の定式化 .....	9
2.1 石油化学工業の概観 .....	10
2.2 リスクアセスメントを基にした効果的な計画 .....	12
2.2.1 リスク評価による修繕費の優先度設定 .....	14
2.2.2 リスク評価による設備管理の計画 .....	18
2.3 設備管理の体制の構築 .....	22
2.4 異常の兆候の早期発見による安定運転の確保 .....	25
2.4.1 検査の区分と体制 .....	25
2.4.2 設備の保全方針の設定 .....	26
2.4.3 開放検査周期の設定方法 .....	27
2.4.4 日常点検の強化策 .....	29
2.5 発生故障の結果系からの取り組みによる信頼性の向上 .....	32
2.5.1 トラブル防止と削減への取り組み .....	35
2.5.2 工事管理と協力会社管理 .....	37
2.6 阻害要因の原因系からの取り組みによる安定連続運転への対応 .....	38
2.6.1 予測の問題点 .....	39
2.6.2 阻害要因の把握と措置 .....	40
2.7 網羅的な劣化モードの検証による長期安全安定操業の確保 .....	43
2.7.1 長期安全安定操業への取り組み .....	44

2.7.2	検査手法の体系化	45
2.7.3	寿命予測の体系化	51
2.7.4	運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理	60
2.7.5	運転管理シート	61
2.7.6	設備管理シート	65
<b>2.8</b>	<b>第2章の結言</b>	<b>73</b>
<b>第3章 設備管理の標準化した技術</b>		<b>77</b>
<b>3.1</b>	<b>工場設備の経年化による劣化の管理</b>	<b>77</b>
3.1.1	経年劣化のマネージメント	78
3.1.2	経年劣化への対応技術	81
3.1.3	設備の劣化を基点とした管理	84
3.1.4	工場設備の経年化による劣化の管理の結言	86
<b>3.2</b>	<b>集合体基準の劣化管理による塗装の管理</b>	<b>86</b>
3.2.1	集合体で行う劣化管理	86
3.2.2	塗装の劣化管理	87
3.2.3	塗装の管理の実例	92
3.2.4	集合体基準の劣化管理による塗装の管理の結言	95
<b>3.3</b>	<b>配管の劣化管理</b>	<b>96</b>
3.3.1	配管管理の要求	96
3.3.2	配管管理の業務フロー	98
3.3.3	配管管理の強化	103
3.3.4	計画検査における劣化管理の要領	104
3.3.5	配管の劣化管理の結言	106
<b>3.4</b>	<b>外面腐食による劣化の管理</b>	<b>107</b>
3.4.1	外面腐食への取り組み	107
3.4.2	外面腐食の管理の対象	108

3.4.3	外面腐食検査の優先度評価の管理システム	110
3.4.4	寿命予測を基にした外面腐食検査の優先度評価の管理システム	117
3.4.5	外面腐食の管理の体系	120
3.4.6	外面腐食の劣化管理の結言	122
<b>3.5</b>	<b>ステンレス製機器の鋭敏化による劣化の管理</b>	<b>124</b>
3.5.1	鋭敏化の発生機構	124
3.5.2	鋭敏化の許容限界	125
3.5.3	鋭敏化域の補修	127
3.5.4	実機の鋭敏化域の補修	131
3.5.5	ステンレス製機器の鋭敏化による劣化の管理の結言	135
<b>3.6</b>	<b>多変量解析を適用した工業用水熱交換器の設備管理の最適化</b>	<b>136</b>
3.6.1	工業用水熱交換器の課題	137
3.6.2	多変量解析を使用した PDCA マネージメントによる最適化の手順	137
3.6.3	工業用水熱交換器の阻害要因	139
3.6.4	工業用水の水質	140
3.6.5	阻害要因の管理	141
3.6.6	多変量解析を使った最適化のステップ	143
3.6.7	解析結果と改善策	145
3.6.8	効果のモニタリングと評価	148
3.6.9	多変量解析を適用した工業用水熱交換器の設備管理の最適化の結言	148
<b>3.7</b>	<b>設備管理活動におけるパフォーマンス指標</b>	<b>150</b>
3.7.1	設備管理活動における課題	150
3.7.2	パフォーマンス指標の設定	151
3.7.3	指標の構成	151
3.7.4	指標の定義	153
3.7.5	診断事例	156
3.7.6	設備管理活動におけるパフォーマンス指標の結言	158

第4章 結論	159
謝辞	163
用語の説明	165
参考文献	175
研究業績	183



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

設備管理は、広義には設備の設計から廃棄までのライフサイクルの中で維持と向上を図ることであり、端的には適切な保全カレンダー\*を作成し、確実な実行と解析評価で、可能な限りの設備の信頼性の向上とコスト低減の最適化を図ることと言える<sup>[1]-[3]</sup>。そのためには関係する多数の事柄を整備し改善していくマネジメントが必要と成る。本論文は、大規模石油化学プラント\*（以降、略して“プラント”と称する。）を対象に種々の背景からこれまでに論じられてきていない最適な設備管理を目指す技術について、トレードオフの関係にある信頼性とコストを満足する論理的なアプローチ法を定式化して提案し、それを基に実際に適用して成果を上げている標準化した技術を検証する。

プラントにおける最適な設備管理には、信頼性やコストの他にも様々な観点があり、その時々々の要求に応じて多数の評価指標の目的関数を用いる。結果として最適解も複数存在し、互いにトレードオフの関係にある評価指標の目的関数間でバランスした最適解を得ることが求められる。それらは多目的最適化問題（Multi-Objective Optimization Problems）と呼ばれるものの解の探索であり<sup>[4]</sup>、その一般式は、以下 (1-1) 式で表せる。

$$\text{maximize } f_i(x) \quad (x = x_1, x_2, \dots, x_n \in X) \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (1-1)$$

数学的解法が研究の目的ではなく、式を使って論理的なアプローチ法を以下に説明する。ここで  $x$  は、指標を改善するための調整可能な変数で、設備管理に関する活動が該当する。具体的には保全計画の策定、検査や工事の実施、診断や評価、改善や反映、文書管理、教育や訓練などがある。 $X$ は、 $x$ の変域である。例えば需要の市場環境などは設備管理の活動の変域外である。 $f_i(x)$ は、設備管理の対象物の評価指標の目的関数であり、対象プラントの安全性、損失額などの生産性、オフ品額などの品質性、環境負荷低減などの環境性、設備の信頼性、設備管理コストの低減額、設備管理以外のコスト低減額などが該当する。設備管理に直結する法的規制の制約が無ければ、安全性、生産性、品質性、環境性、設備管理コスト以外のコスト低減額は設備の信頼性と同じ方向に動き、設備管理コストは逆の方向に動く。法的規制の制約が無い場合における多目的最適化問題の解は、設備の信頼性と設備管理コストの妥協点を探索することとなる。

プラントの設備は様々な法的規制を受けており、その多くは国民の生命と財産を守ることを目的に設備の健全性の維持管理を要求している。例えば内圧 1MPa 以上の高圧ガスを扱う設備では、1年に1回設備を停止して保安検査を受けなければならない。その他にボイラーや蒸気を発生する設備、化学物質を扱う設備、油などの危険物を扱う設備なども法による検査が要求されており、プラントは毎年の停止を余儀なくされている。ただし信頼性の高いことを実証して公的審査に合格すれば、運転中の保安検査が許されて4年以上の連続運転が可能になる制度があり、信頼性の向上が合理的に証明され、かつ長期の連続運転で大幅な生産性の向上や設備管理コストの低減まで得ることができる。このようなプラントの多目的最適化問題の解は長期連続運転の実現となる。本論文では以下の2項のアプローチ法を最適な設備管理を目指す技術の定式とする。

- (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

設備管理の対象は、ハードであるプラントであるが、設備管理を実行するのはソフトの組織や体制の人であり、そのパフォーマンスを維持・向上させることを目的とする施策も

技術としてある。本論文では、ソフト面を制御変数になると考え、その影響を測定し制御する方法に設備管理活動のパフォーマンスを指標により評価する技術を提示し、その他を今後の研究課題としている。従って2項のアプローチ法が成立するハード面のプラントの最適な設備管理を目指す技術を主な対象にしている。

常に変化し、進歩し、多岐に亘る世の中の要求に応えるには、恒常的に設備管理レベルを向上させ、かつ信頼性とコストを含めた最適な設備管理が必要になっている<sup>[1]-[3]</sup>。世の中の要求が時々刻々変化するので、最適解も時間により変化し、さまざまな値を取るところに最適な設備管理を目指す困難さがある。世の中の要求事項でもある設備管理の一つ一つの要素の標準化と定量化を図って技術を深め、最適解に近づく研究を進めることで設備管理のレベル向上に寄与できる。すなわち設備管理の技術・手法を体系的に論理立てして標準化した技術とすれば、理解や認識も得られ、伝承によるレベル向上にも繋げることができる。

### 1.1.1 設備管理の背景

本項で述べる設備管理の背景から明らかになる設備管理の課題は、以下の項目に整理される。筆者の提案する2項のアプローチ法がそれら設備管理の課題に対する解決策として適用できる。

- (1) 拡大重視で論理的な体系化が遅れ、人材育成・技術伝承が属人的
- (2) 建設時の不具合を抱えて経年化した設備で、不備前提とリスクの発現
- (3) 経費コストの考え方で投資の概念が不足し、経営層への論理的な説明責任が不足
- (4) 改善効果の見極めに長期間を要するために徹底・継続が困難な性能改善や寿命延長
- (5) 時代の背景で要求事項も時々刻々変化するので、時間により変化する最適解

20世紀後半の戦後、急激な勢いで構築された日本の社会インフラは、耐用年数50年を迎え、経年による劣化進行で補修更新が必要となっている。一方、国の公共インフラ投資は、1996年度48兆円のピークから昨今では25兆円程度に激減している。国土交通省のシミュレーションでは、2018年の維持管理・更新費の推計5.2兆円が、これまでの不具合が生じてから対策する事後保全（Breakdown Maintenance : BM）の継続では20年後に10兆円規模になり、新規の建設ができない状況になると予想している。LCC (Life Cycle Cost) \*での最適化を目指して不具合が生じる前に対策する予防保全（Preventive Maintenance : PM）の導入が検討されるが、点検補修や更新基準の策定を含め、管轄する自治体の設備管理体制に関わる負担が膨大なものとなる。同様に産業インフラとして急激な膨張を続けた石油化学や石油精製のプラント設備\*は、取り扱うものが危険性の高い物質である事から詳細な点検が法律により義務付けられ、その事により安全が担保されていると考えられてきた。しかしながら保安事故はたびたび発生しており、その都度法規制による強化が行われてきた。

欧米では事故はある確率で避けられないものと考え、定性・定量的なリスクアセスメント\*の実施を1980年代から規制に取り入れ、リスク低減による向上を図ってきている。日本での強制力を持たせたリスクアセスメントとしては、やっと2005年に高圧ガス保安法の認定事業者制度\*の中で、危険源の特定活動として要求された。この認定事業者制度では、策定した保安管理マニュアルに従いPDCA\*を回せる高いレベルの体制を要求している。設備管理の体制を含めたマネジメントに言及する数少ない規制と言える。中国や韓国を始め、新興国の技術を伴った発展でボーダーレスの競争環境と成り、六重苦\*とも言われる日



本の事業環境では、プラントにおける安定供給と低コストの実現は必須事項であり、高信頼性で、かつ低コストの矛盾の無い体制が要求される。また法の規制緩和の享受で競争優位に立つためにも、自主規制を徹底してコンプライアンス対応も万全を期す必要に迫られている。

近年発生した大企業の事故は、大型化、かつ複雑化し、社会に与える影響も甚大なものとなっており、事故災害を防止するマネジメントシステムが社会的にも要求されている。内閣官房の主導で、総務省消防庁、厚生労働省、経済産業省が参加した2014年5月の石油コンビナート等における災害防止対策検討関係省庁連絡会議の報告書によれば事故の要因は以下の3項である。

- (1) リスクアセスメントの内容・程度が不十分
- (2) 人材育成・技術伝承が不十分
- (3) 情報共有・伝達の不足や安全への取組の形骸化

その10年前に経済産業省の産業構造審議会保安分科会で作られた報告内容とほとんど同じであり、設備管理においては永続的に取り組んで行かなければならない課題と言える。取り扱う物質や流体、選択された製造プロセスの技術や設備、働く人の技能や技術、会社の歴史や風土（組織や管理）、世の中の要求や背景（規制や世論、経営環境）、さらには適用できる診断技術など与えられた条件下で、限りあるリソースを有効にマネジメントする方法が要求される所以となっている。

設備管理は、人が計画し、実行し、評価し、改善を図っていく自動化の困難な分野であり、改善の徹底・継続が難しく、結果を見るには長期に亘る時間を必要とする。要求事項も時代の背景から時々刻々変化するので、効果の判定もなかなか難しい。これまで設備管理が、論理的に体系化されてこなかったのは致し方無い面がある。それでも日本の改善を中心としたものづくりの中での設備管理の技術は、世界の中でもトップレベルであり、高いアドバンテージを持っている。政府も社会インフラとそのメンテナンス技術をセットにした輸出強化を目論んでいる。

一方、業種・業態という観点からの設備管理業務は、マスケミと呼ばれる大規模で多種多様な設備を持っている石油化学や石油精製、化学工業等で必須の設備管理というマネジメントを実行することであり、ある意味ニッチな業種である。小規模になれば運転や保全を一緒に行う方が合理的で、壊れれば修繕工事を自ら実施するのも当然である。維持向上を図るための技術や管理が重要であることが分かっているにもかかわらず、コストをかけることができずレベル向上まで図れないのが実情である。現在、O&M (Operation and Maintenance) と言われる設備管理の受託業が成立し、ある程度成長できているのも、ボイラーや廃水処理設備、ユーティリティ設備\*の運転、整備等のいわゆるノンコアと呼ばれる部分を引き受けているということ、さらには自前の修繕工を持って行っていた保全に対し、高いマネジメント技術を駆使してレベルの高い設備管理を提案できているからと考えられる<sup>1)</sup>。

保全という言葉の中には、経費コスト\*という考え方の後ろ向きの響きが潜んでいて、利益を創出する企業精神との間に矛盾が生じる。経営層への必要性の論理的な説明責任が十分に果たせていないこと、設備の延命や性能の改善を図る経費的投資\*という概念が不足していることに原因があると推測できるが、この業種が論理的に体系化されていないことが大きな要因に成っている。そもそも建設時に良いものを作ろうとしても失敗があり、リスクを取って省いた事項や設計時には許容できた不具合を抱えて経年している設備の実態がある。さらにそれらが経年の中で伝承されておらずリスクの発現に繋がっている場合もある。信用できない前提で作ったときの不備をどう担保するかなど、それらすべてを背

負っているのが設備管理であり、そこにマネジメントの難しさがある。近年の不備防止策として、設計時のデザインレビュー\* (DR : Design Review)、施工時の検収\*、運転時の4M (Man、Machine、Method、Material) 変更管理\*が当たり前のように行われているが、不足していた時代の改造・補修に対する経年に関わる不備への対応をどのように評価、抽出して安全の担保を取るかが喫緊の課題の一つとなっている。

### 1.1.2 設備管理の技術背景

設備管理に関連した個別の技術や活動についての著書や論文<sup>[6]・[12]</sup>はこれまでも多数発行されているが、最適な設備管理を目指す体系的に整理されたものは見当たらない。本論文の必然性を設備管理の技術背景となる主要な項目の著作物から設備管理の現状を概観して示す。

2014年に設備管理の国際標準として始めて ISO 55001 (Asset Management-Management System) <sup>[13]</sup>が発行されている。PDCA サイクルで、コストとリスク、パフォーマンスを保ちながら継続的に改善する仕組み作りの標準ではあるが、Management System の要件の規定に過ぎない。米国では戦時のレーダーシステムの故障多発から統計的確率に基づく科学的な管理の研究が進み、信頼性工学として構築され生産管理に適用されるに至っている<sup>[14]・[15]</sup>。現在の設備管理には欠かせない定量的評価に適用される重要な管理技術であるが、設備管理の中で必須の個別の管理技術である。個別の保全方式\*では、航空機のメンテナンスにおける保全技術の体系である Reliability Centered Maintenance (RCM: 信頼性中心保全) <sup>[16]・[17]</sup>が 1961年に提案された。機能展開から部品レベルで重大事故の可能性を検討し、故障の発見がし易い保全方式を設定する手法である。その後戦闘機への適用や原子力発電所の分野にも適用が検討されている。手間はかかるが根拠のある保全方式の設定ができるので、設備管理のレベル向上のために導入すべきだが、保全方式の内の1手法である。石油精製や石油化学の分野では 1980年代に頻発した事故を受け、リスクアセスメントの実施要求に合わせるべく Risk Based Inspection (RBI: リスク基準検査) <sup>[18]</sup>のガイドラインが 1991年に発表された。その後メンテナンス計画全般への手法として、Risk Based Maintenance (RBM: リスク基準保全) <sup>[19]</sup>が 1996年に提案されている。故障・破損の発生確率と起きた場合の被害の大きさの積をリスクと定義して、リスクの大きさによって許容範囲に入るよう検査を計画するのが RBI であり、補修、改造、更新などを含めたメンテナンス計画に適用するのが RBM である。事故防止が、設備管理の最重要事項となる産業において、リスクを定量的に評価し、そのリスクの大きさにより合理的に対応する RBM の考え方は大変有効であり、納得感の得られる手法である。ただ耐圧部に限られる適用範囲や精度、使い勝手など、まだまだ課題も多く残存しており、今後も開発進展の余地が大いにある保全方式の内の1手法である。

国内の著書では、1958年に予防保全や生産保全 (Productive Maintenance : PM) を説いた設備保全の組織的なマネジメントが分類され提示されている<sup>[20]</sup>。著者の中島清一は、その後も日本の設備保全のレベル向上に著しく貢献したが、時の変遷による環境の変化や技術の進展も著しく、著書は設備管理のマネジメントとしては不足している。1970年以降、日本プラントメンテナンス協会の主導で TPM 活動\*が普及していくのに伴い、生産保全を進めるための計画保全 (Planned Maintenance : PM) や保全効果の測定などを含めたマネジメントの手法が体系分類され解説書として多数出版されている<sup>[21]・[22]</sup>。多くは参考事例の位置づけで、設備管理の活動を論理的に体系化したアカデミックで再現性のある技術とは異なるが、導入したプラントの設備管理のレベル向上に大きく寄与している。近年要求されている経年劣化への対応や事故防止の観点からリスクアセスメントに関わる技術も不足

している。1992年に大島榮次は、設備管理の技術は体系化して工学的な見地で研究・教育を進めるべきと設備管理工学を提案している<sup>[23]</sup>。それまで各専門分野で個別に取り上げられていた技術の体系化に挑み、統計的確率に基づく信頼性工学や故障物理に基づく劣化とそれらの評価に必須の設備診断技術についても触れられている。ただ本著ではリスクアセスメントに関わる技術の不足も含め設備管理工学の体系化は未完である。

TPM や TPS（豊田生産方式：Toyota Production System）の活動の概念や実践手順の他、組立加工や機械加工の分野からも設備管理に関わる多くの成書が刊行されている。ただ設備管理の領域は多岐に及んでおり、かつ時間の経過で管理すべき設備もそれに関わる ICT\* 技術なども大きく変化しているので、設備管理工学として体系化して整理するのは極めて困難と言える。

## 1.2 本論文の概要

本研究では、大規模石油化学プラントにおける最適な設備管理を多目的最適化問題として捉えて論理的な解法のアプローチ法を定式化し、その適用で標準化した技術を示す。研究の対象をハードの設備で構成されるプラントとし、成立する解法に法的制約の条件で以下の2項のアプローチ法を提案している。

- (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

法的制約に依存しない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法は、リスクアセスメントを基にした優先度設定で、設備管理の計画から実行の標準化と定量化を図って最適な設備管理の技術を目指す。法的制約を前提とした解法であるプラントの長期連続運転の実現では、設備の信頼性の向上を図っていき最適な設備管理を達成する論理的な技術の体系化の研究について論じる。具体的には筆者が実践してきた設備管理のレベル向上の技術の体系化に挑み、実際に適用され成果を上げた標準化した技術を検証して成果と課題を明らかにする。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、課題から研究の必要性を示す。社会や産業インフラが50年を迎え社会的にも事故防止のマネジメントシステムが要求される中で、限りあるリソースを有効にマネジメントして主に設備の信頼性の確保と設備管理コストの最適化を目指す設備管理が必須となっている。行政の事故報告ではリスクアセスメントや人材育成・技術伝承、風化防止が課題と指摘している。設備管理は世の中の様々な要求に対して最適化を目指すマネジメントと言える。一方で設備管理は人系の自動化が難しい分野で、かつ世の中の要求も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。ただ日本のものづくりの中で設備管理の技術は世界でも誇れるレベルにあり、この最適化を目指すマネジメントを標準化し利用できる技術にすることが求められている。本論文では、主に人系のソフト面を今後の研究課題とし、ハード面のプラントの最適な設備管理を目指す技術を対象として、2項のアプローチ法を提案した。論理的なアプローチ法の定式化とそれを基に標準化した技術の適用の検証で成果と課題を明らかにする本研究が必然である旨を述べる。

第2章においては、研究の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法を論理的、体系的に定式化して述べる。

設備の信頼性と設備管理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設備管理の優先度設定」の技術について

論じる。設備管理の計画設定において、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、評価した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技術が多数の関係者による合理的な意思決定手段としても有効である旨を示す。例えば修繕費の優先度設定では従業員4万人超の事例企業で20年以上5万件超/年のリスク評価に適用されている。

法的制約を前提としたプラントの長期連続運転の実現では、筆者が実践してきた「5ステップの設備管理で設備の信頼性の向上」を図り、法による認定事業者制度の審査を経て長期連続運転を実現する。結果、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する。適用した設備管理のレベル向上の技術の論理的な体系化に挑み、標準化した技術の適用を検証して成果と課題を明らかにする。5ステップの設備管理は以下のように体系化する。

- (1) 業務分掌\*による役割分担から知識や経験の維持と向上を図る体制の構築
- (2) 異常兆候の早期発見による安定運転の確保で設備の寿命を発揮させる
- (3) 顕在化した故障の結果系から取り組むトラブル\*の再発防止による信頼性の向上
- (4) 阻害要因の腐食、磨耗、汚れ、閉塞、振動、疲労、経年劣化の原因系から取り組む安定連続運転への対応
- (5) 網羅的な劣化モードの抽出で、寿命予測を基にした筆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

設備管理シートは、管理の対象部位ごとの形状や材質と阻害要因となりえる接触流体の微量成分までの組み合わせで、発生する可能性のある劣化モードを抜けなく抽出して設備管理手法を設定するシートで、現在では装置産業における設備管理のツールとして浸透している。劣化メカニズムを明確にして適切な検査や寿命予測の採用とその評価で措置を含め供用期間の運転に問題の無いことを検証する。設備管理の計画の根拠となり技術伝承のツールにも適用できるので、戦後の経済発展とともに成長した団塊の世代\*の引退に伴う課題<sup>[24]</sup>の対応策でもある<sup>[25],[26]</sup>。

第3章では、第2章で述べた2項の定式化したアプローチ法を適用して標準化した技術を示す。設備管理の大きな課題となっているプラント設備の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、工業用水熱交換器の標準化した技術を検証してその効果も述べる。設備の信頼性向上と設備管理コスト低減の最適化の技術では、工場設備、塗装、配管管理、外面腐食を述べるが、いずれの技術も同時に信頼性の向上も織り込んで長期連続運転の実現に寄与させており、それらも加えて説明する。長期連続運転を実現する信頼性向上の技術では、ステンレス製機器、工業用水熱交換器を説明する。さらに設備管理活動のソフト面の影響を測定し制御するためのパフォーマンスを指標により評価する技術について述べる。

経年化による劣化の管理では、設備の劣化を基点とした管理の方法について述べ、要求される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設備の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技術を示す。

劣化管理の手法には、個別で行う通常の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を合理的な劣化の評価による優先度設定で最適化する技術を示す。事例事業所の塗装の劣化維持費は約3億円を要していたが、適用後は1/3以下に低減した。

配管の劣化管理では、広範囲で複雑に敷設され膨大な配慮すべき部位や部品を有し、経年化に伴い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で、PDCA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る。事例企業での管理強化の効果は、従前の生

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は従前が 25~30%、3 年目には 13%になり占める割合も半減している。

経年劣化の代表とも言える外面腐食の劣化の管理では、特に外観では検知不可な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り、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の設定を適用する。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\*で予測式を策定し寿命予測する方法に移行した技術についても述べる。

炭素鋼の外面腐食は厚みを減少させるがステンレス鋼の SUS304 では割れを引き起こす。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割れの原因となる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 J/cm 以下に抑える補修法により、更新費用数千万円/基の延命が可能となった。

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の最適化に多変量解析を適用する標準化した技術を示す。プラントで多数使用されている工業用水熱交換器の日常管理の雑多なデータや維持管理のために行っている設備管理のデータを使用して、結果系からの取り組みで設備管理と水処理の最適条件を求める技術である。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約 7 億が 5.5 億になり 20%以上を低減した。

パフォーマンスの維持・向上を図るソフト面があり、その影響を測定し制御する技術として、設備管理のパフォーマンスに要求される定量的な指標の定義とその評価によるマネージメントシステムを提示する。特性要因図で指標と成り得る項目を大中小の 3 階層で整理し、設備管理コスト、設備の信頼性、設備管理方針、設備管理組織、文書規定、企業風土の 6 大項目を得た。指標となる小項目は、分数で数値化できる指標とし、分子は実施した数で、分母は対象となる数とした。設備管理活動の数値化した目標の設定や比較を容易にする技術を説明する。

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の結論を述べる。設備管理は多数の個別の技術を駆使して、時の社会の要求に応じた最適化を目指すマネージメントである。現在、競争下にあるプラントの設備が経年化して劣化の発現リスクが増大しており、設備の信頼性の確保と設備管理コストの低減を満足させる技術が求められている。最大の課題は、これまで論理的なある体系化された最適な設備管理を目指す技術が論じられて来なかったことである。本論文では、最適な設備管理を目指す技術として 2 項のアプローチ法を定式化して提案した。ただし解法が成立するハード面のプラントの最適な設備管理を目指す技術を主な対象とし、設備管理を実行する人系のパフォーマンスを維持・向上させるソフト面は測定し制御するためのパフォーマンスの指標を除いて今後の研究課題としている。定式化した 2 項のアプローチ法は、リスクアセスメントを基にした設備管理の優先度設定で合理的な解を得る「設備の信頼性と設備管理コストの妥協点の探索」と、5 ステップの設備管理で設備の信頼性の向上を図っていき最適化を達成する「プラントの長期連続運転の実現」である。筆者が考案し実践してきた 2 項のアプローチ法による設備管理のレベル向上の施策の論理的な技術の体系化と、標準化した技術の適用の検証で可能となった成果と今後の課題を整理する。

設備管理の活動において限られた資源の中で優先度を設定して、主に信頼度とコストの最適化を図る標準化された技術はこれまでなかった。本研究では様々な設備管理の活動に概念としての信頼度と影響度を当て嵌めて、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した技術を提案している。さらに日本の石油化学プラントが存続するための必須条件として規制緩和の享受による長期連続運転の達成による最適化がある。資格要件は示されているが、そこに至る道程は企業側に委ねられ標準化された技術はない。そこで段階的に信頼性を向上する5ステップの設備管理を提案している。例えば設備管理シートを使って長期連続運転に問題の無いことを検証する仕組みの構築や外面腐食の検査すべき対象の設定方法、腐食のメカニズムから要因を抽出してデータ収集を行い評価項目と評価点を設定して総和で優先度を設定する仕組みの構築などがある。本研究では定式化された2つの技術を基に標準化した技術を実際に適用し、結果の検証で効果や課題を明確にすることも範疇としている。設備管理の有限リソースを何に投入して最適化を図るのかは、プラント毎に、また時系列でも異なるが、2つの技術を基に具体的な標準化した技術の提示で、各々に該当する必要な技術が適用できる。今後の最適な設備管理に寄与することができればそれに勝ることはなく、変化する時代と世の中の要求に臨機応変に柔軟に対応できる最適な設備管理を目指す技術としての妥当性について議論させて戴ければ幸甚である。

## 第2章 最適な設備管理の定式化

第2章においては、研究の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、多目的最適化問題の解法であるアプローチ法を論理的、体系的に定式化して述べる。アプローチ法は、リスクアセスメントを基にした設備管理の優先度設定で最適化の合理的な解を得る「設備の信頼性と設備管理コストの妥協点の探索」、と段階的な5ステップの設備管理で設備の信頼性の向上を図っていき最適化を達成する「プラントの長期連続運転の実現」である。

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設備管理の計画から実行の標準化と定量化で、論理的な最適化の技術を目指す。設備管理の計画設定において、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となる最適化の解の探索は難しいが、評価した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。実際に適用している設備管理の優先度設定の標準化した技術を基に、有限リソースで効果的な計画を実現する多数の関係者による合理的な意思決定手段としての評価を示す。

プラントの長期連続運転の実現では、段階的な5ステップの設備管理で設備の信頼性の向上を図っていき、長期連続運転の実現で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する。筆者が実践してきた設備管理のレベル向上の施策の体系化を表2.1に示す<sup>[1]-[3],[27]-[32]</sup>。実際に適用され成果を上げた標準化した技術を検証して成果と課題を明らかにする。ここで長期連続運転とは、長期安全安定操業を可能とする設備管理への到達を意味しており、以降は長期安全安定操業と記述する。到達するには筆者考案の設備管理シートのような網羅性を担保するツールが必要となる。

表 2.1 設備管理の進化の5ステップ

進化のステップ	内 容
ステップ 1 設備管理の体制の構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設備管理の方針の設定、基準の体系化</li> <li>・業務分掌*の制定（運転・設備管理部門の担当業務）</li> </ul>
ステップ 2 安定運転の確保	<ul style="list-style-type: none"> <li>・異常の兆候の早期発見のための検査の体制の明確化（パトロールと検査、感性向上）</li> <li>・保全方針の決定から改善の仕組みの構築（リスクに応じた保全方針による一律のやり方）</li> <li>・開放検査周期の設定方法の明確化（プラント個別基準で充実）</li> </ul>
ステップ 3(結果系) 信頼性向上への 取り組み	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設備トラブル再発防止体制の構築（原因究明の徹底、トラブルフォロー、水平展開）</li> <li>・工事管理、協力会社管理の体制の明確化</li> </ul>
ステップ 4(原因系) 安定連続運転への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・阻害要因の把握と措置の対応</li> </ul>
ステップ 5(網羅性) 長期安全安定操業 の確保	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検査手法・寿命予測への体系的な取り組み</li> <li>・運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理の対応</li> <li>・部位ごとの体系的な検証と設備管理レベル向上への取り組み</li> </ul>

## 2.1 石油化学工業の概観<sup>[33]</sup>

### 1) 発展<sup>[27],[28]</sup>

化学工業は、バッチ運転\*主体の小規模多品種型から連続運転主体の大規模少品種型のプラントまで、範囲が非常に広いが、ここでは大規模連続運転型の石油化学工業を中心に述べる。1955年頃に始まった高度経済成長を背景に、石油化学工業も鉄鋼業、石油精製と並び、スクラップアンドビルドを繰り返した。そのため設備の劣化が進行しない内に新しい設備に更新され、設備診断に対する要求もそれほど強くは無かった。1965年頃以降の後半期には、石油化学プラントは大量拡販によるメリット追求のため大型化を進め、その生産規模を極端に拡大していった。結果、高压ガスの可燃性流体などの取り扱い危険物の量が急増し、万一事故が発生した際の社会に及ぼす危険性が著しく増大した。1973年に国内化学工場での事故が続発し、1975年に石油コンビナート等災害防止法によって法規制が強化されている。災害から国民の生命、身体および財産を保護する目的の法律として消防法が1948年、高压ガス取締法が1951年に制定されている。1973年の第4次中東戦争による第1次オイルショック、さらに1979年のイラン革命を発端とする第2次オイル危機を契機に省資源、省エネルギーが盛んに叫ばれたが、設備過剰、過当競争を背景に各石油化学プラントはその稼働率を下げざるを得ず、低操業下での品質維持、コスト低減が重要課題と成っていった。一方、大型化したプラントにおいて自動化による省力化、合理化が進められ、プロセスコンピュータ\*・分散型制御システム(DCS\* ; Distributed Control System)を利用した自動制御技術、プロセス制御システムは石油化学プラントにおいて最も普及率が高く、今日ほぼ自動化が可能と成っている。こうして石油化学プラントは大型化、省力化、複雑化の進化を遂げるに至った。

### 2) 現況<sup>[25],[26]</sup>

昨今、規制緩和を始め産業構造が大きく変化し、化学業界も世界的ボーダーレスの競争下にある。設備管理においては、IoT\*を含むICTの発展を始め検査技術の著しい進展を背景に法的規制が緩和され、自己責任に基づく自主保安\*へと変わりつつある。このような中、収益性向上を目的に各社とも長期連続運転への移行に取り組んでおり、保安確保最優先の下、設備の健全性維持について高い信頼性の設備管理が求められている。さらに我が国の石油精製、石油化学の多くの大型プラントは、1960年から1970年代に建設され、運転開始から既に50年以上を経過している。従って経年劣化に対する異常の兆候の早期発見、余寿命予測、対策および故障解析等の設備診断技術を基にした適切な措置が不可欠と成ってきている。

### 3) 特徴

石油化学工業の特徴として、取扱物質そのものや操作の過程で、毒劇・高温・低温・高压・真空・重合・反応などのHazard\*が存在しており、Hazardを発現させる腐食・磨耗・閉塞・汚れ・振動・疲労・経年化などの阻害要因もあることからHazard発現の発生確率とその際の影響によるリスクが存在する<sup>[1]-[3],[31],[32],[34]-[38]</sup>。石油化学工業の設備管理は、火災・爆発の保安、火傷・薬傷・転落・墜落などの安全、漏洩・流出の環境、品質管理・品質保



証の品質、化学物質に関わる化学安全の化学品、生産損失や継続性の生産において、懸念となる事象があり、その発現による事故やトラブルを防止することが大きな目的となる。法による規制も高圧ガス保安法・消防法・コンビナート災害防止法をはじめ非常に多岐にわたり、適用法規への対応のための専任部署が必要となっている。プラントは、装置産業の代表であり、その構成要素は多岐にわたっている。圧縮機、ポンプ、ファン等の動装置類、塔、槽、熱交換器、加熱炉等の静装置類、それらを接続する配管類および電気・計装設備類から成る製造施設の他、原料・製品の貯蔵設備や入出荷設備、焼却炉等の廃棄物処理設備、用役設備等、種々の設備や部品から成っている。また取り扱い物質については、可燃性、毒性、腐食性流体等、危険物を含む様々な物質を、高温から超低温、超高压から真空、高流速から滞留の様々な操業条件下で、液、ガス、固体の様々な状態で、プロセス工程の反応、分解、吸収、沈降、分離、晶析等、各段階で変化させながら取り扱っている。従って同じ条件下にある石油化学プラントは皆無と言って良く、例えば、同じエチレンを製造する設備であっても、製造法が異なれば、構成要素の構造、材質、操業条件も異なり、設備の劣化の形態も異なっているのである。また経年劣化の主要項目である外面腐食は、断熱材下への雨水の侵入、大気中の硫化物や海塩粒子等の付着と装置の構造、運転温度の関係等、設備の設置されている環境により発生および進行速度が変わってくる。装置内部だけでなく、外部についても劣化の考慮が必要で、結局は、個々の設備の部品単位で、劣化の形態に応じた設備管理が必要と成っている。一方、生産技術については、高度制御等、定常運転時の最適化のみで無く、運転員の負荷の大きいプラントの停止・起動操作等、非定常時の支援システムも導入され、今や石油化学プラントの製品は原料供給から一定の運転条件下で製造される仕組みと成っている。運転員の役割は、装置の操業条件の監視と修正維持および異常発生時の安全確保が主体である。今後は、多くを人に頼っている異常の兆候の早期発見、判断、対応の設備診断の自動化を可能とする技術が望まれている。

#### 4) 設備管理への配慮

プラントでは多種多様のプロセスを構成要素で有機的に繋げて連続化しており、一部の故障や事故は他部に影響を与えるため故障や事故によるプラント全体の生産機会の損失は他業種に比較して甚大である。また取り扱う物質は特殊な物が多く、苛酷な条件下で取り扱われるため、設備の劣化に与える影響が大きい。万一、火災、漏洩等事故が発生すれば、その周辺地域環境への影響も甚大と成り、安全安定操業は、企業存続の基盤であると言える。従って設計から建設、試運転を経て実運転、保全計画、検査・工事、解析・評価に至る設備の一生を対象とした図 2.1 に示す設備管理フロー<sup>[1],[3],[31],[32],[35],[36],[38]</sup>の各ステップの中で、設備管理の PDCA (Plan、 Do、 Check、 Action) をきちっと回して知見の蓄積を図り、特に設備診断の検査データを活用して確実に対応していくことが重要である。設備管理の PDCA で蓄積している知見は、設計面では設計基準類の見直しや MP (Maintenance Prevention) 情報\*として活用し、運転面では運転管理方法や日常点検方法の見直しに、保全面では保全基準類・保全計画・検査方法・設備管理方法の見直しに活用する。

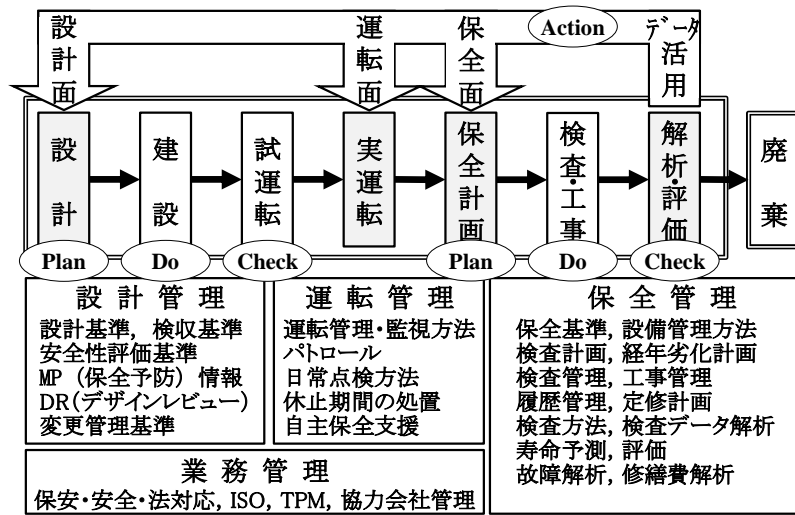


図 2.1 設備管理のフロー

## 2.2 リスクアセスメントを基にした効果的な計画<sup>[31],[39],[40]</sup>

世の中は今まさにリスクマネジメントの時代で、中国・ロシア・韓国・北朝鮮など日本の地政学リスクや中東問題に関わるテロのリスク、経済がグローバル化する中で原油価格や株式相場、為替相場などの経済的変動リスク、阪神大震災や東日本大震災などの地震災害のリスク、倫理法令遵守違反の企業不祥事などのコンプライアンスのリスク等、多様なリスクが論じられ、その範囲は個人のライフスタイルから政府の政策にまで及んでいる。また、リスクの定義も受け手によって違った解釈となり、定義した事象の単なる確率、例えば、交通事故による死亡率もリスクと言えるが、その結果としての財産や金銭での損失の大小をリスクと論じるケースもある。ここでは石油化学工業に存在する Hazard の発現による事故やトラブルのリスクを低減させる設備管理の分野におけるリスクマネジメントについて述べる。リスクマネジメントは、企業の活動・存在を危うくするリスクの実態、およびその影響を把握して、リスクによる企業価値の損失を避けるため、合理的で経済的な方法とコストでリスクを管理する経営管理手法であり、主としてリスクアセスメント\*とリスク対応とからなる<sup>[41]-[47]</sup>。図 2.2 のリスクの管理フロー<sup>[30]-[32],[38],[39]</sup>に示すように「新たなリスクの抽出」と「評価による対応策の立案」、そして「許容の可否」の繰り返りで、許容できなければ対応策の立案に戻ればよく、許容できれば新たなリスクの抽出に戻る

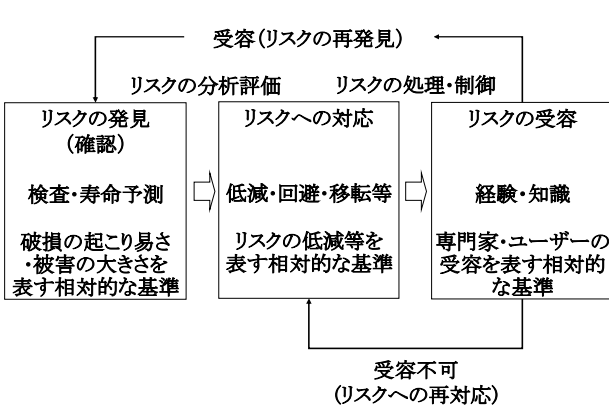


図2.2 リスクの管理フロー

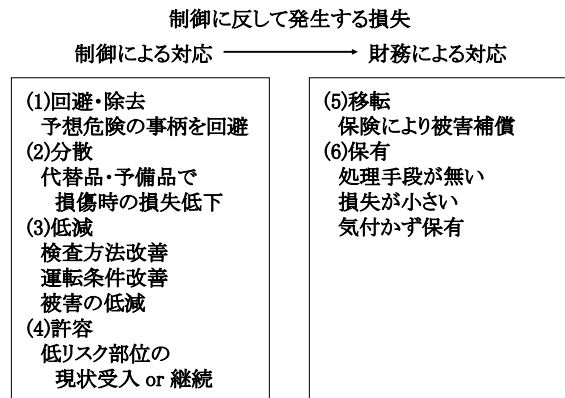


図2.3 リスクへの対応

[41],[44]。リスクへの対応は図 2.3<sup>[48]-[53]</sup>に示すように回避、除去、分散、低減、許容の制御による対応と制御に反して損害が発生した際の財務による移転、保有の7つの対応があるが、リスクの抽出がやっかいなのである。抽出にはリスクのシナリオ作りがポイントであり、熱安定性による暴走反応やMSDS\*に基づく評価、安全システムの考え方など、安全工学の専門家の参加が必要な場合がある。リスクの抽出やアセスメントの場において、プロセスエンジニアや計装システムエンジニア、機械エンジニアとともに参画する中で、役割分担による取り進めが適切と考えられる。安全工学の専門家は、取り扱う物質やプロセスに応じた知見が必要となり、企業自ら教育育成していく必要がある<sup>[54]-[56]</sup>。

最近、日本を代表する大企業で事業存続に影響する大事故が頻発しており、これまでの安全管理の不備が指摘されている<sup>[1],[2],[31],[32],[34]-[38],[57],[58]</sup>。だが大事故の頻発は最近に限ったことではなく、特に戦後の成長期の製造業では、技術の進歩に合せた大型化、複雑化に伴い、社会に影響する事故も発生していた。大規模の事故が発生すると災害から国民の生命、身体、財産の保護を求める世論の要求に、政府機関は、法規制の強化を繰り返してきた。1948年には、消防法、1951年には、高圧ガス取締法、1975年には、石油コンビナート等災害防止法が制定され、技術担保となる詳細な検査を要求している。いつのまにか事故を発生させない規制を基に、規制を満足しておれば事故は起きないという安全神話が形成されたが、その論理は成立しない。社会は常に利便性を求め、新しい技術を生み出すが、それに伴う想定外の危険性も並存する。結局、規制が過多となり規制側による安全徹底が困難になるので、産業界自らが自主的かつ継続的に安全性の向上に取り組むことが有効な対策と成る。事故の発生に関し不足している点は、リスクアセスメントの深化に尽きるのでは無いかと考えられる<sup>[1],[2],[31],[32],[34]-[38]</sup>。国際的な動向は、人はミスを犯す可能性がある事を前提に、危険源を洗い出してリスク評価から妥当な許容レベルへの対応を取るリスクアセスメントの実施要求と説明責任を伴う自主的なリスク低減による安全確保である<sup>[42],[59]</sup>。欧米では、伊国セブソでの大事故を受け1980年代から取り組んでいる<sup>[1]-[3],[31],[34],[38]</sup>が、日本では規制強化による絶対安全を目指し、なかなか浸透していない。福島原発事故を契機に、確率論的リスク評価(PRA\*)の手法<sup>[60]</sup>に取り組むプロジェクトの発足等、気運は高まりつつある。定量的リスクの算定には、発生確率のデータが必要であり、設備の状態を把握し評価する事が前提となり、有害な欠陥を的確に抽出する検査技術と評価する診断技術が求められる<sup>[61]</sup>。

安全と危険の境界は、曖昧で、危険でない所が安全であり、安全でない所が危険ということになる。安全な所などこの世に存在しないという考え方もある。安全は、常に意識している状態であり、危険は無意識の状態であるという言葉もある<sup>[56]</sup>。そこにリスクという概念を持ち込むと数値化ができ、許容リスクについて数字で話ができるようになる。即ち、交通事故で死ぬ確率程度<sup>[62]</sup>であれば許容するが、それ以下は許容できないなどという判断基準が可能と成る。1991年にリスク基準の検査計画法(RBI)の指針が米国機械学会(ASME)から発表<sup>[18]</sup>され、1996年には石油産業の設備を対象に米国石油協会(API)がdraft版<sup>[19]</sup>を提案している。リスクの定義を破損の起こり易さ×被害の大きさとして、事故防止の観点からリスクの大きさを検査の実施を判断する方法である。RBIの適用で保全コストや保全機会の削減など大きな効果が報告<sup>[44]</sup>され、その有効性からRBIに関する研究<sup>[63]-[75]</sup>も進み何度か改訂<sup>[64],[67],[74]</sup>されている。欧州でも規格化が進みリスク基準のメンテナンス(RBM)<sup>[63],[65],[68],[70]-[72],[75]-[78]</sup>に発展している。

経営戦略に連鎖した設備管理の戦略では、収益性の向上の他、世の中の要求事項として社会的責任が厳しく問われており、法令遵守のコンプライアンスを含むコーポレートガバナンスを重視せざるを得ない。特にリスクマネージメントは、収益性に大きく影響するこ

とから、設備管理戦略への織り込みが必須となっている。筆者自身が考案し実践してきた最適な設備管理のアプローチ法であるリスクアセスメントを基にした優先度設定について、事例を基にその要領と成果を述べる。

### 2.2.1 リスク評価による修繕費の優先度設定<sup>[25],[26],[28],[30],[39],[40]</sup>

保安、安全面からのリスクを基準とした検査の考え方である **RBI** のガイドラインが **ASME<sup>[18]</sup>**、**API<sup>[19]</sup>**で発行されて以降、欧米ではメンテナンスに適用すべく規格・基準の整備が進められてきた<sup>[71],[72]</sup>。ここでリスクとは「故障、破損の起こり易さ」と「起きた場合の被害の大きさ」の積として定義される。その考え方を図 2.4<sup>[3],[31],[32],[34],[38],[61]</sup>に示すが、破損の起こり易さと被害の大きさによるマトリクスから「許容可能」、「条件付許容できる領域」、「計画変更が必要な領域」、「許容不可の領域」にリスクランキングを行う。許容不可や計画変更が必要な領域にあれば、縦軸の低減、すなわち効果的な検査や保全の実施による損傷発生抑制、および横軸の低減、すなわち被害規模の抑制のための予備品管理の改善や効果的な補修方法等、リスクのより低い領域に移行させる検討を行う。この際、リスクは劣化の進行など時間の経過とともに増大する可能性があり、リスクの時間変化を求めて計画する事が必要になる。リスクの低減を合理的に検討する手法として有効であるが、日本では詳細に定められた法規に従い検査の実施を行ってきたため感心が低かった。近年、自己責任に基づく自主保安\*の認定制度等の規制緩和が施行され、環境が欧米に近く成って来ており関心も高まっている。

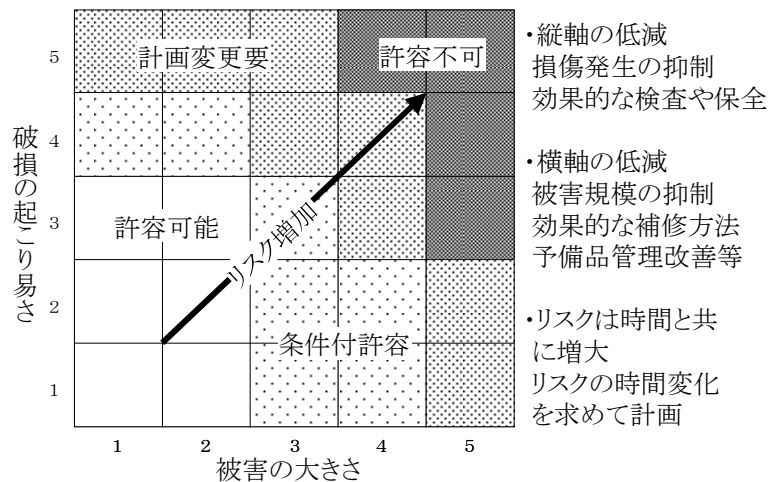


図2.4 リスクランキングの例

組織マネジメントの一つとして設備の優先度設定などによる意思決定システムが海外で研究<sup>[78]-[85]</sup>されているが、**RBM**もその対象となっている。それらに先んじて筆者の立案したリスク評価による修繕費の優先度設定のシステムがある。事例企業では1994年以降、検査や補修工事の優先度に基づく実施可否の決定にリスク評価を基にして取り組んできており、毎年の予算策定や経年劣化案件の計画策定などに適用している。その優先度設定のシステムの概要とイメージを図 2.5 と図 2.6 に示す<sup>[1]-[3],[25],[26],[30]-[32],[35]-[40],[86],[87]</sup>。

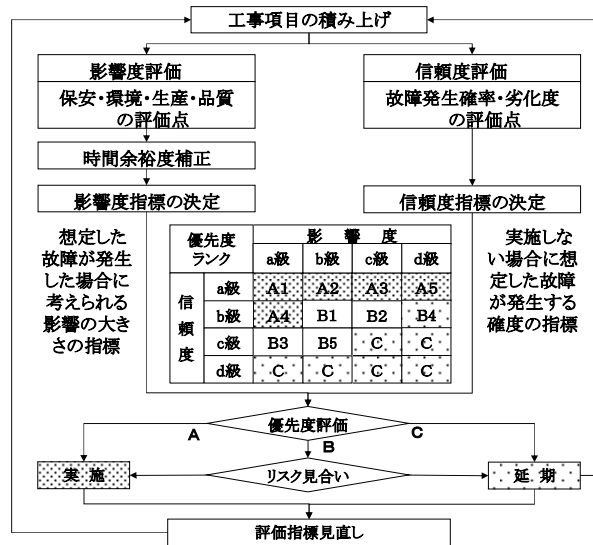


図2.5 リスク評価による優先度設定

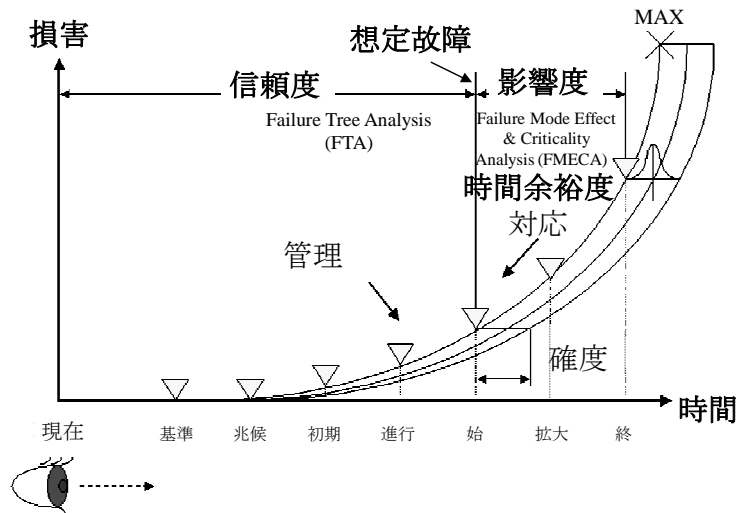


図2.6 リスク評価による優先度設定のイメージ

限られた資源の適正配分を行うために積み上げられた検査や補修、改造、更新の案件ごとに、実施しなければどの程度の発生確率で、どのような故障が発生するのかの想定を基にリスク評価を行い、よりリスクの大きい案件に重点化を図る。想定故障の発生までを信頼度として、設備管理部門が責任部署となり、劣化の程度などから故障発生確率を評価する。想定故障の発生を発見し適切な対応措置を行うまでを影響度として、運転管理部門が責任部署となり、保安・環境・生産・品質の面から考えられる影響の大きさを対応する時間の余裕度で補正して評価する。影響度と信頼度の指標からマトリクスで優先度を設定する。影響度と信頼度の指標は判断基準に基づき1～5点の評価点を付ける。影響度は企業規模に応じた金額を基本として、例えば $\geq 1$ 億円5点、 $\geq 0.5$ 億円4点、 $\geq 0.2$ 億円3点、 $\geq 0.03$ 億円2点、 $< 0.03$ 億円1点とし、時間的な余裕の程度で0.6～1の補正をかけて評価点とする。金額の他、環境では事業所外に流出5点、対外的影響4点、事業所内収拾3

点、プラント外2点、プラント内1点などもある。信頼度は故障発生確率であり統計学上の信頼度  $R(t) \geq 0.5$  で5点、 $\geq 0.25$  で4点、 $\geq 0.125$  で3点、 $\geq 0.083$  で2点、未満で1点のように数値も準備しているが、故障率のデータ蓄積が不十分なので定性的な判断基準を許容し、寿命予測も併用して年度内の発現は5点、発現しないは1点、その間を4~2点で評価する。次に $\geq 4.5$ 点がa級、 $\geq 3.5$ 点がb級、 $\geq 2.5$ 点がc級、未満がd級の指標となり、マトリクスに従いA1~Cの優先度が決定される。基本的にはAランクは実施、Cランクは延期とし、Bランクはリスク見合いで判断する。信頼度のa級は年度内に発現するので影響度に関わらず、すべて実施のAランクとなる。A1では1億以上の影響度で信頼度の発生確率も高いリスクの大きな案件となる。また発現の可能性のある信頼度のb級と影響度a級の組み合わせは実施すべき案件として優先度をA4としている。Bランクは予算に合わせて実施する案件の優先度で、Cランクは発現しない可能性が大きい延期する組み合わせの優先度である。評価は設備管理や運転管理部門の担当者が行い職制や事業所内の審査過程を経て最終的に経営層への説明が求められる。この時、QCD（Quality, Cost, Delivery：品質、コスト、納期）案件は、事業を司る事業部が責任部署として毎年の方針を出し、SE（Safety, Environment：安全、環境）案件は運転を司る事業所が責任部署として、毎年の方針に基づき評価の決定権を持つ。経営層や幹部が修繕費という経費的投資\*を決定するための説明を専門家に求めており、その必要性の説明責任を果たす手段としてリスクアセスメントが成立する。設備管理へのリスクアセスメントの適用の結果、事故防止に重要な役割を果たすリスク感性や現場力、保安力の向上に期待できる他、同じ尺度でのリスク管理が可能と成ったことで以下の効果が確認できた<sup>[25],[26],[28],[31],[32],[35]-[38],[40]</sup>。

#### (1) 有資源の修繕費の最適配分

運転・設備管理に携わる人の感覚的な判断から明確な手順と結果を表現する合理的な指標が得られ、横通しでの比較をもとに限られた資源の投資効果を高めることができた。

#### (2) リスクコミュニケーション

想定故障の発生確率を信頼性、発生からの影響拡大の程度を時間余裕度の補正とともに影響度として、運転・設備管理部門が一体で検討、事業所内、事業部、経営層でリスクを共有するコミュニケーションが取られている。

#### (3) シナリオトレーニング

毎年修繕費予算の策定の必須要件として、プラントごとに1,000件程度の検討を行うことでシナリオトレーニングが行われている。

#### (4) リスクの低減

許容可能なリスクまでの低減施策である損傷の発生抑制（信頼度の向上）や被害の拡大抑制（影響度の低減策）と許容不可の時期までの延期の検討が可能と成った。

#### (5) 技術力の向上

影響度と信頼度の発生確率の精度が論議され、想定故障の抽出のための検査手法や寿命予測による評価の技術向上につながり、同時にリスク低減の信頼性向上と影響度の低減の対応に必要な技術レベルの向上が図れる。

リスク評価は、修繕費の適正化に寄与するが、削減を目的にしたものでは無い。トラブル削減にも寄与はするが、限られた資源の有効な投資効果を得るための手法である。RBMは、過去の実績を基にした確率を使い、不必要な検査を削減する手法ではあるが、確率に

基づき保全を行う上では必ず確率上のはずれが生じる。たまたまそのはずれに当たりましたでは済まないのが事故・トラブルであり、避けるには網羅的に劣化要因を抽出し確認することが必要となる。さらに40年以上を経過した高経年化を伴うプラント設備では、過去の実績を基にした確率では間に合わず、時間による補正が必要となる。実態にあった故障率\*を基にした定量的な信頼度の評価を可能とするため、多くの故障率データを収集し母集団の構築を進めている<sup>[88]</sup>。影響度は火災爆発による直接損失のほか、機会損失なども含めて金額による数値化が分かり易い。保険会社やダウ・ケミカル社（The Dow Chemical Company）の火災・爆発指数による危険度分類ガイド第7版（Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide 7th Edition）のように火災・爆発面積範囲の金額換算で定量性を持たせる手法も公表されている。影響度の最終責任は運転管理部門にて持つこととしているが、影響度の算定は定量化を図るべく単位時間当たりの工程ごとの停止損失額を定めて、停止、起動操作時間を運転管理部門が見積り、復旧までにかかる修理時間を設備管理部門が算出し、その合計時間に単位損失額を掛け算して評価するなど、機会損失や生産損失の簡易な換算方法を決めておいて、定量的な判断を可能としている。改善案件などの投資効果を考え配分を決定する手法としては、ROI（Return On Investment）\*や現在価値で実施の可否を決めるNPV（Net Present Value）\*が採用されている。現在の技術レベルでは、全ての案件を影響度と発生確率で定量化することは困難だが、データの蓄積、評価技術の進歩での可能性を示唆しており、安全操業の確保及びコストの最適化に有効である。さらにITの利用によるシステム化で技術伝承に役立っている。

事例企業の起点となる年の修繕費を100として、5年間の優先度ランクの分布を調査した結果を以下に示す。ただし各年度の分布は、各年度の修繕費を100として年度ごとの割合の推移を確認できるようにした。修繕費は認定事業者制度による定期修理の実施が重なった起点の年が最大となっており、優先度評価の推移は事業部責任のQCD案件を図2.7に示し、事業所責任のSE案件を図2.8に示す。SE案件における法定とは法規により実施が義務

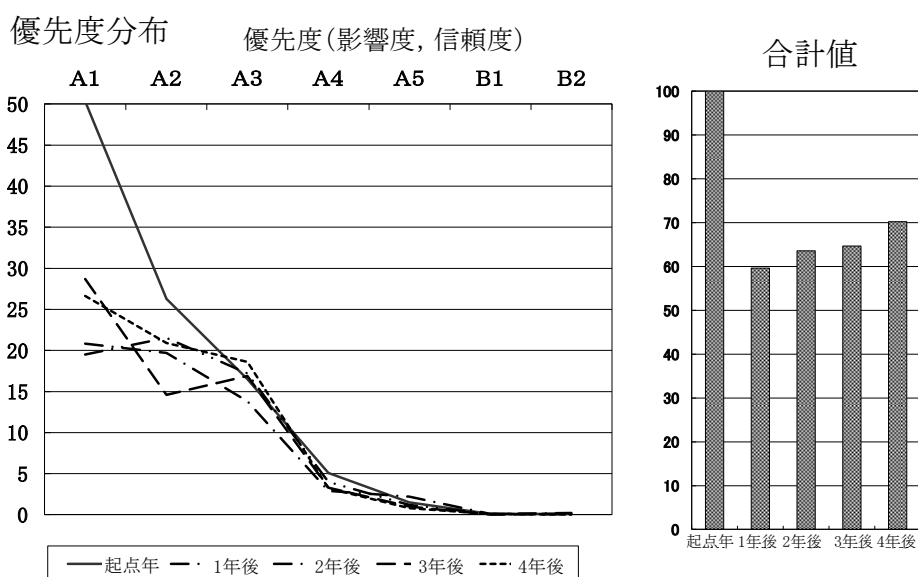


図2.7 優先度評価の推移(QCD案件)

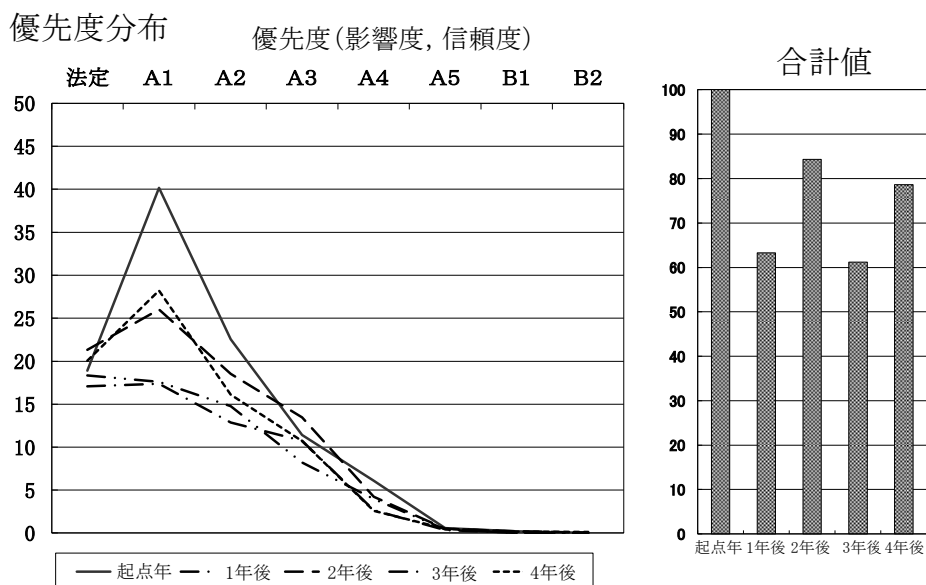


図2.8 優先度評価の推移(SE案件)

付けられている案件を示し、リスク評価ではA1ランクとなる案件である。各年度の総計に占める割合はQCD案件が4割、SE案件が6割でほぼ同じであった。起点の年度は認定事業者制度により、すべての設備を開放する12年に一度の当たり年となったために、A1ランクが非常に大きくなっているが、その他の年度は比較的似た分布となっている。SE案件の推移で定期修理実施の集中している年度と連続運転の集中している年度で合計値に差が出ており、プラントが停止した際にしか実行できない案件はA1、A2ランク、さらには法定に集中することから若干階層が分かれている。事例企業の多くの関係者による評価の集合結果が似た結果となっていることや背景の要件が反映されていることから、集団としての合理的な意思決定ができていると判断できる。

## 2.2.2 リスク評価による設備管理の計画<sup>[32],[35]</sup>

リスク評価による設備管理の計画は、リスクを基にして設備管理の計画を行うシステムなのでRBM (Risk Based Maintenance) のシステムと言える。設備管理にRBMを適用する際の問題は、部位ごとの過去の実績による故障率を基に計画していることである。従ってある確率で発生するという問題がある。たまたま発生する時に当たっていたと言って、事故やトラブルの発生が許される訳では無い。寿命が来る前に正しく設備管理をすることで、トラブルを発生させない計画を立てる事が必要となる。すなわち信頼性を中心とした取り進めで、発生頻度と影響度でのリスク評価を実施する。この評価では、さらに信頼性を向上させる施策や影響度を下げる施策の検討を進めることができる。故障が発生した際の危険リスクに応じた保全方針に基づき、寿命支配要因ごとに具体的な保全区分を決定、運転実績を評価しながら見直して設備管理のレベルを向上していく事例を以下に述べる。

設備の危険リスクを 2.2.1 リスク評価による修繕費の優先度設定と同じ保安・環境・生



産・品質による影響度と故障の発生確率の信頼度から評価して得られた指標で、A～D級の等級分類を行い保全方針や保全区分を決定する。等級分類は開放検査周期の設定や日常の検査周期等の決定にも適用する。リスクの高い設備に高いレベルの管理、すなわち高いレベルの運転中と停止時の具体的な検査周期や検査方法を設定する。設備に起こり得る想定故障の設定は、通常考えられる故障の種類と程度として、過度に事故や重篤なトラブルを想起させる評価とはしていない。時間の経過で劣化も進行するので信頼度も変化する。また網羅性は未達成で、類似設備を含み重篤なトラブルの実績があれば展開事項として見直す。運転実績や開放検査の結果を踏まえての見直しもあり、保全等級や保全区分は、状況の変化に応じた適正化が図られる。

図 2.9 に保全等級の設定<sup>[31],[32],[35],[37],[38]</sup>、表 2.2 に保全等級決定のマトリクスを示す<sup>[27],[30]-[32],[35],[38],[39]</sup>。表 2.3<sup>[31],[32],[35]</sup>、表 2.4<sup>[32]</sup>に決定した保全等級に応じた設備に対する保全方針と保全区分について示す<sup>[27],[39]</sup>。A 級では故障に至るリスクを皆無にするため CBM、OCM を適用するが、B 級では最小限にするため有効であれば CBM、OCM の適用を考える位置づけとなっている。

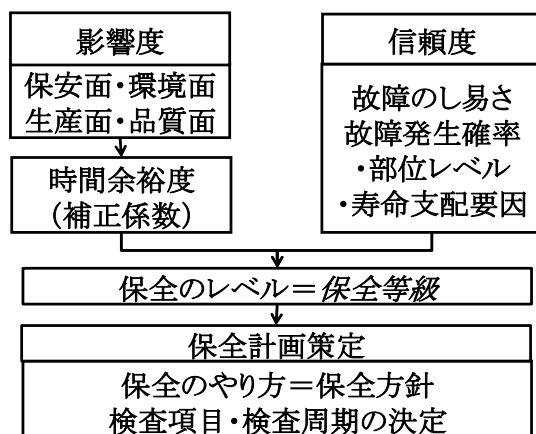


図2.9 保全等級の設定

表2.2 保全等級決定のマトリクス

保全等級		影響度			
		a級	b級	c級	d級
信頼度	a級	A級	A級	B級	B級
	b級	A級	B級	B級	C級
	c級	B級	C級	C級	D級
	d級	C級	C級	D級	D級

表2.3 保全方針・保全区分

保全等級	保全方針	保全区分
A 級	故障に至るリスクを皆無	CBM 状態基準保全 OCM 状態検査保全 TBM 時間基準保全
B 級	故障に至るリスクを最小限	CBM 状態基準保全 OCM 状態検査保全 TBM 時間基準保全
C 級	劣化傾向管理	TBM 時間基準保全 FFM 故障検出保全
D 級	事後保全とする	B M 事後保全

表2.4 保全区分の定義

状態基準保全 (CBM) Condition Based Maintenance	・設備の性能, 又は状態を常時監視, 又は頻繁な定期的監視で, 異常の兆候を早期発見して処置する保全。
状態検査保全 (OCM) On Condition Maintenance	・通常運転中, 又は待機状態で, 設備の故障徴候や性能低下などを定期的に検査, 又は機能試験などで確認し, 劣化損傷状態の進行をとらえ, 機能故障に至る前に処置する保全。
時間基準保全 (TBM) Time Based Maintenance	・設備の故障率を規定以内とするため, 故障確立が急激に高くなる手前で, 定期的に修理や清掃によって故障に対する抵抗力を初期の状態まで回復させる保全。
故障検出保全 (FFM) Failure Finding Maintenance	・直接的に設備, 又はプラントの機能に影響しない, 又は軽微な場合, 及びその他の予防保全が適用できない場合, 定期的に異常の兆候, 故障の兆候, 又は故障を検出し, 必要な処置を行う。
事後保全 (BM) Breakdown Maintenance	・影響を回避できる場合, 予防保全費より故障時にかかる費用が小さい場合, 故障の兆候, 又は異常の徴候, 又は故障を検地してから補修する。

図 2.10 に示す保全区分の設定<sup>[32],[35],[37],[38]</sup>では設備の保全等級に応じた出発点から開始し、寿命の支配要因ごとにフローで保全区分を確認する。以降フローは YES で下に、NO では横に、両横・分岐は双方へ進む。さらに YES で保全区分が設定されれば左の横も検討する。例えば A 級回転機の軸受であれば、CBM、OCM、TBM、FFM を適用する可能性がある。兆候検出対応可とは、異常の検出が可能で、兆候検出から故障まで規定時間以上有るか、または運転中に定期検査を実施可能で、劣化の進行を傾向管理等で予測が可能な場合をいう。予測は規定時間以上が可能か、予備機等代替機能が有るか、補修時間が取れる等、損失リスクを許容レベル内に抑える事が可能でなければならない。重合分離塔 T-1 の保全区分の設定事例を表 2.5<sup>[27],[31],[32],[35],[37],[39]</sup>に示す。保全等級の評価の根拠を記載しており、トレイの重合物閉塞による圧力上昇による毒性流体の大気放出を想定して、CBM はトレイの差圧の常時監視、OCM は重合物質の定期的なサンプル分析、TBM は定期的なトレイの掃除を示している。設定された保全区分により設備管理の計画を立案し、実施に際しては、リスク評価による修繕費の優先度設定で判断している。

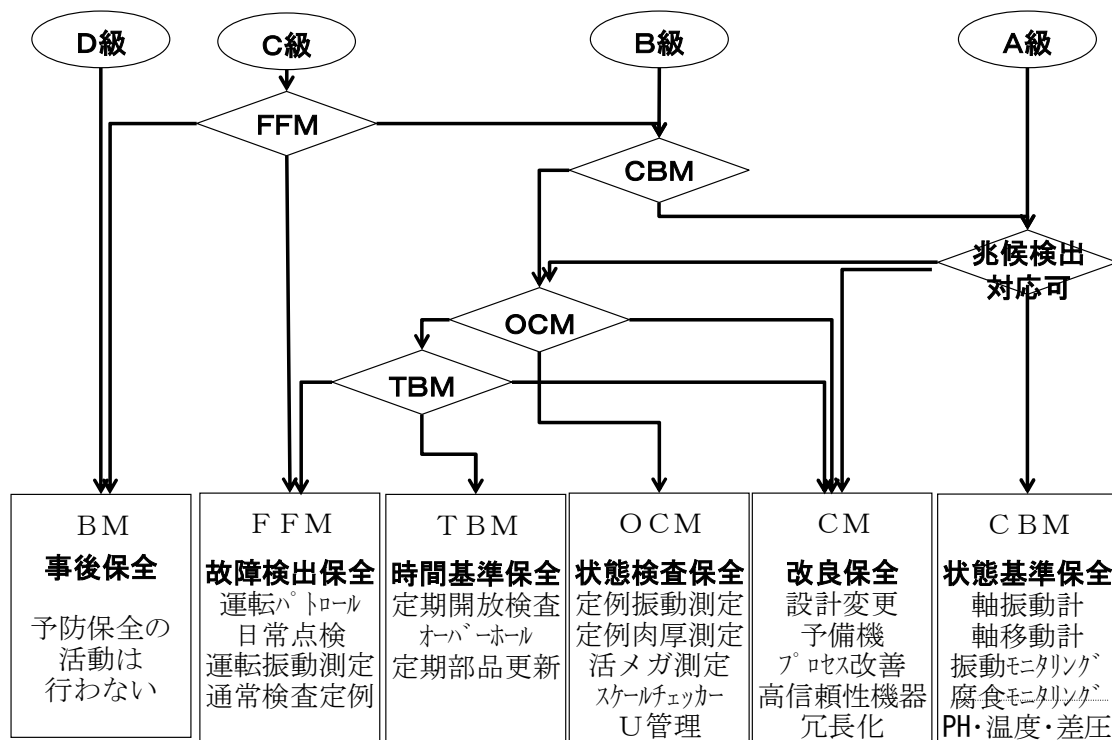


図2.10 保全区分の設定

表2.5 保全区分の設定事例

機番	機器名称	保 全 等 級										保 全 区 分						
		影 響 度 評 価					信 頼 度					総合 評価	BM	FFM	TBM	OCM	CM	CBM
		保安	環境	生産	品質	時間 余裕度	評価	故障発生 確率	評価	部位								
T-1	重合 分離塔	5	5	3	5	1	5(a)	5	5(a)	トレイ	A			トレイ	トレイ			トレイ
C-1	冷凍機	4	5	3	3	0.9	4.5(a)	4	4(b)	効 シール	A			効 シール	効 シール			効 シール
D-1	ドラム	4	5	3	1	0.9	4.5(a)	1	1(d)	フロート	C			フロート				
D-2	レーザー	4	5	1	1	0.9	4.5(a)	1	1(d)	胴、鏡	C			胴、鏡				

## 2.3 設備管理の体制の構築

段階的な5ステップの設備管理で設備の信頼性の向上を図っていき、外部による審査に合格することで合理的な信頼性の評価を得て長期安全安定操業が実現できる。その結果、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する。本稿以降で筆者が実践してきた段階的な5ステップの設備管理について述べる。

プラントの建設が完了し、試運転から操業運転の段階に入るといよいよ設備管理が始まる。設備管理は、設備の設計、建設、試運転、実運転、および廃棄に至る設備のライフサイクルを通じて、設備に要求される機能、信頼性、安全性、運転性、経済性等の維持、向上に係わる事項について、保安維持に最も適正な管理を行うことである。設備管理を取り進めるには、まず設備管理の方針策定と方針に基づく重点事項の設定を行う。最上位の規範となる変わらない理念、その理念に基づく長期的な取り組みの方針、方針に沿って行う業務の重点事項、重点事項に沿った具体的施策のように目標の連鎖を意識して設定する。設備管理の方針は、長期的な拠り所として活動の基本や根拠となるもので簡単には変わらない。方針に基づく重点事項は、目標を達成する中期的な期間、その具体的施策は短期的な期間で重点的に取り組む事項を設定する。設備管理の方針に沿い取り進める重点事項を定めた事例を表 2.6 に示す<sup>[39],[40],[48]-[50]</sup>。

表 2.6 設備管理の方針と重点事項の例

設備管理の方針
<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 超安定生産活動の一翼を担うために、設備の状態を正確に把握し、健全な状態に保つことにより、保安・安全の確保を図る。</li> <li>(2) 保全共通技術の高度化、汎用化を図るとともに、プラント固有の保全技術を特化させ、長期的な視野に立ち技術の向上、および技術の伝承を目指す。</li> </ul>
重点事項
<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 顕在化した故障、トラブルの原因の徹底究明と検討結果の水平展開、確実なフォローによる再発防止</li> <li>(2) 設備の検査、診断技術の活用により、潜在している設備の劣化情報の摘出と経年劣化兆候の早期把握によるトラブルの未然防止</li> <li>(3) 保全基準、設計基準、教育資料へのフィードバックによる技術伝承と教育の充実</li> <li>(4) 設計時の DR*、変更時の SA*、施工時の検収*、運転時の 4M 変更管理*によるヒューマンエラー防止</li> </ul>

運転とともに始まる設備管理は、運転管理と一体となって活動することが要求される。それ故に方針設定と業務分掌\*の制定などによる設備管理を実施する部門の担当業務と役割分担、責任範囲を明確にして安定した設備管理ができるようにする。次に得た知識や経験を落とし込む場所である基準の体系を構築する。各種法規の認定事業者制度\*の要求事項や ISO などの各種規格も満足する体系でなければならない。文書化された基準は先達の貴重

な知識や経験でできており、基準を勉強することで先達の擬似体験ができる。基準により知識や経験の維持と向上を図る仕組みで、設備が持つ寿命を発揮できるようにする。設備の寿命を全うさせる取り組みが運転安定化に欠かせない。図 2.11 の設備管理のフロー<sup>[1]-[3],[31],[32],[35],[36],[38]</sup> に示した設備の設計から廃棄に至るライフサイクルの中で設備管理に対する考え方が明確に定められ、図 2.12 の設備管理の技術基準体系<sup>[32],[38]</sup>のような体系化で知識や経験が蓄積され実践される仕組み作りをする<sup>[27]-[30],[39],[40]</sup>。表 2.7 に設備管理部門が行う業務について定めた設備管理の業務分掌の事例を示す。また検査を基点とした設備管理の業務について、計画・実施・寿命評価・記録と活用の一連の流れを図 2.13 に示す<sup>[32]</sup>。

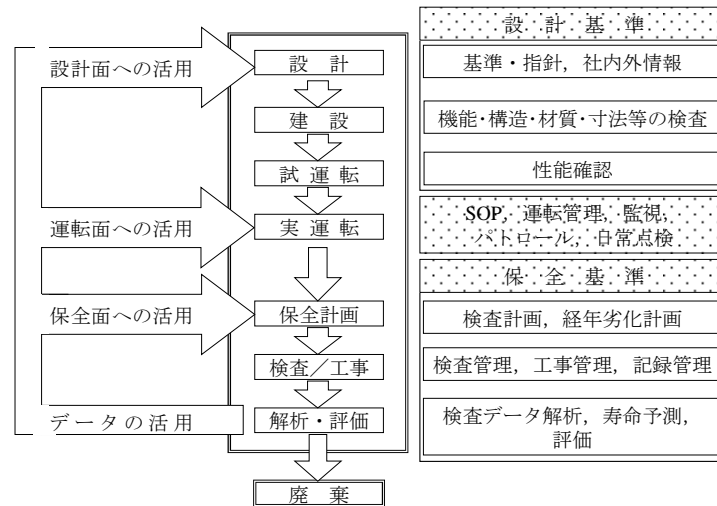


図 2.11 設備管理のフロー

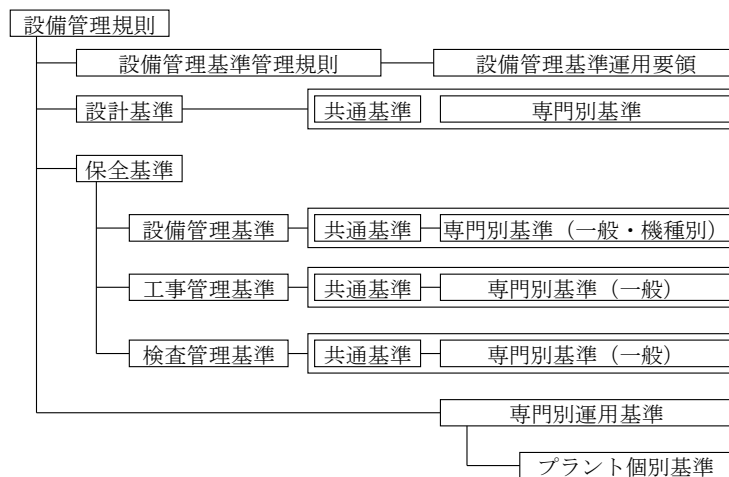


図2.12 設備管理の技術基準体系

表2.7 設備管理の業務分掌

大項目	中項目	内容
保全方針	方針作成	保全方針、年度重点事項、長期計画や経年劣化対応等、設備管理の方針案を策定
	具体策	運転管理計画や将来計画を併せた方針に基づき具体策への落とし込み
基準・技術	検討・作成	保全方針、運転実績の解析評価に基づく基準策定や技術検討の実施
	基準見直し	法規や世の中の要求、会社方針との整合性を確認し見直し修正
保全計画	計画策定	設備毎の詳細計画、劣化測定・修復・改善の計画策定
	立案決定	運転管理計画や将来計画を併せた操業度、生産計画等に基づき立案決定
保全予算	予算案策定	保全計画の決定立案に基づき予算案を策定
	予算検討	Risk評価(影響度・信頼度)、DR, SA, 仕様等の予算検討
	予実管理	社内予算手続き完了後の承認予算に基づく実務と予実管理
詳細計画	詳細作成	工事・安全の仕様、外注・購入対応、工程等、決定予算に基づく詳細計画作成
	見積業務	詳細計画に基づく自家作業、見積依頼、入札等の実施
	査定発注	見積内容の確認・評価・改善を技術面・コマーシャル面(調達)で査定後発注
工事管理	工事实施	見積仕様、規則に基づく安全・品質・コスト・技術・工程管理を準備調整から検収まで実施
	協力会社管理	工事实施に関わる管理の他、入場教育、技術の維持についても管理
検査業務	計画策定	保全方針に基づく設備毎の劣化測定のための検査計画を策定
	立案決定	運転管理計画や将来計画を併せた操業度、生産計画等に基づき立案決定
検収業務	検収実施	機械的性能面や構造面の設計に関わる検収、運転上の性能面は製造部門にて併せて判断
	解析・記録	工事/検査に伴うデータの解析と所定の書式や電子化等記録保存
指標評価	指標作成	設備管理指標(故障件数・コスト・停止時間・), 予算実績管理の状況等、指標となる項目を策定
	評価・改善	設備管理のPDCA・予算実績・改善・保全計画の進捗等、状況を評価改善し、定例報告
技術管理・向上	計画策定	保全方針に基づく技術管理・向上の施策について計画作成
	立案決定	運転管理計画や将来計画を併せた操業度、生産計画等に基づき立案決定

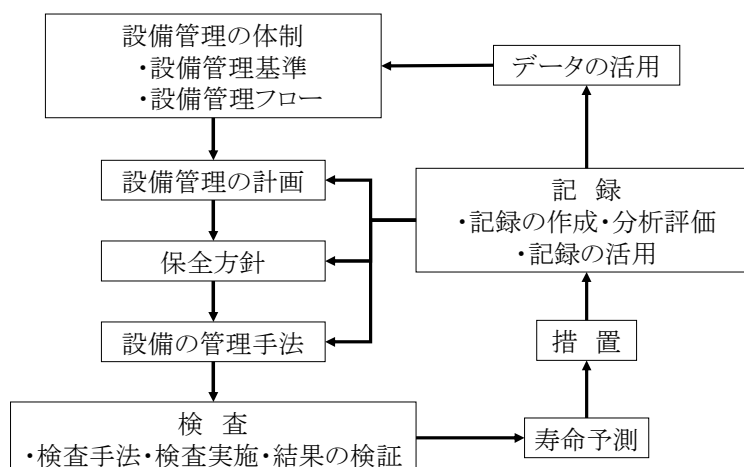


図2.13 設備管理の業務 (検査)

## 2.4 異常の兆候の早期発見による安定運転の確保

生産設備の大型化、高度化、複雑化により生産能力は飛躍的に高められたが、故障が発生すれば生産停止や環境への影響、設備の修復等、大きな損失を引き起こす可能性がある。40年以上を経過した設備もあり設計思想になかった想定外の損傷の可能性もある。そのため設備の異常の兆候を早期に発見し、寿命予測して補修機会までの担保が取れるよう対応することが必要である。プラントには反応器や熱交換器、塔槽類、配管などの静装置と、ポンプや送風機などの動装置があり、各々の損傷に適した検査技術が必要である。動装置の異常の兆候は、振動、油、音、電流等のパラメータによる状態監視により検知できる。振動による監視は現場においてよく用いられており、振動波形の実効値や平均値を測定し、その傾向により設備の異常の兆候を検知する<sup>[51],[52],[89]-[91]</sup>。異常の兆候を検知したら専門家が部位や損傷の程度を特定する。本稿で述べる点検とは五感中心の定性的な健全性のチェックで異常の有無を確認する行動をいう。検査は検査機器や専門家による欠陥の無い事を確認する行動で、欠陥などの異常が発見されればその程度や寿命予測、さらにそれらを基にした対応策の立案をする診断に移行する。

### 2.4.1 検査の区分と体制<sup>[29],[33]</sup>

検査は運転中に行う OSI (On Stream Inspection) として、運転管理部門による日常点検、設備管理部門による通常検査の定例検査、さらに対応決定のための臨時検査があり、停止状態で行う SDI (Shut Down Inspection) として、開放状態、または、非開放で行う定期検査に整理される。図 2.14 に設備の検査の区分と体制について示す<sup>[1]-[3],[31],[32],[34],[35],[38],[39],[86]</sup>。

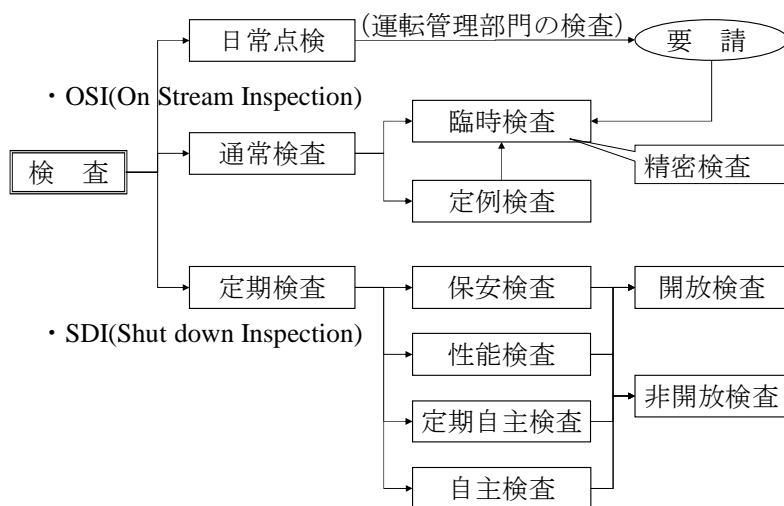


図2.14 検査の区分と体制

- (1) 日常点検は運転中に運転管理部門が設備の保安と安全を確保するために、五感、補助器具および必要に応じて計測器具を使用して日常行う点検をいう。
- (2) 通常検査は設備管理部門が設備の運転されている状態で、保安と安全の確保のため

機器の性能維持や、その傾向管理を目的として行う検査で五感、または各種検査機器を使用し定期的、計画的に行う定例検査と運転管理部門の日常点検、定例検査等の結果に応じ各種検査機器を使用し臨時に行う精密検査に分かれる。

- (3) 定期検査は設備管理部門および運転管理部門が1年に1回定期的に行う検査で、1年を越す長期連続運転プラント設備の運転中の検査、適用法規に拘わらず実施する自主検査も含める。
- (4) 保安検査は設備の保安と安全の維持向上のために行う高圧ガス保安法や消防法に基づく検査で、設備の耐圧性能、気密性能、その他保安および運転性能上、異常のないことを確認する。設備を開放して内部および外部の状況を検査する開放検査と設備の運転中、または、停止中、非開放状態で検査する非開放検査がある。さらに高圧ガス保安法に基づき経済産業大臣が認定した事業者が、都道府県知事に代わって認定を取得したプラントに於ける保安検査を実施する「認定保安検査」として、運転を停止して行う「認定停止中保安検査」と運転を停止することなく行う「認定運転中保安検査」がある。
- (5) 性能検査は労働安全衛生法および同法の各種規則に基づく検査で、安全性能、保安の維持を目的とした設備の耐圧性能、気密性能、その他保安および運転上、異常のないことを確認する。開放検査と労働基準監督署長の認定を取得したボイラー等については、運転を停止しないで冷却、清掃をしない状態で性能検査を受けることができる非開放検査の運転時検査がある。
- (6) 定期自主検査は法（高圧ガス保安法、労働安全衛生法および消防法等）に基づく保安、性能の維持を目的とした定期自主検査をいう。
- (7) 自主検査は法規に拘わらず保安、性能の維持を目的とした自主的に行う検査をいう。

#### 2.4.2 設備の保全方針の設定

安定運転を確保するために各設備の保全のやり方を決めて設備管理を行う。設備に故障が発生した際のリスクに応じた保全等級を設定し、保全等級の保全方針に基づき、寿命支配要因ごとに具体的な保全区分を決定する。運転実績を評価しながら見直してレベルを向上していく。運転実績の無い最初の段階では、一律的に点検周期や要領等の保全の遣り方を決める必要があるが、実績を評価して、その遣り方を修正する繰返しで最適へと収斂していく。設備のリスクに応じた保全等級は、開放検査周期の設定や日常の検査周期を決定する基準にも適用する<sup>[27],[29]</sup>。

プラントは、多数の構成要素から成っており、どの設備に故障が発生しても損失を生じるので、検査すべき設備はきわめて多数に成る。それら設備を効率的に検査するため簡易検査と精密検査に分けるのが合理的である。さらに設備に故障が生じた際のプラントに与える影響度と故障の発生のしやすさ・頻度等の信頼度から各設備をリスク評価し重要度分類して、その重要度ごとに定例的に行う簡易検査や精密検査の実施頻度を決定する手法が取られる。表2.8 に重要度分類、表2.9 に重要度分類に応じた通常検査周期の例<sup>[32]</sup>を示す。運転管理部門により行われる日常点検、設備管理部門によって行われる通常検査の定例検



査が簡易検査にあたるが、簡易検査の目的は異常の疑われる設備の抽出のために設備状態

表2.8 重要度分類

重要度		影響度			
		a 級	b 級	c 級	d 級
信頼度	a 級	A 級	A 級	B 級	B 級
	b 級	A 級	B 級	B 級	C 級
	c 級	B 級	C 級	C 級	D 級
	d 級	C 級	C 級	D 級	D 級

を迅速に概観するものである<sup>[33]</sup>。

### 2.4.3 開放検査周期の設定方法

開放検査周期の設定方法を図 2.15 開放検査の設定フロー<sup>[27],[39]</sup>に示す。開放検査の周期は設備の影響度と信頼度から決定する保全等級の他、運転におけるプロセス面の流体性状による汚れや閉塞に社内外のトラブル事例や情報などを加味し、検査方法を設定し、安定運転可能期間を予測して法規による周期内で設定する。検査結果や運転実績、その後の予定に 4M 変更の有無を勘案して評価を見直し、必要があれば検査方法や周期を修正して次回検査に活用する。長期安全安定操業を目指すならば設備の管理部位ごと、寿命支配要因ごとに寿命評価を行い開放検査の方法を明確にし、安定運転可能期間の予測と法規により

表2.9 重要度分類による通常検査の周期の例

重要度	検査周期
A 級	1 回 / 週以内
B 級	1 回 / 2 週以内
C 級	1 回 / 月以内
D 級	1 回 / 2 月以内

周期を設定する。表 2.10 に保全等級と汚れや閉塞の等級により開放検査の周期を設定する方法を示し、表 2.11 に法と保全等級、汚れや閉塞の評価から開放検査の周期を設定している具体例を示す<sup>[27],[39]</sup>。設備ごとの設定事項は、その評価を含めて、表 2.12 のプラント個別基準の開放検査の方法の記述例<sup>[32],[39]</sup>のごとく、基準として管理して充実を図っていく。運転・設備管理部門が一体となって、その設備が持っている本来の寿命をまっとうできるように安定運転の確保を目指す体制を取る。

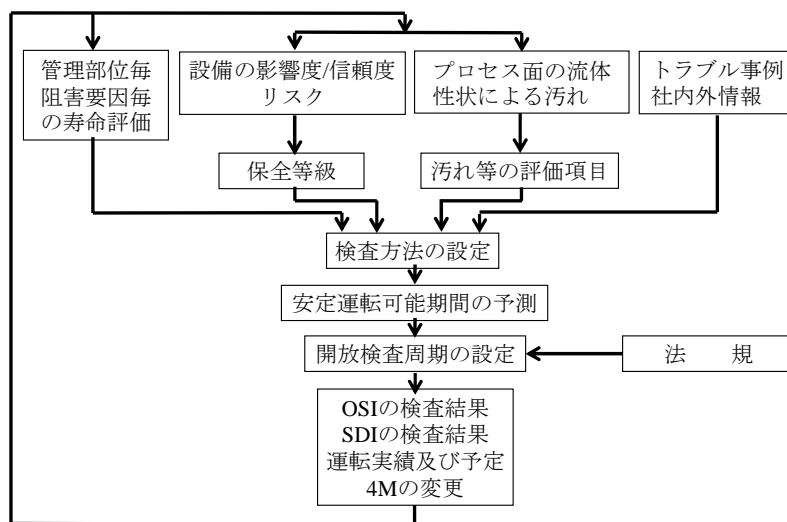


図2.15 開放検査周期の設定フロー

表2.10 開放検査周期の設定の方法

法定周期	保全等級による周期		汚れ等による周期	
定められた 周期	A級	2年以内	a級	2年以内
	B級	4年以内	b級	4年以内
	C級	8年以内	c級	8年以内
	D級	8年越える	d級	8年越える

上記の内の最短周期が開放検査の周期

表2.11 開放検査周期の設定の例

機番	機番名称	評価			周期	備考
		法	保全等級	汚れ		
C-100	圧縮機	4	A	a	2	重合物による汚れ
E-200	リボイラー	4	C	b	4	副反応物のスケール

表2.12 プラント個別基準の開放検査の方法

系・設備	検査項目	検査方法	検査周期	開放周期	実績・評価
AA系 E-100A/B  ABC塔コン デンサー	再冷水による腐食	水浸法超音波探傷検査	4～8年	2年	H●年検査結果、チューブ内外面に腐食減肉傾向を認め、腐食速度は最大0.24mm/年で、チューブの計画更新が必要である。  プロセス流体による汚れが大であり、定期的にチューブ掃除が必要である。再冷水による汚れは軽微であり問題なし。
	汚れ	目視	2～4年		
BB系 D-100  BBB塔 レシーバー	硫化水素による腐食（水素誘起割れ）	目視	2年	2年	目視検査では、槽内表面に膨れの発生は無く問題なし。  H△年の水素誘起割れ検査で、割れの発生なし。
		超音波探傷検査による水素誘起割れ検査	4年		

#### 2.4.4 日常点検の強化策<sup>[1]-[3],[32],[35],[36],[38],[86]</sup>

運転管理部門の運転員が行う運転中のパトロールや日常点検は、設備の異常兆候の早期発見に最も有効であると考えられる。運転員の担う役割には、プラントの状態監視と安定維持があり、異常兆候の早期発見のセンサー機能や設備の寿命を全うさせる運転管理で、流量・圧力・温度・不純物などの制御機能を発揮する。したがって運転員の異常に対する感性の向上が安定運転の確保に欠かせない。向上を考慮したパトロールや日常点検では視るべき事象を明確にし、判断基準を定量化し、ベテラン運転員や設備管理部門との合同パトロールなどで、相互に五感による異常兆候の検知のための気づきを教育・指導・伝承す

ると良い。視るべき事象では日本プラントメンテナンス協会（JIPM）が推奨している「もっとあいしてね」が、的を射たスローガンと成っている<sup>[11]、[13]</sup>。すなわち、も（漏れ）、つ（詰まり）、と（塗装：外観）、あ（油）、い（異音）、し（振動）、て（点検：流量・圧力・温度）、ね（帯熱）で、運転員がパトロールの際に視るべき事象を表現してある。五感による異常兆候の検知は、適用範囲が広く非常に有効だが、定量的表現が困難である。傾向管理に適用するには、定量的表現が必要で、基準となる温度や振動を日常的に体感し確認する手順を取り入れて、パトロールすると可能となる。配管の振動では小口径配管の振動が問題となることが多く、100 $\mu$ p-p を閾値として、それ以上の振動を精密診断する対象に抽出する。根拠の詳細は割愛するが、SWRI の基準\*によれば、60Hz での使用限界が 100 $\mu$ p-p 程度であり、小口径配管の固有振動数は高くとも 20~30Hz なので、高周波側で小さくなる振動許容では余裕を見た閾値となる。予め 100 $\mu$ p-p の振動に触れて、パトロールに臨めば抽出が可能となる。プラントの起動・停止時の過渡応答の確認にも威力を発揮できる。温度では触れている事ができる時間で 1 秒 60℃、数秒 55℃などの定量化が可能である。日常点検やパトロール、検査に五感を適用する際の参考として表 2.13 に検査技術としての五感<sup>[38]、[92]</sup>を示す。

表2.13 検査技術としての五感

五感	検査	適用
視覚	目視検査	変形や着色等，一様でない部分に注目し，粒界腐食や微細割れ，漏洩も発見可能で，人は100万色を見分ける
聴覚	聴音検査	回転機の軸受けや作動弁が発生する周期的な音のムラや不規則な音に傾注し，異音で異常兆候を検知，人は50万種の高さの音を聞き分ける
嗅覚	漏洩検査	パトロールの際に漏洩臭や焼ける臭い等，異臭に注意し，流体の漏洩発見にとても有効で，人は1万種を嗅ぎ分ける
味覚	品質検査	人は5基本味の甘味・酸味・塩味・苦味・うま味を味わう事ができ，食品業界では味覚による品質検査が一般的に行われている
触覚	触診検査	人には圧覚・痛覚・温度感覚（温点・冷点）があり，振動や帯熱のレベルの評価，腐食の程度や段差の検査などに有効である

運転員がパトロールする際の着眼点や判断基準の教育・指導・伝承による感性の向上について述べたが、40年を超える高経年化が進行しているプラントでは、何が、いつ、どこで、どのように起こるのか実績の無い未曾有の領域に踏み込んでおり、計画検査から次の計画検査までを担保する従来の考えでは安定運転の確保は困難となっている。網羅性を補強する観点からも、日常管理における異常兆候の発見力の向上が欠かせない。さらに協力会社とのパートナーシップや褒賞制度などの工夫により、工事や検査の協力会社が、センサー機能を発揮して、通常見ることのない場所やアクセスできない箇所の不具合を発見し

てくれる期待もある。運転員のセンサー機能の発揮に影響する事項を以下に記述する。

(1) 異常であるか、ないかの判断力

設備管理部門による設備の構造や機能、定量的な判断基準の教育資料の作成と傾向管理もできるような教育が有効である。潤滑油や振動知識に関わる教育の他、外面腐食診断士の資格制度なども効果がある。

(2) 報告案件の対応とフォロー

対応の要否とフィードバック、特に否の場合の理由は、その後のやる気に大きく影響する。さらに対策実施までの安全担保のフォロー管理が重要である。

(3) 何故そうなっているのかの深読み、放置したらどうなるかの先読みの観点

図 2.16 に深読み教育資料の例<sup>[1]-[3],[32],[35],[36],[38]</sup>を示すが、放置されているグリースガン<sup>[93]</sup>を片付けるのではなく何故放置されているかを考える<sup>[93]</sup>。軸受けに異音や振動などの発生が考えられるならば、精密診断や整備での対応が必要となる。図 2.17 の先読み教育資料の例<sup>[32],[36],[38]</sup>では、先読みのポイントや根拠、対策が記述されており、これらの教育資料を蓄積していくことで運転員の理解が深まり感性が高まる。

(4) 専門家との合同パトロールや担当エリア決めなどによる向上心

専門家との合同パトロールはコミュニケーションも活性化され刺激を受ける。担当エリアの責任を持たされることで意識づけや責任感が醸成される。

(5) 専門家による Plant Inspection Patrol\*の併用での気づき

プラントの専門家による検査パトロール結果との照合で、着眼点や判断基準での気づきが生まれる。



図2.16 深読み教育資料の例

不具合の現象	熱交換器サドルのスライド側ボルトの固着
現象の先読み	スライド側のボルトが腐食している →熱交換器の熱伸びが拘束 →チューブ拡管部や本体・サドル溶接部に過負荷 →過負荷による低サイクル疲労 →チューブ漏れや本体・サドル溶接部の割れ
パトロールのポイント	スライド側のボルト・ワッシャーの腐食 長穴とボルト・ワッシャーの固着 長穴の位置や塗装の剥がれ



☆ポイント  
スライド側のボルトが腐食している  
↓不足↓  
固着により熱伸びが拘束され過負荷  
拡管部や溶接部に異常が発生

☆対応  
ボルト・ワッシャー・長穴の整備  
チューブ漏れや溶接部の検査

図2.17 先読み教育資料の例

## 2.5 発生故障の結果系からの取り組みによる信頼性の向上<sup>[28],[30],[48]-[50]</sup>

設備管理の異常の兆候を早期発見する体制の構築により、故障への早期対応が可能となるので安定運転の確保に繋がる。次のSTEPは発生した故障への対応で、より信頼性を向上していく取り組みが必要になる。まず故障を再発させないように対策する再発防止体制の構築が必須となる。様々な要因や条件下での故障の発生によるばらばらな設備の寿命を再発防止型の設備管理の実践で安定させ設備の信頼性向上を図る。再発防止は顕在化した故障の結果系からの取り組みとなり、故障の原因の徹底究明から水平展開を図る対応に尽きる。

原因究明を徹底し、特定した故障の要因から異常の兆候を早期に検出する設備検査や診断技術の活用を図ることも効果がある。発生したトラブルの対策フォローや検討結果の水平展開を確実にを行う仕組みなどで再発防止を図る。保全基準・設計基準への織り込み、教育資料へのフィードバックによる技術伝承と教育の充実での歯止めも重要である。

信頼性向上のための対策は、計画の立案、対策実施、記録の作成、データの解析評価、対策後の設備管理計画への活用の設備管理のフローを回しながら、リスク評価による対策の優先度の設定、コストや件数による Worst10 の抽出などによる重点化の手法を併用して早期に基盤を整備する。

故障による寿命のばらつきの原因となっている基本条件を整え、設備が元々持っている性能や寿命を安定化させる。設備の寿命は、図 2.18 の寿命分布曲線による設備管理<sup>[1],[2],[30],[31],[38]</sup>に示すようにばらつきを生じるので、どの時点で点検整備を実施してもムダと失敗を免れない<sup>[94]</sup>。信頼性の向上は、図に示すように寿命を安定化させ延ばすことでもあり、ムダと失敗を少なくすることに他ならない。

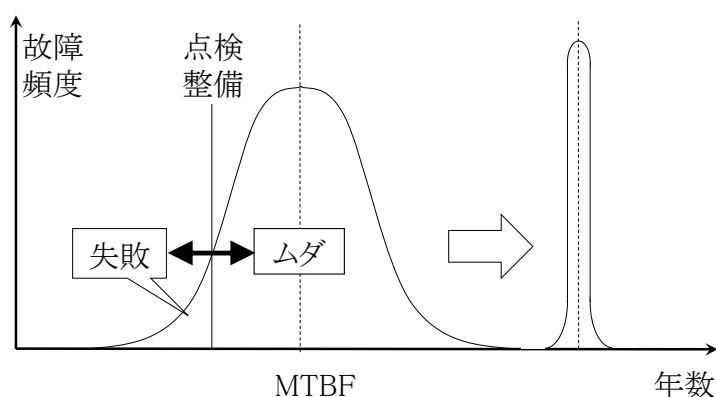


図2.18 寿命分布曲線による設備管理

ここに再発防止型の設備管理で行うべき事項について、以下に整理しておく。

- (1) 顕在化した故障の原因究明の徹底
- (2) トラブルのフォローシステムなどで再発防止や水平展開
- (3) 設備検査や診断技術の活用による兆候の検出<sup>[51],[52],[91]</sup>
- (4) 保全基準、設計基準、教育資料へのフィードバックによる技術伝承と教育
- (5) リスク評価による対策優先度の設定やWorst10抽出などによる重点化

設備の故障の原因には、設計不備、施行不良、経年劣化、不適當な運転条件、偶発が考えられ、各々以下のように対応を取る<sup>[1]-[3],[27],[29],[30],[32],[38],[40],[48]-[50]</sup>。

#### (1) 設計不備

設計不備が原因となる故障では、設計時の勘違いや計算間違い、うっかりした不適切な式の適用で、そのまま運転に入り故障と成る。本人を含め発見が非常に困難である。設計の各段階で行うDR (Design Review) やSA (Safety Assessment) で対応する。

#### (2) 施工不良

施工不良が原因となる故障では、工事管理の不良から溶接不良や材料の取り違い、部品の取り付け間違いなどから起こる場合と日常における保全技術を反映した管理不良・保守不良・製作不良が顕在化して故障に至る場合がある。不良の発見は比較的容易で、対策としてはその施工段階ごとに行う検収で防止する。

#### (3) 経年劣化

経年劣化には、主として外面腐食を含む腐食、磨耗等があるが、化学反応を伴う必ず起こる現象であり、寿命予測で正しく評価して対策する。

#### (4) 不適當な運転条件

不適當な運転条件では、SOP (Standard Of Procedure) に定められた運転条件を逸脱した条件変更や原料の変更、ヒューマンエラーなどが考えられる。ただSPEC内の原料を使用している場合、その原料中の微量成分が後流で蓄積し発現するようなやっかいな場合もある。これらは変更の定義を明確にして4M変更時の変更管理で対応する。

(5) 偶発故障

電子部品の故障など偶発的に発生する故障では、原因を特定することが困難な場合が多いが、微視的に見れば摩耗劣化の発現であり、OLM (On Line Monitoring) やOCM (On Condition Monitoring) のモニタリング技術により異常の兆候を早期に発見して対応する取り組み<sup>[51],[52],[91]</sup>か、弱点部位を改良改善して強度や耐性の向上による設計余裕の増加や冗長化で故障率\*を低減する取り組みで信頼性の向上を図る。

設備には表2.14に示す機器固有と使用環境の特性があり、故障への具体的な施策はそれら特性面から対応し、教育と伝承の仕組みで歯止めして機能させる<sup>[27],[39],[48]-[50]</sup>。さらに検査・工事の計画の立案、現地確認、安全打ち合わせ、安全養生の確認、検収、記録の作成、データの解析評価から今後の計画へ活用する設備管理のフローの確実な遂行、協力会社と一体となった安全・品質への取り組みなどの地道な保全活動が行われていなければならない。工事協力会社のゼロ災記録や無災害記録も信頼性向上の管理指標と成り得る。

表 2.14 信頼性向上の具体的取り組みのために考慮すべき特性面

機器固有の特性面	使用環境の特性面
<p>(1) 設計基準 法規、サービスクラス*、材質選定、NDI* などへの反映</p> <p>(2) 保全基準 経年劣化、外面腐食、ガスケットなどの 知識や経験の共有、展開も考慮した織り 込み</p> <p>(3) 施工確認 検収基準、材質検査、NDI、トルクや軸 力の締め付け管理、協力会社管理などへ の取り組み</p> <p>(4) 設備改善 高性能化、長寿命化、阻害要因への対応 など</p> <p>(5) 設備診断 経年劣化の検査手法や寿命評価技術、検 査不可機器への対応、精度向上やモニタ リング技術などへの取り組み</p>	<p>(1) 運転操作 規定基準類やSOPの整備と教育、プロセ スコンピュータ導入やDCS化、運転限界 値の明確化などへの取り組み</p> <p>(2) 運転改良 触媒開発などによる温度・圧力の運転条 件のマイルド化やプロセスの不要化な どへの取り組み</p> <p>(3) 維持管理 基準による標準化や Information technology (IT: 情報技術)適用による設 備管理のシステム化など、個人レベル差 の解消への取り組み</p>



## 2.5.1 トラブル防止と削減への取り組み<sup>[1]-[3],[28],[32],[38]</sup>

本論文では、設備に発生する機能の低下や喪失を故障とし、予期できずに発生した故障をトラブルと定義する。トラブルを防止し削減していく取り組みとして、再発防止・未然防止・人為防止（ヒューマンエラー）がある。さらに取り組むべきアイテムには、災害（Catastrophe）防止がある。これはBCP（Business Continuity Plan：事業継続計画）などの企業として取り組むリスクマネジメントで対応する案件であり、設備管理のトラブル防止と削減の取り組みとしては先の3つが該当する。昨今の事故の多発を受け、事故防止の観点からリスクを抽出して、許容可能域へ低減するリスクアセスメント<sup>[53]</sup>が世の中の要求となっている。ここで事故のリスクの抽出は、プラントの操業におけるプロセスや運転管理部門で行うSOPによる定常作業、臨時に行う非定常作業、設備管理部門で対応する工事、設備面の高経年化や安全防護層などから行う。

### 1) 再発防止

再発防止は、トラブル削減に最も効果的である。発生したトラブルや懸念事項の徹底的な原因究明の後、その原因への適切な対応措置を適切な有効範囲で水平展開することを再発防止型の設備管理で述べた。

水平展開が特に重要であるが、水平展開のレベルの設定は非常に難しい。対象の設定、深さ、広さ、費用、効果等、さまざまな事項の設定が必要である。水平展開の取り進めは、網羅的な網掛けで対象を抽出し、メカニズムによる論理的な絞込みを行い、寿命予測で時間による優先順を設定し、フォロー管理による確実な計画と実行で管理し、対策実施後には効果を評価する。

水平展開のフォロー管理では、進捗管理の仕組みの構築を必須とし、IT利用によるシステム化も検討する。水平展開の管理をするというのは、数字で見える化して状況を管理するだけでは管理しているとは言えない。実行系に落とし込み、いつまでに完了させるかを決め、実行されるまでのフォローも含めた対応ができて始めて管理ができていけると言える。

MP情報\*システムなどの情報の共有や横通しが図れるシステムに、トラブルを情報として登録し一元管理する。他の者の参照を可能として、教育展開や建設案件の審査の段階で、必ず利用することを決めておき、同様のトラブルの再発を防止する手立てとする。MP情報システムへの登録と活用による再発防止は、トラブルの原因の徹底究明とその結果に基づく適切な水平展開を遣る（遣らせる）ための手段であり、組織マネジメントの手法の一つでもある。適切な水平展開ができておれば再発はしないし、新規案件に対してはMP情報システムを確認して、保全予防として保全の要らない設計を目指すことを規則に定めて、予算の検討会や審査会などの機会に報告することとしておけば良い。同類設備からの類推で水平展開に思いを馳せるのはなかなかできないものだが、MP情報から同類設備の問題点を把握し対応する姿勢がトラブルを防止するのに効果がある。

トラブルの管理では、社会的に影響のあったものは事故として分けて扱い、損失・ダメージの大きさにより、予め定めた閾値を超えたものを重トラブル、閾値以下でも挽回不可能なものは軽トラブル、挽回可能なものは微トラブルと重軽微の3段階に分類して、リスクによる対策の優先順の設定などに取り組む。その他に故障に至る途上にあるものを不具

合として管理している場合もあるが、コストや件数による Worst10 の抽出などによる重点化で早期に安定化を図る。

## 2) 未然防止

トラブル削減の究極の目標はゼロであるが、再発防止だけではゼロにはならない。そこで未然防止への取り組みも必要と成る。未然防止は網羅的な抽出、論理的な絞込み、予測による優先順の設定、それを管理する手順で構成し設備管理シートを適用する。網羅的抽出では各々の設備を管理部位ごとに考えられる劣化モードをすべて抽出する。管理部位の材質と微量成分を含む流体、温度や圧力の運転条件から劣化のメカニズムを明確にして、論理的な絞込みを行い、寿命評価を実施し、予測による優先順を設定して、阻害要因への対応策としての設備管理の手法が適切であるかを確認する。設備管理シートによる網羅的な検証は、未然防止の観点からは PM (Preventive Maintenance) の実施とも考えられるが、実績を基に評価を見直しすることで、故障を発現させない運転管理の確立や設備・プロセスの改善に繋げ、MP (Maintenance Prevention) の領域まで昇華させることが必要である。

## 3) 人為 (ヒューマンエラー) 防止

人為防止はヒューマンエラーの防止であり、運転時は 4M (Man、Machine、Method、Material) 変更時の管理を確実にして変更管理の仕組みで防止を図る。変更管理では、変更の定義が重要で何をどの程度変化させると変更管理の対象となるのかを明確にしておく。例えば、部品交換でも形状や材質の仕様変更があれば対象であり、SOP に規定されている運転条件の範囲や不純物の許容濃度範囲が明確であれば範囲外を管理対象と理解できる。設計時は、各設計段階での DR (Design Review)、検査・工事の施工時は、検収でミスの防止を図る。ヒューマンエラーの対応は、以下の3項を念頭に取り進める。

- (1) ミスを犯さないよう日頃から意識をさせる。
- (2) ミスをして発現しない。
- (3) 発現しても解消できるか拡散しない。

安全の3種の神器と言われる KY (危険予知)、HH (ヒヤリ・ハット)、SS (指差称呼) で、意識をさせる (考えさせる) という対応が良く取られる。エラー防止には非常に有効ではあるが限界がある。人はミスを犯すものという考え方に立ち、発生源対策と拡散防止、管理の仕組みで対策や仕組みを構築する。ハード面での対応を第一に考えるということだけで無く、それも含めて「多重防護」が必要である。インターロックの解除や緊急停止ボタンなど、重要なボタンに安全カバーの開閉を必要とする措置や込み入った配管経路の行先表示板の設置などで弁の誤操作防止を図るなどの人間工学的な取り組みも考慮する。石油化学プラントでは組立加工型のような工程ごとに行う安全確認型の運転が困難である。停止には複雑な手順を必要とし、使用しているエネルギーも膨大なので多重防護を適用する。個人がミスをしてカバーできる組織、これは企業風土でとても有効な多重防護の一層に成り得る。

## 4) その他の防止

トラブルが発生するとそれに対応するための時間 (トラブルロス\*) が生じ、その解析や

報告書、再発防止の策定からフォローまでの時間、さらには、やり直しにかかる時間（手戻りロス\*）が発生し、かなり時間を浪費させられることになる。従って事前に手間を取っても、やるべきことをやっておくというのが一番の予防策になる。分かっているにもかかわらず実行は難しく、結局、設備管理のPDCAをきちっと回すことに帰結する。再発防止で、原因究明・対策計画・フォロー管理・水平展開などの諸施策は、PDCAで整理できるし、未然防止でも、設備管理シートなどを使って、網羅的・論理的・予見的・管理的な検証から実績を評価して、劣化させない運転管理や寿命予測を基にした設備管理<sup>[63],[94],[95]-[97]</sup>を確立して、信頼性の向上を図っていくので、PDCAを意識した取り組みが必要である。劣化させない運転管理や寿命予測を基にした設備管理の取り組みは、トラブル発生の際壁として、多重防護の1つに成りえるものである。老朽化するプラント設備に対しても、設備管理のPDCAをきちっと回して適切な処置を取っていくことでトラブルの防止が図れる。信頼性の高い安定・安全運転の確保には、運転管理部門と設備管理部門がコミュニケーションを取りながら、一体となって運転と設備管理を遂行し、PDCAを回すことが必須条件となる。トラブル削減の目的や役割分担、責任について自律した相互依存の関係を目指し齟齬の無いよう取り決める。建設後に発生する初期流動トラブルも、再発防止と同様に管理し、関係者の役割分担や責任、対応時期を明確にして取り組む。トラブル解析からの弱点把握と対応において、現場論の著者の遠藤功<sup>[98]</sup>によれば、問題を取り上げ、対策を考え、実行し管理する問題解決型のPDCAを適用し、P（Problem-finding：問題を発見）、D（Display：見える化）、C（Clear：問題の解決）、A（Acknowledge：確認）を回して、見える化により解決していくとのことである。設備管理の日常業務を良いコミュニケーションとPDCAを意識した確実な遂行で行うことが、トラブルの防止に最も有効な対策となる。

## 2.5.2 工事管理と協力会社管理

プラント群からなる事業所では設備管理部門の管理のもとに建設、補修、検査などを請負って実施する協力会社との体制作りが信頼性向上への取り組みの成果に大きな鍵となる。検査・工事に伴う現地確認や安全打ち合わせ、安全養生の確認、検収など、安全管理や工事品質の確保のための地道な保全活動が、運転管理部門や協力会社と一体となってきちっに行われなければ安定運転はあり得ない。協力会社の業務内容には以下がある。

- (1) 設備に関する新增設工事を含む保全工事や検査の実施
- (2) 工事における法規制や企業の定める保安安全衛生に関する規定類、注意事項の遵守
- (3) 作業資格者の管理、教育
- (4) 業務及び保安安全に関する教育の実施
- (5) 統括安全管理組織\*の設置及び特別教育の実施
- (6) 防災活動への参加
- (7) 工事安全衛生協会\*への加入、およびその活動への参加

厚生労働省による労働安全衛生関連法を始め、経済産業省や総務省など、さまざまな法規制により、工事管理や協力会社管理が求められている。高圧ガス保安法の認定事業者制度では、工事や検査の安全と品質の確保に詳細な審査事項が設けられている。安定運転の信頼性の向上には、協力会社に担って貰う施工管理に関わる技術を含む体制の維持管理が重

要で、工事や検査の安全と品質の確保のみでなく、日頃の協力会社とのパートナーシップを基とした信頼関係の構築が必要なのである<sup>[48]-[50]</sup>。特にコンビナートのプラント群を停止して行う定期修理期間中は、短期間に多くの協力会社が入場するので、日常工事とは異なった安全管理体制の仕組みが必要である。図 2.19 の協力会社の定期修理時の入場者数推移に事例事業所の例を示す。認定事業者制度に基づき、4年連続運転施設と2年連続運転施設が混在しており、定期修理の規模は、約2か月の期間に全施設の定期修理を実施する4年に1度の大規模と2年に1度の中規模、連続運転資格を持たない施設のみの隔年に行う小規模がある。事例の大規模では、34プラントが対象で、延べ10万人、ピークで3,600人、中規模では、26プラントが対象で、延べ6万人、ピークで2,500人が入場している。事前の準備計画による円滑な運営は、工事内容の変更や追加工事を削減し、工事や検査の安全と品質の確保はもちろん、効率的な運営で、修繕費の7~8割を占める定期修理のコスト低減にも大きく寄与する。

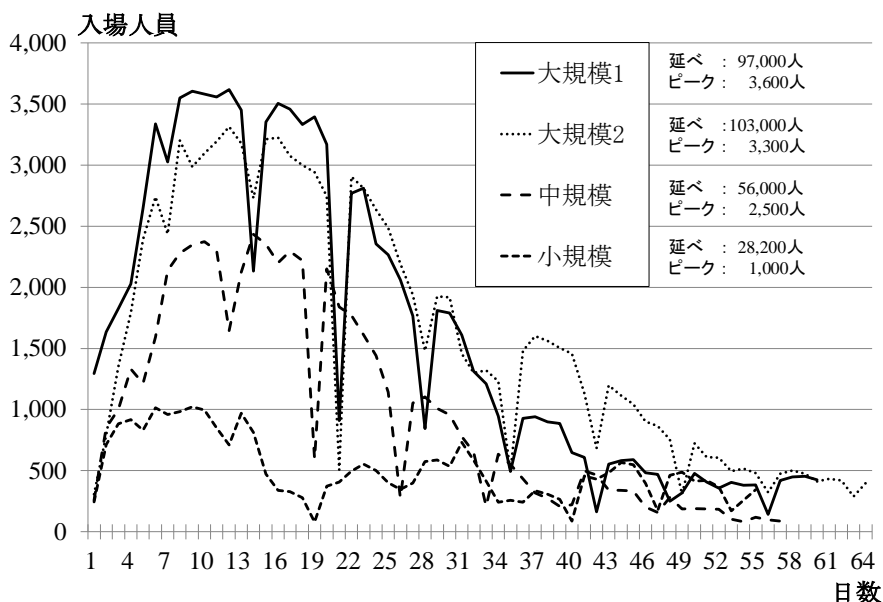


図2.19 協力会社の定期修理時の入場者数推移

## 2.6 阻害要因の原因系からの取り組みによる安定連続運転への対応

設備が元々持っている性能や寿命を安定化させるには、信頼性向上への取り組みが必要で、結果系からの再発防止型の設備管理などを説明した。ここでは、要求運転期間以上の性能を確保する安定連続運転への対応について述べる。安定連続運転の実現に問題となる阻害要因を見つけるアプローチは、原因系からの取り組みであり、過去の実績や文献、外部情報からカテゴリー分けした腐食や汚れ、閉塞、摩耗などの発生現象を基点に、設備ごとにプロセスなどからの該当の有無で絞込みし予防診断を行う。存在する阻害要因を抽出して、要求運転期間に対する寿命を予測し、連続運転の阻害となるかを評価し、満足しない場合には、改善・改良などの適切な措置を施し、運転中の検査や開放検査の結果から運

転実績を検証して必要な措置の見直しを行う。要求運転期間に応じた設備管理の考え方を図2.20 の安定連続運転に対する阻害要因の抽出と措置に示す。

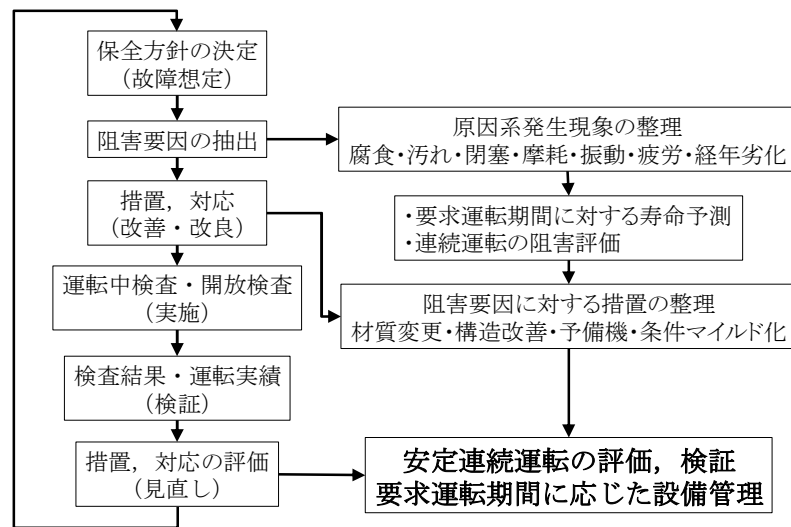


図2.20 安定連続運転に対する阻害要因の抽出と措置

### 2.6.1 予測の問題点<sup>[27],[29],[30],[33],[39],[48]-[50]</sup>

従来の設備管理は、個別の履歴データを主体に検査結果を時系列に整理し、劣化進行を予測して対応してきた。類似条件の設備はその予測結果や検査結果を基に展開し、信頼性の維持できる連続運転可能期間を経験則で予測し評価してきた。要求期間以上の安定連続運転の実現には、寿命予測を中心とした設備管理の実践が必要であるが、予測を難しくしている以下の背景を考慮しなければならない。

- (1) 開放検査周期の長期化により、開放による劣化の確認や要員育成の技術伝承の機会が減少している。
- (2) 建設時の設計条件からデボトルネッキングによる能力アップや触媒性能の向上、原材料の多様化などで、運転条件の過酷度が增大している。
- (3) 運転期間の延長や能力アップで、汚れや閉塞などによる設備の機能低下の度合いが増大している。
- (4) プラントの設備は、建設以来の長期使用で、高経年化している設備もある。

今後の寿命予測は、機器を構成する部品単位での網羅的な寿命予測が求められる<sup>[63],[94],[95]-[97]</sup>。設備ごとに決定された重要度により一律に設備管理方式を決定する方法があるが過剰保全によるムダを伴う。ある程度実績ができれば個々の機器ごとに寿命予測を基に管理する方式が採用されるべきである。将来要求される運転の負荷条件や環境条件等も考慮が必要で、設備に加わるストレスのモニタリングや分析などにより、逐次評価しながら寿命予測精度を高めていく。さらに運転中での設備の状態を寿命要因に応じた的確に把握する測定技術、その結果から寿命予測を行うための評価技術の確立が必要である。

## 2.6.2 阻害要因の把握と措置<sup>[27],[29],[30],[39]</sup>

要求運転期間に応じた設備管理の実現には、原因系からの阻害要因の抽出による把握と適切な措置で対応する。運転中に故障の発生する可能性のある劣化要因を設備ごとにプロセスや使用条件で絞込みする。過去の実績や文献、外部情報から腐食、汚れ、閉塞、摩耗、振動、疲労、経年劣化にカテゴリー分けした発生現象との該当で絞込む。要求運転期間に対する寿命予測から安定連続運転の阻害要因となるかを評価し、具体的な措置の仕様を決定して対応する。措置は阻害要因に対する改善や改良、予防、冗長化などの取り組み方針と、設備面で材質変更や構造改善、予備機やバッファの設置、運転面で触媒変更などによる運転条件のマイルド化などを検討する。阻害要因の把握と措置の考え方を表2.15に腐食、表2.16に閉塞、表2.17に摩耗の例で示す<sup>[1],[3],[27],[30],[32],[39]</sup>。阻害要因の整理で該当プラントの対象となる具体的な要因ごとに措置が検討される。例えば阻害要因の振動の具体的な要因が「水素圧縮機の吐出系小口径取出し配管」であれば、 $\geq 100 \mu p-p$ の振幅を対象とし周波数解析などでサポート支持などの割れを発生させない措置を検討します。

プロセスや設備による阻害要因は有限で、体系的に整理をすれば、根拠が明確な措置の対応となる。阻害要因に対して取った措置は、運転中検査や開放検査の結果と運転実績から検証して、措置の見直しを行う。表2.18に措置の実績を評価している例を示す<sup>[3]</sup>。さらに阻害要因の存在や劣化の兆候を的確に抽出、分析、把握して、適切な措置をするための検査やモニタリング技術、寿命予測技術、評価技術などが求められるとともに、過去の経験知識を整理したMP情報の利用や阻害要因の劣化のメカニズム解明による適切な措置、個別改善による寿命延長などの整理が必要である。表2.19 に安定連続運転のための阻害要因に対する措置の整理した事例を示す。要求運転期間の安定連続運転を達成するには、発生現象を基点とした原因系からの阻害要因の抽出を行い、対応する措置までを体系的に整理する。劣化の兆候を的確に把握し寿命を予測する技術を適用し、対応した措置の実績を評価し見直し、知見は伝承できるよう仕組み化しておく。以下に要求運転期間の性能確保のための阻害要因の把握と措置の要領についてまとめる<sup>[1]-[3],[27],[32],[39]</sup>。

### (1) 阻害要因の整理

要求運転期間を阻害する腐食・汚れ・閉塞・磨耗・振動・疲労・経年劣化の発生現象

### (2) 診断技術の適用

劣化の兆候を的確に把握、評価し、措置するための検査やモニタリング技術、寿命予測や評価技術

### (3) 個別改善の措置

設備面から材質変更や構造の改善による寿命延長、予備機・バッファ・バイパスの設置、運転面からプロセス改善や触媒変更などによる運転条件のマイルド化や設備の不要化

### (4) 措置の評価と検証

過去の経験知識の整理・登録・活用・展開 (MP 情報)、劣化のメカニズムの解明による適切な措置

表2.15 阻害要因の把握と措置(腐食)

阻害要因	阻害要因に対する 取り組み	措置	具体的措置
プロセス 流体  ユーティ リティー  外部環境  ...	耐腐食性に優れた 材質の選定	設備面の措置  ・材質の変更  ...	高級材質  コーティング  耐食性メッキ  ...
	腐食環境との遮断		
	腐食因子の付着や 濃縮の防止		
	腐食条件領域から の脱却  ...	運転面の改良  ・運転条件変更  ...	水処理剤変更  流速管理  ...

表2.16 阻害要因の把握と措置(閉塞)

阻害要因	阻害要因に対する 取り組み	措置	具体的措置
重合物に よる付着 や閉塞	閉塞しにくい材質 の採用	設備面の措置  ・機器構造改善	フィルター 設置
	閉塞しにくい構造 への変更	・予備機の設置  ...	ポリマーの 閉塞対策 ・平滑化 ・洗浄ライン 設置
	閉塞の定量的把握 で掃除や切替可能		
	閉塞因子の除去や 軽減	運転面の改良  ・運転条件変更  ...	C V型式変更  ...

表2.17 阻害要因の把握と措置(摩耗)

阻害要因	阻害要因に対する 取り組み	措置	具体的措置
摺動部の 摩耗 ・ピスト ンリング ・軸封 ・  エロー ジョン ・気液 混相流 ・ ...	耐摩耗性に優れた 材質の適用	設備面の措置  ・材質の変更	炭素鋼の ステンレス化
	摩耗条件の軽減	・機器構造改善	摺動材の強度 アップ
	摩耗余裕の増加	・予備機の設置	オイルシール のラビリンス 化
	摩耗原因の排除	運転面の改良  ・運転条件変更  ...	...
	摩耗量の定量的 把握  ...		周速ダウン

表2.18 措置の実績と評価

系・設備	阻害要因	実施対応策	実績	評価
AA系 反応炉管 F-100	高温劣化 クリープ	高温強度に優れた材料HP・ の使用で、 寿命≒14年  水浸UT検査 で寿命予測  ・H□年に 管半数○本 を更新済 ・H○年に 管残り○本 を更新済	・H△年の 水浸 UT検査の 結果と破壊検査 結果では、水浸 UT検査が安全側 であった 残存寿命≒70% と推定  ・H□年の 水浸UT検査結果、 異常なし	対応により4年以上 の連続運転に問題は ない  クリープラプチャー 試験を含め、データ を蓄積して、水浸UT 検査と破壊検査によ るBattelleの破壊モー ドによる寿命予測の 精度を向上する  ・次回検査H○年

表2.19 安定連続運転のための阻害要因に対する措置

発生現象の腐食，汚れ，閉塞，摩耗，振動，疲労，経年変化（材料，電気・計装設備）を整理

プラント施設				阻害要因	取り組み	措置	具体的措置	プラント施設						
A	B	C	D					A	B	C	D			
				<b>プロセス流体による腐食</b> ・凝縮炭酸水 ・脱炭酸液中の炭酸カリ ・NaOHによる脆化 ・ストリッパー系排水 ・CO・CO <sub>2</sub> ・水系SCC <b>用役による腐食</b> ・冷却水のデポジット腐食 ・燃焼ガスの露点腐食 ・ボイラー水による腐食 ・冷却水中Cl濃縮による腐食 <b>外部雰囲気による腐食</b> ・雨水による腐食 ・海塩粒子による腐食 ・露点腐食 ・高温雰囲気による粒界酸化	耐腐食性に優れた 材質の適用  腐食環境との遮断  腐食因子の付着や 濃縮の防止  腐食条件領域から の脱出  腐食制御剤の使用  腐食量の定量的把握	<b>設備面の措置</b> ・材質の変更  ・機器構造の改良  ・設備の計画的更新  <b>運転面の改良</b> ・運転条件の変更  ・薬剤の添加	炭素鋼からステンレス鋼化  ステンレス鋼の高級材質化 断熱材の低Clイオン採用 アルミからチタン採用  樹脂によるコーティング  断熱材外装・塗装の強化 保温のトレース最適化 ・温水化や施工要領  診断により計画的に更新  冷却水Clイオン管理 運転管理温度の強化 ・NaOH受入48℃以下 冷却水出口温度45℃以下 冷却水流速0.7m/sec以上  ボイラー水への薬剤添加 ・PH調整他 脱炭酸液へのV <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 添加 ・KVO <sub>3</sub> による防食被膜形成 冷却水への薬剤添加 ・デポジット防止やPH調整他							
	○											○	○	○
	○													○
		○										○	○	○
		○												○
	○	○												○
○	○	○	○											○
○	○	○	○											○
○	○	○	○											○
○	○	○	○											○



## 2.7 網羅的な劣化モードの検証による長期安全安定操業の確保

発生現象を基点に原因系の阻害要因を抽出し措置していくことで、要求運転期間の安定連続運転を可能とする取り組みを説明した。その延長線上に長期安全安定操業の道筋がある。安定連続運転を確保する従来の取り組みでは、毎年、法規制によりプラントを停止して次年度までの健全性を担保する保安検査や性能検査を行っていた。ボーダーレスの競争下にある企業の競争力を向上させるために認定事業者制度などの規制緩和が施行され、2年さらには4年を超える長期連続運転に道が開かれた<sup>[53],[99]</sup>。一方、コンビナートを形成するプラント群は緻密に連携され、1つのプラントでの生産停止トラブルは連なったプラント群にも影響する。長期安全安定操業の確保が要求される所以である。

腐食、汚れなどの阻害要因から運転・設備管理を検討し措置する安定連続運転への対応では、未経験の長期連続運転に対し漏れを生じる可能性があり、かつ40年を超えるプラントも多く、如何に網羅性を確保するかが長期安全安定操業達成の鍵となる。運転期間以上の機能確保が必須であり、寿命到達前に適切な処置を可能とする寿命予測に基づく設備管理が求められる。長期安全安定操業の確保を考慮した設備管理では、寿命予測を中心とした設備管理を実施する必要がある。4年を連続運転期間とした場合の連続運転期間と寿命予測の必要期間との関係を設備寿命のケースごとに図2.21に示した<sup>[48],[49]</sup>。

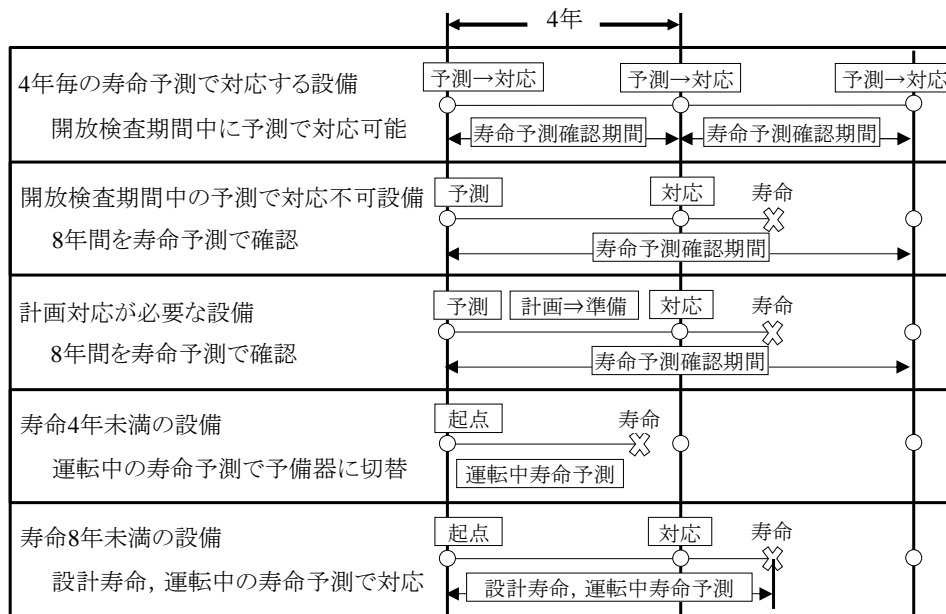


図2.21 連続運転期間と寿命予測期間

検討すべき設備寿命のケースは管理すべき部位ごとに存在するので、運転期間に応じた寿命予測は網羅性を確保して行う必要がある。検査による異常の無いことの確認や設備の状態の把握、劣化の属性の測定から寿命予測の評価は、必要の都度に考えなしで対応しては取り組みに一貫性が無く、合理的、効率的な運用ができない。結果のばらつきや誤差も大きくなり再現性に齟齬が生じる。劣化させない運転・設備管理を基に阻害要因を的

確に把握し評価する検査手法や劣化の測定結果から寿命を評価する寿命予測の精度や確度の向上のためには、体系的な取り組みによる手法の適用や要領、判断基準などの標準化が必要となる。本稿では、まず検査手法・寿命予測への体系的な取り組みについて述べる。それを基にした運転・設備管理部門が一体となった劣化させない運転管理と寿命予測に基づく設備管理を示し、それを可能とする筆者が考案し実践した設備管理シートによる設備の部位ごとの体系的な検証による設備の信頼性向上の施策について説明する。

### 2.7.1 長期安全安定操業への取り組み<sup>[27]-[29],[48],[49]</sup>

IT を始めコンピュータ技術の飛躍的な進歩を背景にプラントの運転管理や設備管理の技術は著しく向上した。Risk Based Inspection / Risk Based Maintenance (RBI/RBM)<sup>[63],[71]-[73]</sup> や Reliability Centered Maintenance (RCM)<sup>[16],[17],[63],[94],[100]-[102]</sup>、Total Productive Maintenance (TPM\*)などの計画的な設備管理の手法も普及し、精度の高い検査手法や寿命予測の評価技術も適用されている。高いレベルの設備管理の遂行が可能となって長期安全安定連続運転の基盤は整った。石油やエネルギー資源を持たない日本の産業競争力の向上策の1つとして、毎年のプラントを停止して行う定期検査が規制緩和の対象となり、認定事業者制度が施行されて法規的にも長期連続運転に道が開かれた。ただその恩恵は高いレベルの設備管理能力を保持し遂行していると審査<sup>[53],[99]</sup>により認められることが必要で、各企業は長期安全安定操業の確保に日夜努力している。達成は運転安定化の延長線上にあり、信頼性向上への取り組みに加えて原因系の阻害要因の把握と措置の体系化による設備管理で安定連続運転を行う。ただ運転・設備管理の検討から阻害要因を把握し措置するやり方では、未経験の長期連続運転に対し検討漏れを生じる可能性があり、網羅性の確保と寿命予測を基にした設備管理が必要となる。流体や運転条件と構造、材質等の原因系から潜在する劣化を洩れなく予測し管理する手法が要求される。図 2.22<sup>[31],[32],[34],[39]</sup>に示す網羅的・体系的な取り組みで、顕在化していない設備劣化によるトラブルの未然防止を図り長期安全安定操業の担保とする。

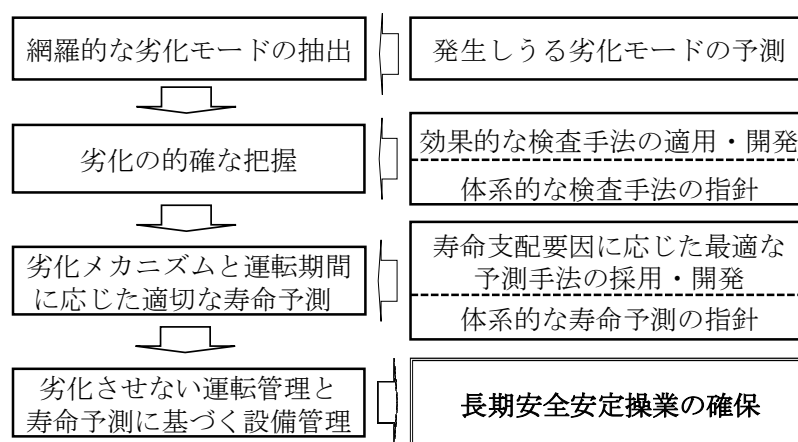


図2.22 網羅的・体系的な取り組み

長期安全安定操業の確保の施策は以下の事項への取り組みである。

- (1) 原因系となる運転・設備管理の状態から発生し得る劣化モードを抽出する。
- (2) 検査手法を体系化して、劣化の的確な把握のための効果的な検査手法が、適用・開発できるようにする。
- (3) 寿命予測を体系化して、劣化メカニズムに基づく寿命支配要因と運転期間に応じた最適な寿命予測の手法が、採用・開発できるようにする。
- (4) 設備の管理部位ごとに劣化要因を明確にし、寿命予測を基にした設備管理の手法を採用する。
- (5) 劣化させない運転管理と寿命予測に基づく設備管理の融合一体化を図る。

## 2.7.2 検査手法の体系化<sup>[27],[48]-[50]</sup>

長期安全安定操業は、設備の経年変化を的確に把握し、寿命を予測することが重要である。しかしながら機器ごとに運転・設備の特性に差があり、予想される劣化モードも異なっている。その劣化現象の発見、判別、分析、評価、および修理要否の判断を可能とする効果的な検査手法を選択できるよう以下のように体系化し整理する。

### (1) 設備検査の考え方

長期安全安定操業に対する設備検査の考え方を整理する。

### (2) 検査手法の適用

劣化現象の属性と適応する検査手法の種類を整理する。

### (3) 検査手法の活用

検査の目的と検査方法、検査時期、留意点などを整理する。

### (4) 個別の検査手法の基準

開発した検査手法や特殊なものについて、適用、評価、判断などを基準化する。

### (5) 検査手法の適用例

実際に適用した検査手法の適用事例を参考にできるよう整理する。

### 1) 設備検査の考え方

長期安全安定操業の実施に対して、プラントの設備の健全性を如何に維持管理していくかが重要な課題であり、高い信頼性の設備管理が求められている。IT技術を始め技術革新が著しく進み産業構造も変化しており、高度な診断技術を生業にする協力会社やメーカーも多数存在し検査に対するインフラが整っている一方、社会の要求は保安確保を最優先し、「自らの設備は自らが守るべき」との自己責任に基づく自主保安の管理、さらには現地、現物、現象の3現主義での現認である。それらを満足させつつ設備の診断技術を活用し、長期安全安定操業の一端を担うために以下のように考え方を整理する。

- (1) 設備の状態を正確に把握し、健全な状態に保つことにより、保安安全の確保を図る。
- (2) 顕在化しない設備の劣化情報の摘出と経年変化の兆候の早期把握によりトラブルを防止する。
- (3) 故障発生の可能性のある劣化要因を的確に抽出し、分析、評価する検査に取り組む。

- (4) プラント固有の設備検査と共通の検査手法を基準化して、汎用化を図って恒常的に向上させる。
- (5) 水平展開と保全基準、設計基準、教育資料へのフィードバックによる技術の伝承と教育の充実を図る。

## 2) 検査手法の適用

設備の劣化現象の属性と適応する検査手法の種類を関連づけ、予想される劣化現象に対し適切な検査手法が適用できるように整理する。材料確認や超音波などの対象とする検査技術に適応できる検査の名称を検査手法の種類としてまとめ、その検査の結果が代表部の結果か、全体または検査した部分のみの結果を表すのかを検査範囲として整理する。さらに劣化現象の減肉や摩耗、割れ、汚れなどの検査の対象となる劣化の属性を明確化して適切な検査手法の適用を可能とする。表2.20に材料の例、表2.21に超音波の例を示す。

表2.20 検査手法の適用（材料）

検査手法の種類		検査範囲			劣化現象				属性
		代表	全体	部分	減肉	摩耗	割れ	汚れ	
検査技術	検査名称								
1 材料	試験片/機械強度試験	○	○						機械試験データ
	シャルピー衝撃試験	○	○				○		衝撃値
	硬度検査	○	○		○	○			硬度
	顕微鏡組織検査	○	○	○	○	○			金属組織
	S E M	○	○	○	○	○			"
	S U M P	○	○	○	○	○			"
	DOS (鋭敏化度) テスター	○	○				○		鋭敏化度
	フェライトインジケータ	○	○	○	○	○			フェライト量
	メタスコープ		○	○	○	○	○		成分
蛍光X線金属分析計			○	○	○	○		"	

表2.21 検査手法の適用（超音波）

検査手法の種類		検査範囲			劣化現象				属性
		代表	全体	部分	減肉	摩耗	割れ	汚れ	
検査技術	検査名称								
3 超音波	超音波厚さ計 (UTT)	○		○	○	○			肉厚
	特殊超音波厚さ計 (UTT) FRP, 塗膜上	○		○	○	○			"
	超音波探傷試験 (UT)				○	○	○	○	割れ、欠陥形状
	超音波透過減衰法	○			○	○	○		"
	超音波音速比法	○			○			○	肉厚
	クレーピングウェーブ		○	○				○	割れ
	I R I S (アイリス)		○	○	○				肉厚
	F R E N D		○	○	○	○			"
	水浸法 U T T		○	○	○	○			"
	水浸法超音波試験 (反応管対象)			○					"

### 3) 検査手法の活用

検査手法の種類とその検査の対象について整理されたシーズとしての検査手法の適用に対し、ニーズとしての対象設備の検査項目に効果的な検査手法を整理することが求められる。表2.22に塔、槽、表2.23に回転機の事例を示すが、機種別の検査する項目ごとに目的の検査の対象を明確にし、それを満足する効果的な検査方法を整理する。またSDIやOSI/OCMの検査を適用する時期と検査の限界や制約などの計測上の留意点を記述する。さらにその検査は傾向管理として適用するのか、寿命予測にまで適用できるのかの技術の範囲についても記述し、効果的で的確な検査手法の活用が可能となるように作成する。

表2.22 検査手法の活用（塔、槽）

機種	検査項目	目的	検査方法	検査時期		計測上留意点	技術の範囲	
				SDI	OSI/OCM		傾向	寿命
塔、槽	厚さ測定	減肉測定	超音波厚さ計 UT画像処理装置 (面探傷)	○	○	550°C以上の場合、測定不可	○	○
		ライニング側からの母材減肉測定	特殊超音波厚さ計 (UDM720, UTG01)	○			フレーク、エポキシ、FRPに適用可能。但し、厚さ制限あり	○
		クラッド材、母材各々の肉厚測定	超音波厚さ計、探傷器	○	○	550°C以上の場合、測定不可	○	○

表2.23 検査手法の活用（回転機）

機種	検査項目	目的	検査方法	検査時期		計測上留意点	技術の範囲	
				SDI	OSI/OCM		傾向	寿命
回転機	振動測定	軸受損傷・芯出不良・共振等の振動原因把握で最適補修とトラブル防止振動傾向管理	振動解析装置 理論振動解析手法 振動計設置によるモニタリング		○		○	○
	軸受損傷確認	軸受損傷を予知しトラブル防止	回転機異常診断装置 (マシーンチェッカー等) AE計測		○		○	○

#### 4) 個別の検査手法の基準

開発した検査手法や世の中の特殊な検査手法について、検査の実施、判断、評価の際に活用できるよう基準化する。例えば機械編で振動測定や潤滑油の分析、鋭敏化測定や炭素鋼の低温靱性、電気編で高圧電動機のコイル絶縁試験や高圧ケーブルの直流漏洩試験など、検査手法の適用に際して、誤った操作や評価をしないように基準化しておく。専門技術の教育や技術伝承のツールとしても利用できる。また精度向上や効率化等の改善に取り組み、審議の手続きを経て基準への反映や見直しを行えば技術の向上と展開も図れる。基準化した検査手法の例として図2.23に個別の検査手法の基準の例、図2.24にラックスルー検査、図2.25にラックスルー検査の検量線の例を示す<sup>[34],[39],[103],[104]</sup>。基準の構成は以下の項目を満足するよう策定すればよい。

##### (1) 目的・適用範囲

##### (2) 検査要領（検査の特徴、検査の準備、検査の実施要領）

検査の特徴は、劣化の現象、特徴、劣化の発生機構、懸念部位

検査の準備は、検査設備の特定、検査日時の設定、検査のための安全対策や処理

検査の実施要領は、検査の原理、構成、検査の要領・手順、動作原理、前処理、補正、精度

##### (3) 判定基準（判定のための数値、フロー）

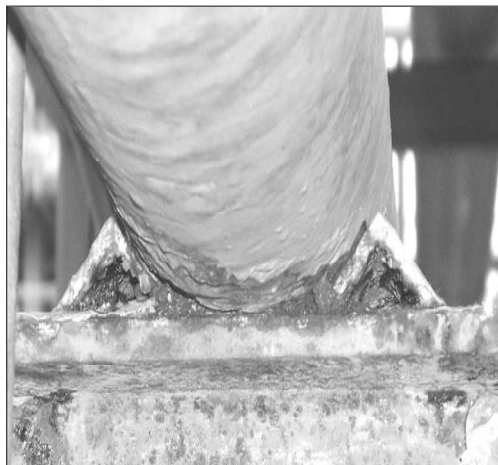
##### (4) 検査周期（頻度）

##### (5) 記録（記録の作成、記録の分析評価、記録の活用）

##### (6) データの活用（精度向上、効率化、基準の見直し）

##### (7) 検査手法の適用例、補足資料

配管梁接触部の外面腐食の例



漏洩事故に繋がる危険物流体配管  
運転中 外観目視+ラックスルー検査  
停止時 吊り上げ検査+丸鋼ガイド



\*ラックスルー検査とは、超音波を使い配管の上方向から梁接触部の減肉量60%以下を定量的に判定する検査手法

図2.23 個別の検査手法の基準の例

配管梁接触部の超音波探傷法(ツインセンサー)による配管減肉検査

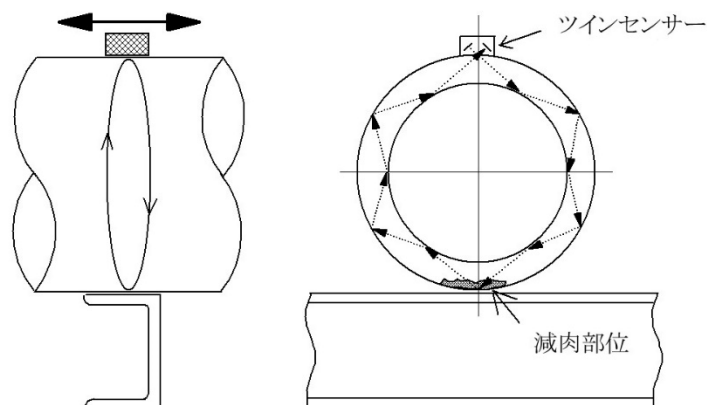


図2.24 ラックスルー検査

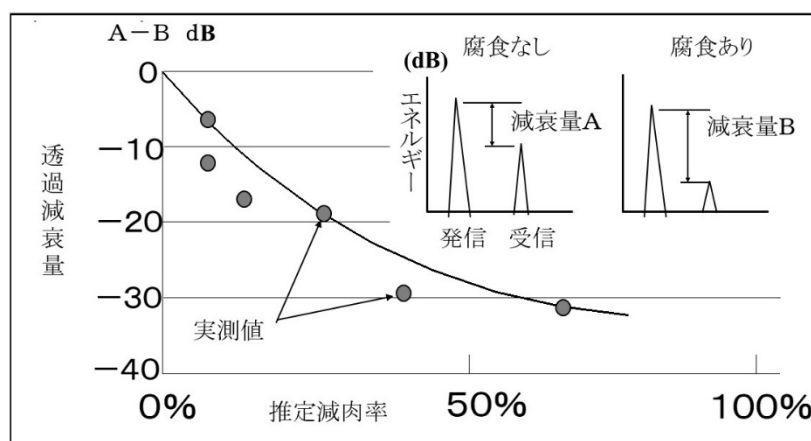


図2.25 ラックスルー検査の検量線の例

### 5) 検査手法の適用例

実際に適用した検査手法の事例を検査の概要、適用範囲、診断時期について参考にできるように整理する。検査手法の適用例の目次の例を表2.24に示す。専門グループごとの機種別に、さらに適用した部位と検査手法の内容、どのプラントのどの設備に適用したかの適用例を整理すれば、適用できる検査手法の技術MAPにもなる。電気ならば変圧器や電動機、ケーブル、高圧配電盤などの機種に、コイルや絶縁油、絶縁体、遮断器、保護継電器などが部位になり、計装ではDCSを機種として電解コンデンサや可変抵抗、設置環境などが部位になる。機械では塔・槽、熱交換器、加熱炉、配管、動機器などが機種となり、構成する主な部位に適用する検査手法が対象となる。適用した検査手法の概要、対象設備、検査方法（原理や装置）、判定基準、評価・効果、検査・測定結果の事例、検査計画や活用などを記述していけば、個別の検査手法の基準化までは作成が困難でも、適用した事例は後の検査に非常に参考になる。事例を重ねることで基準化も視野に入って来る。適用例の説明を熱交換器チューブの検査方法の例で図2.26に示す。

表2.24 検査手法の適用例の目次の例

機種 ( 熱交換器 )

専門グループ ( 機械 )

部位	検査手法内容	適用例
チューブ全般	熱交換器チューブの検査方法 熱交換器チューブの検査方法及びそれぞれの検査方法の原理を説明	全プラント
磁性体チューブ	強磁性体チューブの腐食損傷検査手法一覧 強磁性体チューブの腐食損傷検査手法について整理	全プラント
	熱交換器の炭素鋼チューブの水浸超音波測定による肉厚測定 熱交換器の炭素鋼チューブ肉厚測定の代表的な方法として、抜管による測定方法と水浸超音波測定法 (FREND, IRIS) があり、更新したチューブの検査データを基に精度を検証	全プラント
	熱交換器の炭素鋼チューブの極値解析による腐食診断 極値解析法によるデータ処理システムは、熱交換器チューブ、タンク底板等をサンプリング計測した腐食データを基に統計処理を行い、最大腐食深さを求めて、腐食速度から余寿命予測を行う設備診断技術	全プラント
非磁性体チューブ	熱交換器非磁性Uチューブの渦流探傷検査 熱交換器チューブの渦流探傷検査 (ET) は、従来直管部を対象としたが、今回Uバンド部を対象に検査用プローブを新しく製作して適用	全プラント
	熱交換器非磁性チューブの三元式探傷検査 三元式探傷検査は、欠陥の大きさを検出する振幅法と欠陥の大きさと同深さを検出する位相振幅法及び標準比較法を一回の探傷操作で同時に行う	全プラント

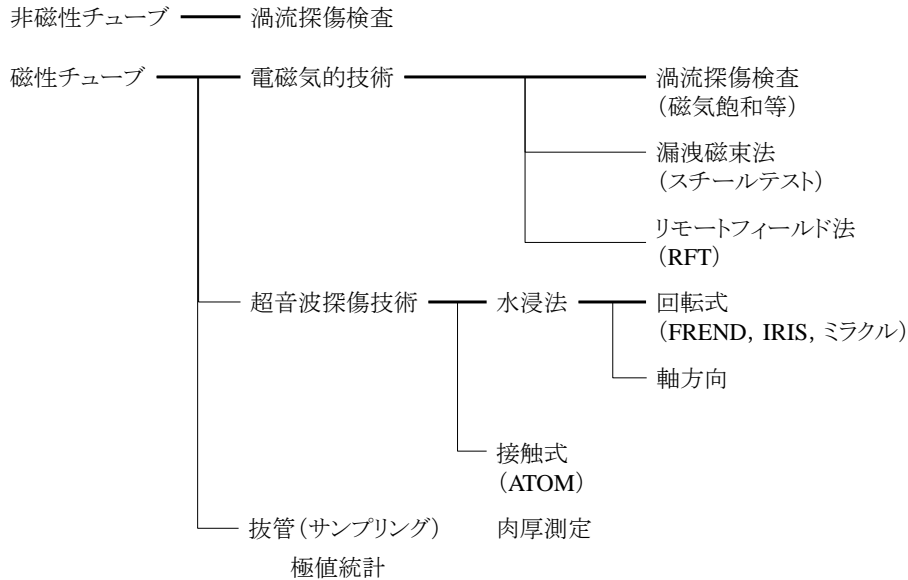


図2.26 熱交換器チューブの検査方法の例



### 2.7.3 寿命予測の体系化<sup>[27],[48]-[50]</sup>

設備の寿命とは、「対象としている設備が機能を喪失するまでの時間」と考えられるが、予想された時間は確率的にばらつきがあり、決定論的には誤差を伴う<sup>[94]-[96]</sup>。その誤差を考慮して設備管理を行うための管理値を決め寿命とするのが一般的である。すなわち寿命予測とは「管理値に到る迄の時間を推定すること」を言い、その技術は劣化メカニズムの解明、測定技術、評価技術から成り立っている。図 2.27 に設備の寿命予測を実施する際のフローについて示す<sup>[33],[48],[49],[105]-[107]</sup>。長期安全安定操業における高度な設備管理を実施するには、全ての設備について経年変化の状況を的確に把握し、寿命を予測し、次回の検査・補修・更新時期を判断しなければならない。しかしながら、機器ごとに運転・設備の特性に差があり、予想される劣化パターンも異なっている。寿命予測を基にした設備管理を実践する上で根幹をなす技術であり、効果的な寿命予測への取り組みができ、かつ確実な寿命予測ができるよう以下のように体系化し整理する。

#### (1) 寿命予測の考え方

長期安全安定操業に対する寿命予測の考え方を整理する。

#### (2) 寿命予測への取り組み

寿命支配要因に応じた取り組みができるよう寿命予測の方法について整理する。

#### (3) 寿命予測の活用

懸念する劣化モードと適用可能な寿命予測の手法を整理する。

#### (4) 個別の寿命予測の基準

開発した寿命予測の方法や特殊なものについて、適用、評価、判断などを基準化する。

#### (5) 寿命予測の実施例

実際に適用した寿命予測の活用事例を参考にできるよう整理する。

#### 1) 寿命予測の考え方

図 2.27 に示す設備の寿命予測を実施する際のフローを含めた寿命予測の考え方と今後の設備管理を整理する。今後の設備管理では運転期間が長期化するのに伴い、寿命予測を基にした設備管理が基本となる。さらに設備としてではなく構成する部位の単位で、劣化メカニズムに基づいた寿命予測を行い管理することが重要となる。設備は内部流体による運転条件や外部の環境条件がストレスとして作用し寿命に影響するので、その依存性を考慮して寿命予測する。従って運転中の設備の状態を寿命支配要因に応じて、的確に把握する測定技術、測定の結果から寿命予測を行う評価技術の確立が必要となる。実施すべき事項として以下がある。

(1) 設備管理、運転管理の考え方を整理し、劣化メカニズムより限界値を明確化する。

(2) 寿命支配要因に適した予測技術を適用し供用期間に応じた寿命予測技術を確立する。

(3) 設備ごとに部位の単位まで落とし込んで寿命予測を行い、供用期間に問題のないことを確認する。

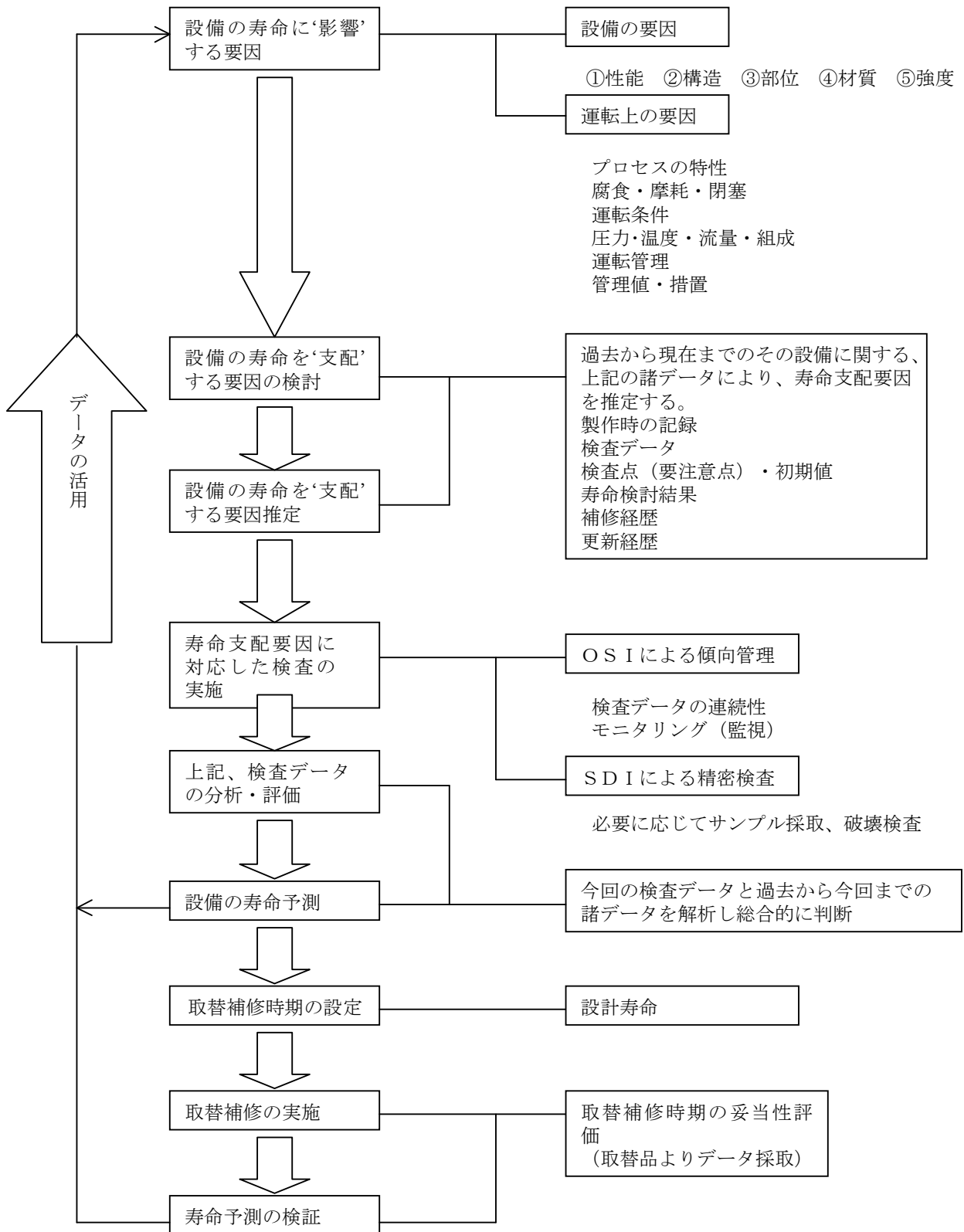


図 2.27 設備の寿命予測フロー

寿命予測を基にした設備管理では、以下の設備管理の手法が考えられる。設備や運転の特性に応じた使い分けをして、寿命予測の精度を向上させ、信頼性の高い設備管理を行う。

(1) 部位ごとの寿命予測による設備管理<sup>[95],[96]</sup>

設備を構成する部位ごとに寿命予測を実施し、律速を基に設備管理を考える。設備の固有の特性である材質、肉厚、回転数や、流体、組成、腐食性、スラリーなどの運転特性を考慮し、予測される劣化現象を抽出する。劣化要因と促進要因を基に劣化メカニズムを解明し、劣化パターンから経時的な変化を把握するための管理すべき項目を特定し、的確に把握できる検査を行い寿命予測する。運転条件や環境条件も、設備に加わるストレスとして、逐次評価しながら寿命予測精度を高める。計装設備や電気設備の有寿命部品などにも適用できる。

(2) 故障率で寿命を定義する設備管理<sup>[108]</sup>

計装設備や電気設備は、有寿命部品を大量に使用しており、統計上の母数を確保でき、故障率で寿命を定義する設備管理が適用できる。採取したサンプル部品で劣化診断や劣化加速試験を行い、劣化の進行から故障に至るまでの時間を予測し故障率の管理を行う。予測した故障率と実プラントで稼働中の当該設備の故障率を対比しながら適切な周期で部品更新や補修を実施し、設備の信頼性の確保と予測の精度向上を図る。DCSの補修や更新時期に適用している。

(3) 設計寿命による設備管理

クリープ損傷の設計寿命は 10 万時間、アルミ電解コンデンサでは 8 年といった設計寿命を根拠に使用している部品があり、運転時間が到達する前に取替や更新する設備管理が適用できる。精度向上のために運転条件や運転期間の考慮は必須だが、寿命の確立された部位への適用は合理的である。

(4) 状態監視による設備管理

動機械の劣化の進展には、熱や振動、油中の金属摩耗粉などに顕著に表れる特性のものがああり、状態監視により異常の兆候を早期に発見して計画的に対応する設備管理が適用できる。劣化要因のストレスの変化と結果として表れる熱や振動、油中の金属摩耗粉などを OLM (On Line Monitoring) や OCM (On Condition Monitoring) のモニタリング技術、DCS の利用などで状態監視し、兆候を発見すれば予備機への切替え、運転レートの変更、冷却の強化、回転数の変更などの措置で対応する設備管理である。

(5) 劣化させない設備管理

劣化メカニズムを解明し寿命に影響する劣化要因や促進要因を明らかにして、排除または抑制すべき因子を管理し、その結果を監視、フィードバックして制御を行う設備管理がある。設備の劣化要因や促進要因の状態監視を行い、腐食しない条件範囲での運転管理、凝集分散の他、重合や腐食防止のための薬液注入、pH 調整などで劣化させない対策を行う以下のような例がある。

- ・電気室の電子部品、DCS 部品に対する設置環境の改善による劣化進行速度の抑制
- ・プロセス因子による腐食に対するインヒビター、添加剤の注入や pH 調整による抑制
- ・フィルターによる汚れた因子の除去
- ・温度や圧力、流速等の運転条件と劣化を促進させる条件から劣化させない条件の探索と運転条件の変更

## 2) 寿命予測への取り組み

寿命予測への取り組みは、設備の寿命に影響する要因を検討し、寿命支配要因を特定して、劣化現象を把握できる属性を設定する。その属性を的確に把握する測定技術、測定の結果から寿命予測を行う評価技術を確立していく。寿命支配要因に応じた取り組みができるよう寿命予測の方法について、概要と目的、予測技術、方法の解説、適用事例、適用における問題点、注意事項について表2.25の統計解析による推定に基づく寿命予測のように整理する。

表2.25 統計解析による推定に基づく寿命予測

タイトル	極値統計解析により推定された極値データによる予測
概要・目的	直接的な検査法で評価が困難な孔食等の局部腐食の寿命予測方法として、かなり応用されている手法。腐食環境が均一な装置への適用が望ましい。
予測技術・方法の解説	実装置のごく一部分における最大侵食深さデータの極値確率分布から、装置全体の中での最大侵食深さを求めて寿命を予測する。
適用事例	多管式熱交換器のチューブの孔食であれば、停止時にサンプルを抜管して検査し、そのデータから全体の最大侵食深さを求める。 タンク底板の一部分の孔食深さデータから、タンク底板全面における最大孔食深さを求め、寿命を予測する。
適用における問題点・注意事項	適用できる設備の範囲に限られる。均一な腐食条件であることが必要で、若干の条件の違いにより腐食（速度）が変わる場合は精度が下がる。 精度を上げるためにサンプルを多くすると経済性が悪くなる。 腐食が偏在しているような場合は、サンプル採取ポイントで評価が変わる。
タイトル	ワイブル確率等を利用した寿命予測
概要・目的	DCSの故障率の予測で寿命予測を行う。DCSの故障予測の為、環境条件（温度、湿度、腐食性ガス）の加速試験を実施、得られたデータからワイブル確率紙（稼動年数同一の場合）及びハザード確率紙（稼動年数同一の場合）にて故障率を予測。
予測技術・方法の解説	確率紙上から $m$ 、 $\eta$ を求め、下記式にて故障率を予測する $\lambda(t) = m \cdot t^{m-1} / \eta^m$ $\lambda(t) : t \text{ 時間稼動時の故障率, } t : \text{稼動時間}$
適用事例	DCS 劣化診断（加速試験）結果の解析、故障予測 ワイブル確率紙：金メッキタブ、アルミ電解コンデンサ ハザード確率紙：アルミ電解コンデンサ、可変抵抗
適用における問題点・注意事項	基礎実験により、実使用環境と加速試験の条件を適切に求める必要がある。 腐食性ガスは、成分及び湿度が異なると腐食の進行に差異が出る。

設備の寿命を予測する方法論として、決定論と確率論がある<sup>[94]</sup>。過去の実績や故障物理を駆使して各種パラメータの関連から劣化モデルを構築し、寿命予測を行う決定論的アプローチと、寿命を統計的に処理して母数が小さければばらつきが大きい、十分に大きく取ると収斂するような場合に寿命予測に利用できる確率論的アプローチである。寿命予測には以下の取り組みが考えられ、寿命支配要因に応じた最適な方法を適用する。

### (1) 過去の寿命実績による寿命予測

同じ設備や類似設備の実績に基づく寿命予測で文献による場合もある。

### (2) 傾向管理データに基づく寿命予測

減肉や変形などの劣化属性の計測と進展過程の比較で測定結果による寿命予測

### (3) 統計解析による推定に基づく寿命予測<sup>[108],[109]</sup>

極値統計解析により推定された極値データによる寿命予測やワイブル確率を利用した寿命予測

(4) モニタリングによる寿命予測<sup>[110]</sup>

実機取付けテストピースによる材質劣化、電気抵抗式や電気化学的腐食測定法、溶液中の溶出金属分析などのモニタリングと劣化の進展過程の比較による劣化パターンのモデルによる寿命予測

(5) 実験（促進試験）結果の管理データに基づく寿命予測

実機サンプリング部材の機械強度試験、腐食促進試験、疲労強度試験などの結果による寿命予測

(6) 劣化モデル構築による寿命予測<sup>[111]</sup>

物理モデルの構築による劣化速度判定と寿命予測

(7) マスターカーブとの比較による寿命予測<sup>[112]</sup>

公知のマスターカーブや金属組織と劣化進行の対比による寿命予測

3) 寿命予測の活用

寿命予測への取り組みで示したシーズとしての寿命予測の方法とその技術の適用例に対して、ニーズとしての対象設備の部位ごとの劣化モードに対する効果的な寿命予測の手法を整理することが求められる。機種別に部位ごとの懸念する劣化モードを示し、劣化モードに応じた的確な寿命予測の手法と適用上の留意点や対象設備を適用範囲にまとめて整理する。表2.26に機械、表2.27に電気の専門ごとの事例を示すが、効果的で的確な寿命予測の活用が可能となるように作成する。

表2.26 寿命予測の活用（機械）

専門グループ（機械）				
機種	部位	劣化モード	適用寿命予測手法	適用範囲
炉	反応管 加熱管 火炉管	クリープ損傷	ボイドフィッシャーの超音波探傷検査の透過減衰量による寿命予測	改質炉反応管
			金属組織検査結果のバッチル破壊モードによる寿命予測	
			クリープラプチャー試験によるラーソンミラーパラメーターのマスターカーブを使用し、寿命予測する	加熱炉全般に適用するが、プラントによりパラメーターの係数の取り方に若干の違いがある

表2.27 寿命予測の活用（電気）

専門グループ（電気）				
機種	部位	劣化モード	適用寿命予測手法	適用範囲
変圧器	コイル (絶縁紙)	強度低下	絶縁油中の「フルフラール量」を分析し、アッカー式を用いて寿命を予測する。	特高変圧器
			絶縁油中のCO + CO <sub>2</sub> 量を分析し、アッカー式を用いて寿命を予測する。	特高変圧器にフルフラール法と併用
			絶縁紙を直接サンプリングし、アッカー式を用いて寿命を予測する。	適用例なし (コイル吊り上げ要)
	絶縁油	性能低下	特性値の傾向管理	高圧変圧器

#### 4) 個別の寿命予測の基準

各種寿命予測方法について寿命予測の実施、判断、評価の際に活用できるように、個別に基準化する。例えば機械編では、定点の肉厚測定やガスケット締め付け面圧、腐食モニタリング、熱交換器の炭素鋼チューブの極値統計解析、加熱炉管のクリープラプチャ試験、金属組織対比法、水浸法超音波測定、MLAS（Mitsubishi Metallurgical Life Assessment）法による寿命予測など、電気編では、特別高圧変圧器や高圧電動機、高圧ケーブル、アルカリ蓄電池など、計装編では、DCSや容積式流量計、自動調節弁、自動ボール弁などの寿命予測の適用に際して誤った操作や評価をしないように基準化する。専門技術の教育や技術伝承のツールとしても利用でき、精度向上や効率化等の改善に取り組み、審議の手続きを経て基準への反映や見直しを行えば技術の向上と展開も図れる。個別に基準化した寿命予測の例として図2.28、図2.29、図2.30にクリープラプチャ試験の寿命予測を示す。基準の構成は、以下の項目を満足するよう策定すればよい。

- (1) 目的・適用範囲
- (2) 寿命予測の方法（劣化のメカニズム、劣化特性、診断方法、寿命予測の手順）  
劣化のメカニズムは、劣化の現象、特徴、懸念部位、劣化特性や診断方法  
寿命予測の手順は、安全対策や処理、動作原理、前処理、補正、精度
- (3) 判定基準（判定基準の根拠、フロー）
- (4) 寿命予測後の措置（寿命予測の精度の向上、劣化対策、時期）
- (5) 予測結果の評価（結果の評価、予測手法の見直し）
- (6) 検査周期（寿命予測の時期、頻度、標準の検査計画）
- (7) 記録（記録の作成、記録の分析評価、記録の活用）
- (8) データの活用（精度向上、効率化、基準の見直し）
- (9) 寿命予測の実施例、補足資料

### 加熱炉管のクリープ損傷の劣化のメカニズム

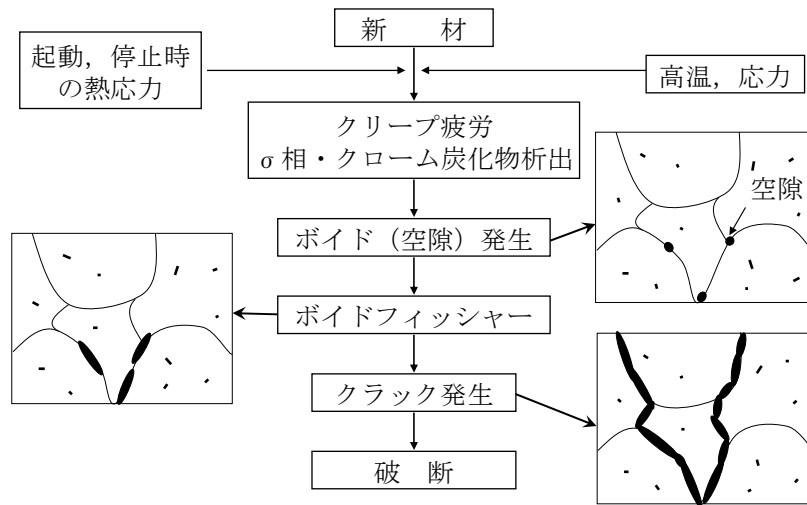


図2.28 個別の寿命予測の基準の例

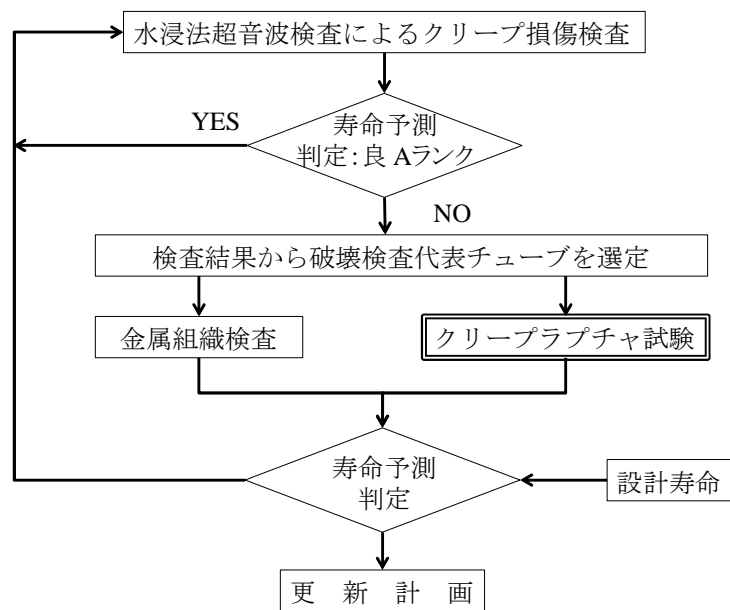


図2.29 クリープラプチャ試験の寿命予測フローの例

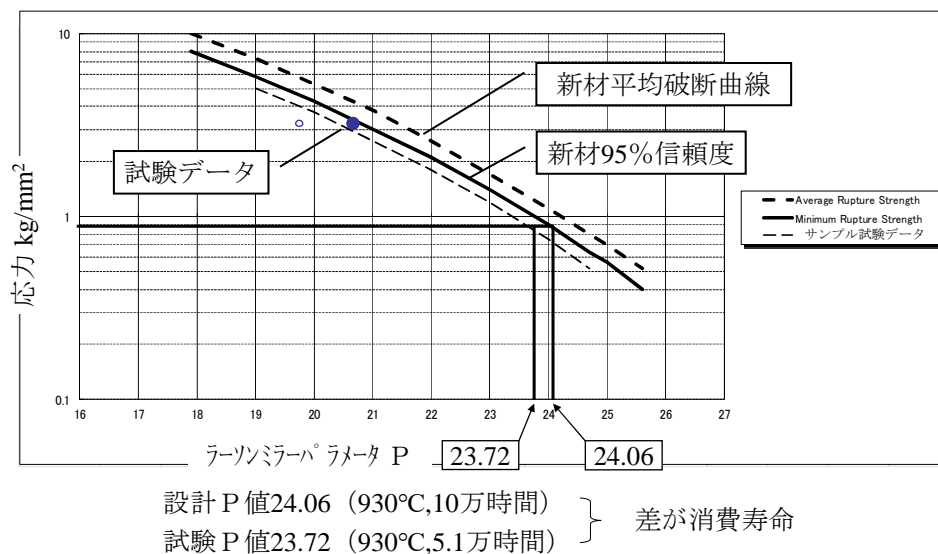


図2.30 クリープラプチャ試験の寿命予測の例

### 5) 寿命予測の実施例

実際に適用した寿命予測の事例を寿命予測の概要、適用範囲について参考にできるように整理する。寿命予測の適用例の目次の例を表2.28 に示す。専門グループごとの機種別に、さらに適用した部位と寿命予測の内容、どのプラントのどの設備に適用したかの適用例を整理すれば適用できる寿命予測の技術MAPにもなる。電気ならば変圧器や電動機、高圧ケーブル、直流電源装置などの機種にコイルや絶縁油、絶縁体、蓄電池などが部位になる。計装ではDCSや電子式伝送器、オーバル流量計、自動調節弁を機種として、可変抵抗器や電解コンデンサ、基盤、軸受、本体、ポジショナー、駆動部などが部位になる。機械では塔・槽、熱交換器、加熱炉、配管、動機器などが機種となり、構成する主な部位や部品に適用する寿命予測が対象となる。実施した寿命予測の概要、対象設備、寿命予測の根拠と方法、判定基準、評価・効果、寿命予測結果の例、寿命予測の計画や活用などを記述していけば、個別の寿命予測の基準化までは作成が困難でも、その実施例は後の寿命予測の採用時に非常に参考になる。事例を重ねることで、基準化も視野に入ってくる。図2.31 に加熱炉の吊下げ管の寿命予測の実施例を示す。



表2.28 寿命予測の実施例（目次）の抜粋

機種（加熱炉）	専門グループ（機械）	
部位	寿命予測内容	適用例
反応管	改質炉反応管の寿命予測 ボイドフィッシャーの超音波探傷検査の透過減衰量と代表管の金属組織検査結果のBATTELLE破壊モードとの比較、クリープラプチャ試験によるラーソンミラーパラメータによるマスターカーブを使用した寿命予測を使い分ける。	Aプラント F-100 Bプラント F-200 の更新時期決定
熱膨張 吸収管	改質炉熱膨張吸収管の変形傾向による寿命予測 クリープ変形量、歪み量の管理データの傾向から限界値に達する時間を外挿し寿命を予測する。	同上
	粒界酸化深さによる熱膨張管の寿命予測 粒界酸化層深さと機械的性質及び変形の扁平率を併用で管理。データの傾向から限界値に達する時間を外挿し寿命を予測する。	同上
火炉管	加熱炉の火炉管寿命予測と実績評価 クリープラプチャ試験によるラーソンミラーパラメータのマスターカーブを使用し寿命を予測する。	Cプラント F-300 の更新時期決定
吊下げ管	加熱炉の吊下げ管の寿命予測 クリープラプチャ試験によるラーソンミラーパラメータのマスターカーブを使用し寿命を予測する。	Cプラント F-300 の寿命評価
過熱管	加熱炉の過熱管の寿命予測 クリープラプチャ試験によるラーソンミラーパラメータのマスターカーブを使用し寿命を予測する。	Dプラント F-400 の輻射部低温側の 寿命評価

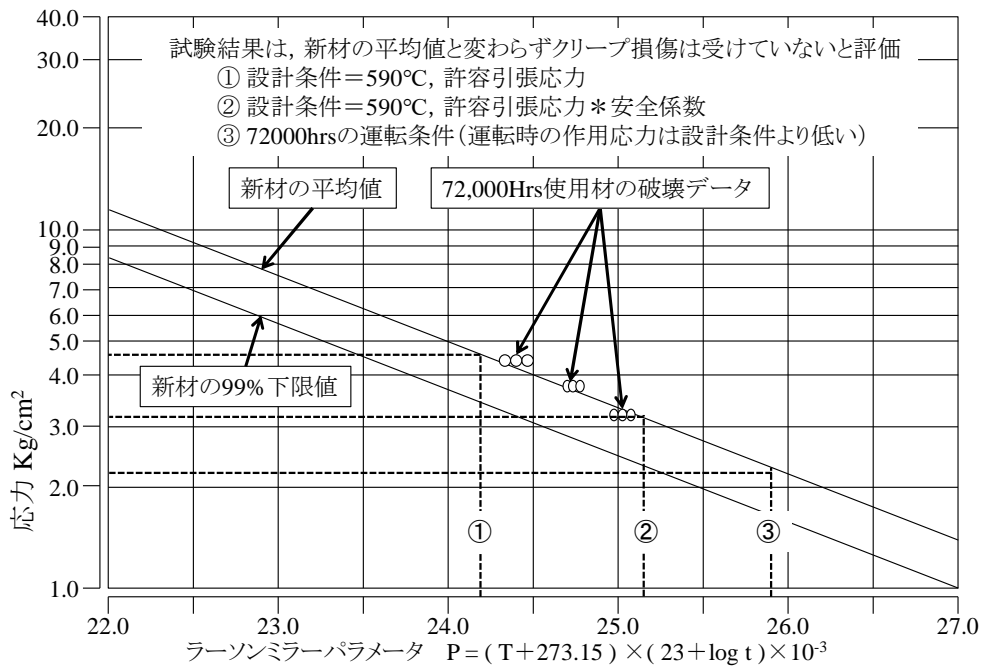


図2.31 加熱炉の吊下げ管の寿命予測の実施例

## 2.7.4 運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理

長期安全安定操業の達成のためには、図 2.32 の長期安全安定操業への取り組み<sup>[27],[29],[39]</sup>に示すように、「運転期間以上の機能確保」と「寿命到達前の適切な処置」が必須であり、そのためには「劣化させない運転・設備管理」と「寿命予測に基づく設備管理」が確実に行われねばならず、それを運転・設備管理部門が一体と成って可能な限り網羅的に検証を行い不足があれば対応を取る。寿命予測に基づく設備管理は設備ごとでは無く、その設備管理上の管理部位ごとに管理手法を決定して行う。また寿命予測のためには日常の管理、運転がどのように行われているかを評価する必要がある、予測結果のばらつきや誤差はその把握の程度に左右される。網羅的検証を効果的、かつ漏れ無く行うために体系的に取り組むことが必要であり検証手法を構築した。

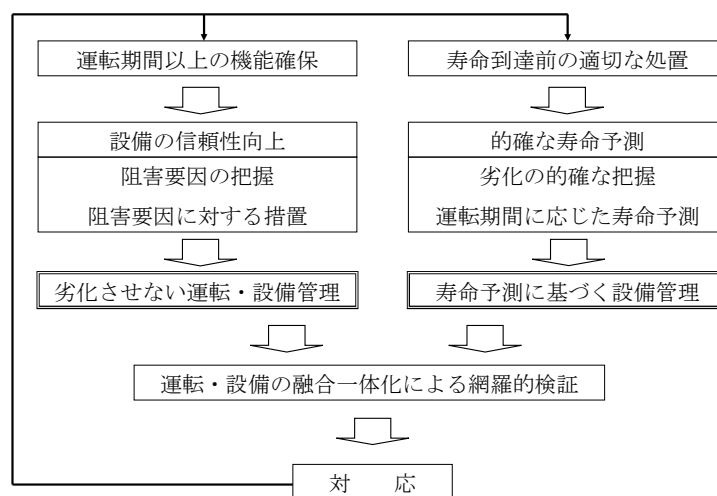


図2.32 長期安全安定操業への取り組み

プロセスを起因とした障害要因を洗い出し、劣化のメカニズムと要因に対する運転上の管理、監視、措置項目の確認と評価を「運転管理シート」に整理する。運転管理に基づく設備の劣化要因を管理部位まで掘り下げて、劣化メカニズムから設備の機能喪失時の影響と寿命を予測し、寿命予測を基にした設備管理の手法を「設備管理シート」にまとめ障害要因と対応を検証する。運転・設備管理部門が一体となって運転管理シート、設備管理シートの検証を行うことで、相互間で運転管理項目、設備管理手法の補完を行い長期安全安定連続運転のための融合一体化を図る。図 2.33 に長期安全安定操業の検証の体系的取り組みイメージを示す<sup>[27],[39]</sup>。運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理を可能とする網羅的な検証と体系的な取り組みについて「運転管理シート」と「設備管理シート」を説明した。取り進めるには、まず検証の体制を整える。運転管理部門から当該施設の運転管理に精通しており流体の物性等、運転面の特性にも詳しいベテラン、設備管理部門から当該施設の設備管理に精通しており設備面の特性にも詳しいベテランを選出する。この両方で検討チームを構成し、さらに必要に応じて腐食等の劣化メカニズムに詳しい専門家や保安面からのアドバイスのために保安管理部門の専門家が加わり詳細な検討を行う。設備の部位ごと

の体系的な検証と検証を通じた設備管理レベルの向上を可能とする具体的な遣り方について以降に述べる。

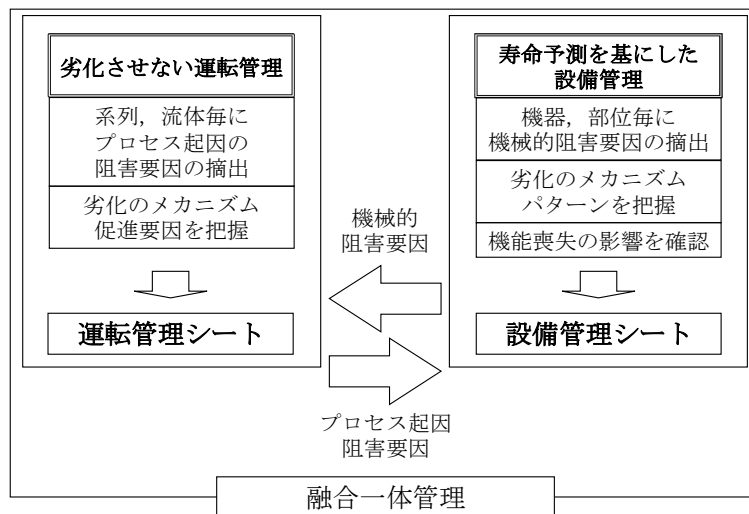


図2.33 長期安全安定操業の検証

### 2.7.5 運転管理シート [27],[28],[39],[48]-[50],[105]

運転管理シートによる体系的検証は以下の手順で行い、抽出したプロセスの阻害要因に対する運転管理要領を評価する。プロセスの阻害要因と定めた運転管理要領は設備管理シートに引き継いで反映する。

#### (1) 系列フローシート

プロセスの工程を流体で整理し、系列を定義する。

プロセスを起因とした長期安全安定操業の阻害要因を検討する際、その基となるのはプロセス流体である。プロセスのフローは通常、工程ごとにその性状を変化させながら次工程へと進んでいく。そこで系列ごとに入口・出口の流体を整理した各系を定義するフローシートを作成する。図 2.34 にこの系列フローシートの例を示す。

#### (2) 系別流体リスト

系列ごとの流体を整理し全流体を把握する。

定義された系列ごとに流体を整理し、系別の主要な流体の一覧表を 表 2.29 の系別流体リストの例 のように作成する。

#### (3) 流体別含有物質リスト

流体中の全含有物質を把握する。

系列ごとに定義された流体には長期安全安定操業の阻害要因と成り得る物質が含まれており、これらの微量成分までを整理した流体別の含有阻害物質の一覧表を 表 2.30 の流体別含有物質リストの例 のように作成する。表の横軸は系別流体リストの流体名称と同じで、縦軸を系列名から含有物質に変更したものである。

#### (4) 運転管理シート

系列ごとにその流体に含まれる阻害物質により発生する可能性のある劣化現象を洗い

出し、その現象ごとに劣化のモード、阻害物質の各成分含有量、劣化のメカニズム、劣化が発生する要件である劣化促進要因を図 2.35 の運転管理シートの例のようなシートに整理して記述する<sup>[28]-[30],[39]</sup>。

- ・劣化現象の抽出

阻害物質と成り得る流体中の含有物質から懸念される劣化現象を抽出する。例として重合性炭化水素の塔内での熱重合によるトレイやノズルの閉塞、コーク、ポリマーの塔内、配管内での堆積による閉塞や配管に衝突することによるエロージョンの発生、酸性ガスや有機酸による腐食などがある。

- ・劣化現象の把握

各劣化の現象・モードについて発現のメカニズムを明らかにして、発生促進要因を把握する。発生促進要因が劣化現象に対する運転管理のポイントとなる。

- ・運転管理への反映

劣化現象の発生促進要因を抑えるように管理値や管理方法を定めて、運転管理方法に具体的に反映させる。

- ・兆候の早期把握

劣化現象の兆候を早期に把握するため OLM、DCS での常時監視やプロセスコンピュータに取り込みトレンド監視などの運転監視項目を確認する。

- ・措置の設定

運転管理、運転監視の状況から劣化現象を抑える制御や措置、その結果や効果の確認方法を設定する。さらに異常現象が発生した時の措置事項を記載する。

#### (5) 運転管理・監視項目リスト

管理のための項目が適切で正しい部位に対応しているか、監視のための項目が適切で正しい代表部位と成っているかを確認する。

運転管理・監視している項目の管理値と管理方法を 表 2.31 の運転管理・監視項目リストの例のようにまとめ、それらを評価して長期安全安定操業に対する阻害要因にはならないことを確認する。

#### (6) 評価

長期安全安定操業に現状の運転管理で問題無いことを確認する。

プロセスを起因とした阻害要因に対する項目の網羅性や管理値の妥当性、監視部位の適正度や運転管理面での抜けが無いことを確認するには運転管理シートによる検証が有効である。また第三者の目を入れての運転管理面の妥当性の確認も、定まった書式やルールに基づき作成された運転管理シートであれば容易となる。運転操作のマニュアル化で作成された SOP を運転管理シートの代替とするには、定量的な管理値とともに運転操作の Know How や Know Why が記述されている必要がある。日々の運転管理では SOP に記載された手順通りに操作を行うので、検討結果は SOP に反映されていることが必要である。長期安全安定操業の検証を行うには運転管理シート作成時に考慮した阻害要因を設備管理シートに引き継いで設備管理面からの検証を行う。

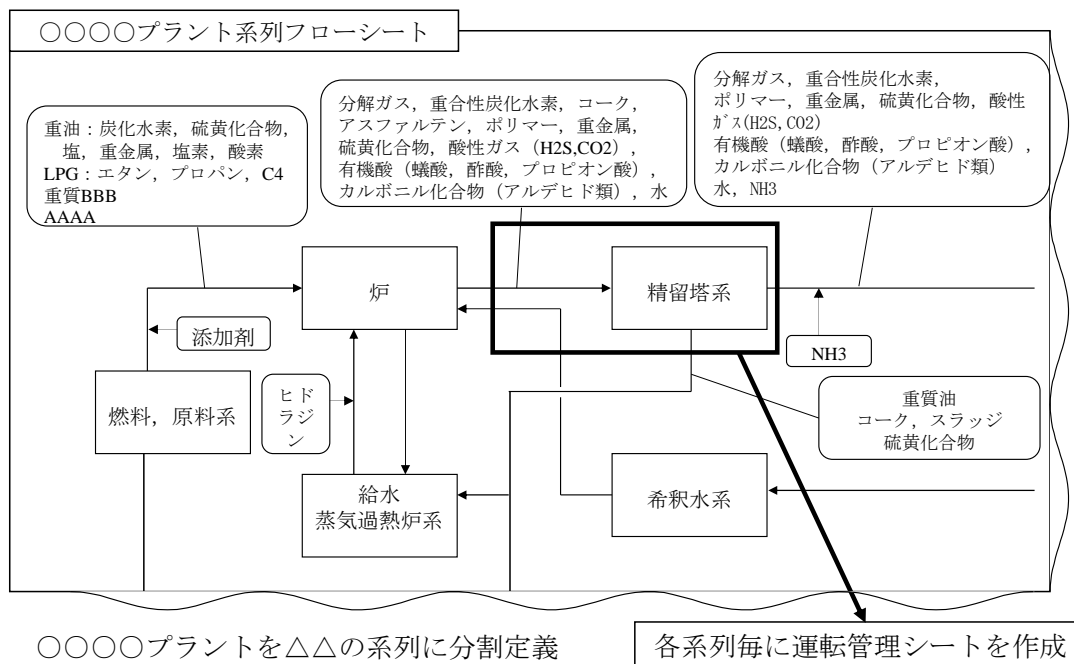


図2.34 系列フローシートの例

表2.29 系列別流体リストの例

系列名	流 体 名 称													
	GH	RG	RGS	ETY	ETA	PPY	PPA	NH3	GN	GF	SM3	SM13	SM30	SC
	水素	メタン	メタン	エチレン	エタン	プロピレン	プロパン	アンモニア	窒素	燃料ガス	3K蒸気	13K蒸気	30K蒸気	復水
炉系										○	○	○	○	
精留塔系								○	○	○	○	○		
冷却塔系	○	○	○	○	○	○	○							○
洗浄塔系								○						○
再冷水系								○						○
フレアー系	○	○	○	○	○	○	○		○	○				
原料系	○		○	○	○	○	○			○				
圧縮系				○		○								○
高温系				○	○	○	○						○	

表2.30 流体別含有物質リストの例

含有物質	阻害現象	流 体 名 称											
		GH	RG	RGS	ETY	ETA	PPY	PPA	NH3	GN	GF	SM3	SM13
		水素	メタン	メタン	エチレン	エタン	プロピレン	プロパン	アンモニア	窒素	燃料ガス	3K蒸気	13K蒸気
炭素	浸炭割れ			○							○		
芳香族系重合性炭化水素	汚れ閉塞										○		
ジエン系重合性炭化水素	汚れ閉塞						○						
コーク	汚れ閉塞										○		
アスファルテン	汚れ閉塞										○		
ポリマー	汚れ閉塞		○	○			○				○		
硫黄化合物	触媒被毒	○		○	○		○				○		
H2S	腐食			○									
CO2	腐食		○		○	○	○		○				

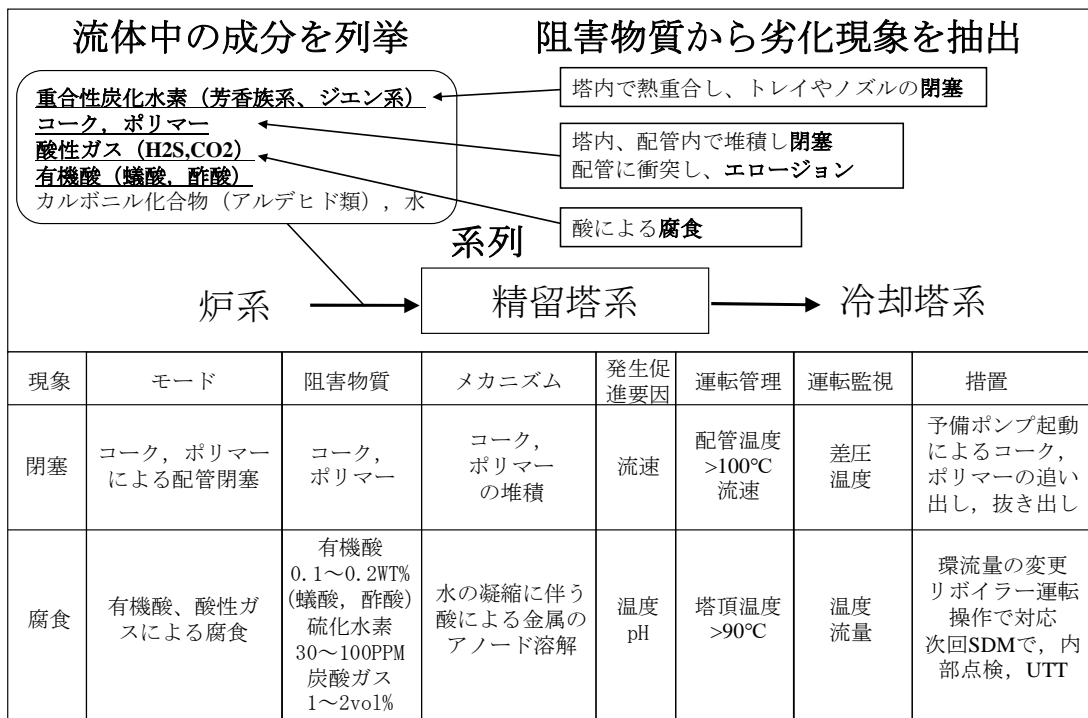


図2.35 運転管理シートの例

表2.31 運転管理・監視項目リストの例

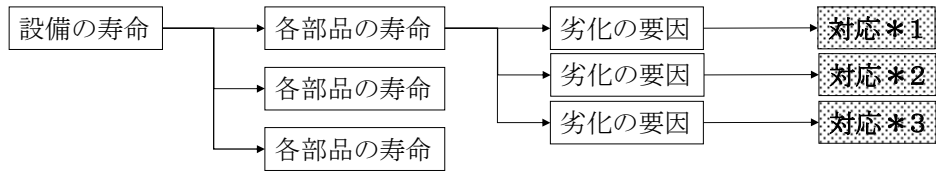
機番	機器名称	法規	系列	運転管理シート		
				管理・監視項目および管理値	方法	TAG.No
T-100	精留塔	危険物製造所	精留塔系	塔頂温度 90~105℃	DCS	TI001
				塔底温度 180~200℃		DCS
				塔内温度分布	プロコン	ソフト
				塔底抜出配管表面温度 100℃以上	現地測定	温度計
				中間抜出流量 1~1.5T/H	DCS	FC001
				上部抜出流量 2~3T/H		DCS
				FCVのPV-MV相関 液面計指示 (LGとLCの指示差)	プロコン	FC001/002
					現地指示	LG001
					-DCS	-LC001
				全差圧 1000mmH2O	DCS	PD100
				塔底差圧 100mmH2O	DCS	PD001
				中間段差圧 50mmH2O	DCS	PD002
				塔頂差圧 30mmH2O	DCS	PD003
				重合速度 (中間, 上部) 5以下	プロコン	YA001/002
重合性炭化水素濃度 スチレン 5wt%以下	プロコン	YB001				
ジェン 2wt%以下	プロコン	YB002				
原料油中硫黄分 3000ppm以下	原料分析	sampler				

### 2.7.6 設備管理シート<sup>[1],[27]-[29],[39],[48]-[50]</sup>

長期安全安定操業の確保のためには、阻害要因と成り得る事項を体系的、網羅的に抽出し、それらに対して適切な設備管理を遂行することが必須であり、設備管理の検証を行うツールとして設備管理シートを提案した。

#### 1) 設備の設備管理手法の設定

寿命予測を基にした設備管理では図 2.36<sup>[38]</sup>に示すように設備の寿命がベースとなり、設備の寿命はその設備を構成する部品ごとの寿命により決定される。さらに各部品の寿命はいくつかの劣化の要因を持っており、設備管理の対応はその劣化の要因ごとに適切な手法が設定されなければならない。すなわち劣化の要因ごとに設定される設備管理の対応は、図中のマトリクスに示すように異常の早期発見をパトロールによるのか、センサーを使った監視装置を適用するのか、運転中の検査の体制からは、周期を定めた定例検査、傾向管理、精密検査による判断の設定、得られた運転中のデータから解析評価する技術の適用を既存技術や開発により設定する。停止中の検査の体制では目視の要領、NDIの適用、サンプリングや破壊検査による寿命評価、得られたデータから解析評価する技術の適用、さらには、運転中と停止しての検査から得られたデータの比較検証による関連性を解析評価する技術の適用を設定する。長期安全安定操業の確保に必要なならば、設計余裕の向上、2 out of 3 などによる計器の冗長化、余裕のある管理値の設定などに踏み込む。供用運転期間に問題があるようなら阻害要因の把握と措置による改善を検討する。



体制	異常の早期発見		OSI 運転中				SDI 停止開放				OSI/SDI	設計冗長化	改善	
	パトロール	OLM	定例検査	傾向管理	精密検査	解析評価技術	目視	NDI	サンプリング	破壊検査	解析評価技術	関連性解析評価技術	2out of3設計余裕管理値	阻害要因の把握と措置
対応*1														
対応*2														
対応*3														

図2.36 設備の設備管理手法の設定

具体的な事例を表2.32の設備の設備管理手法の設定で説明する。保全等級Aランク(2.4.2設備の保全方針の設定 参照)の往復動圧縮機の異常の早期発見の体制からOLMについて検討する。管理すべき部品と異常を検知するための項目でマトリクスを構成しており、シリンダー弁の吸込では、吸込温度、吐出温度、指圧線図、吸込圧力、吐出圧力がOLMの対象となり、異常の早期発見のためにデータ採取が行われ評価されていなければならない。同じく保全等級Aランクの回転圧縮機の運転中の検査OSIについて検討する。管理すべき部品と異常を検知するための項目でマトリクスを構成しており、部位に生じる異常現象を小分類し、項目には採用する検査手法を記述している。発生が懸念される異常現象をどの検査手法で解析評価するのかを設定する。いずれも設置後ではセンサー取り付けやサンプリング採取の加工が不可能な場合もあるので、設置前に加工が施されていることが条件となり、建設時に保全等級に応じた仕様とすることが必要事項となる。しかしながら通常は、メーカーの推奨により設定されることが多く、保全等級に応じた仕様になっていないケースがある。このように各々の設備の弱点を抽出し、部品レベルで劣化損傷の形態とその過程を明らかにし、弱点を改善、あるいは管理する手法を世の中にある技術を適用して設定する。対応を検討するマトリクスにおいては劣化の要因が辿る形態とその過程を明らかにして、予め定められている機器の保全等級とそれに応じた保全方針に従い該当すべき欄が埋まるように設定する。Aランクの設備は機種ごとに定められたマトリクスの必要項目が埋まるように、場合により診断技術を開発する必要がある。冗長性向上の項目では、インターロックを含めた各種OLMが機種と保全等級で定められて、それらを満足する必要がある。



表2.32 設備の設備管理手法の設定

例. Aランク 往復動圧縮機 <OLM> A:アラーム S:停止

	吸込温度	吐出温度	指圧線図	吸込圧力	吐出圧力	軸受温度	油圧	油温	振動計	...
シリンダー弁吸込	○	A	○	○	○					
シリンダー弁吐出	○	A	○	○	○					
ピストンリング			○							
主軸受						A	A・S	○	A	
...										

例. Aランク 回転圧縮機 <OSI>

		油分析	SOAP	フェログラフィ	軸振動	軸移動	漏洩量	位相	..	..
軸封	漏洩	○					○			
軸受	磨耗	○	○	○	○	○				
	油膜切	○	○	○	○					
	オイルホップ				○			○		
	面圧異常	○	○	○	○	○		○		
軸	アンバランス				○	○		○		
	接触	○	○	○	○	○		○		
	スラスト異常		○	○	○	○		○		

2) 設備管理シートの作成<sup>[27],[28],[39],[48],[49]</sup>

設備管理手法の設定は部品ごと、劣化要因ごとに対応しなければ成らない。機器ごとの管理では部品単位の寿命に差があり、その機器の律速に併せて設備管理計画を立てるので、個々の構成部品ごとに寿命予測を実施し、律速を基に設備管理を行う。設備の部品ごとでは、その展開の要領にもよるが部品の数量が膨大になるので、設備のユニットやコンポーネントの管理すべき単位とするのが有効であると考えられ管理部位を検証の単位とした。

寿命予測には劣化メカニズムの解明が必要である。材質、肉厚、回転数のような設備が持っている固有の特性や、流体、組成、腐食性、スラリー等の運転特性を考慮しながら予測される劣化現象を抽出する。

設備ごとにプロセスを起因とした阻害要因に対する検証を実施する。そのために前述の流体別含有物質リストに記載された含有物質を設備ごとに整理した表 2.33 に示す一覧表を作成して、設備ごとの流体を定義する。微量成分までの流体と部品の材質の組合せで考えられる劣化モードを抽出し、管理部位ごとに劣化モードとの組み合わせで阻害要因を洗い出す。劣化要因と促進要因の条件等、その関係を明確にした上で故障物理等により劣化パターンを決定する。経時的な変化を把握するために管理すべき項目を的確に掴み、検査を行い、寿命予測を行う。ここで、寿命予測の評価には、故障予測のワイブル分布 (Weibull distribution) や極値推定のガンベル分布 (Gumbel distribution) など統計手法<sup>[14],[113],[114]</sup>も用いるが、多くは単純な直線やべき乗曲線での予測で十分である。

プロセス流体からの阻害要因に、機械的な劣化要因を加えて、劣化現象を発生し得る管理すべき部位を設定する。各部位ごとに設備別流体リストと運転管理シートによる運転管理要領から阻害要因と成り得る劣化現象、さらに設計条件、運転条件、および構造等から懸念される機械的劣化現象を抽出する。その現象ごとにモード、メカニズム、因子、発生促進要因、劣化パターンをさまざまな知識データベースを参考にして、表 2.34 に示す「設

備管理シート」[1]-[3],[29]-[32],[34]-[38],[86]に記述する。設備の部品ごとに、網羅した劣化モードごとの適切な設備管理手法を選択していき、体系的にかつ論理的に網羅的な検証を行うツールとして設備管理シートを開発した<sup>[105]</sup>。シートを作成し検証することで関係者の技術レベルの向上に繋がるのが期待できる。

表2.33 設備別流体リストの例

機番	機器名称	系列	流 体 名 称							
			芳香族系 重合性 炭化水素	ジエン系 重合性 炭化水素	コーク	アスファ ルテン	ポリマー	硫黄 化合物	H2S	...
T-001	精留塔	精留塔	○	○	○	○	○	○	○	○
T-002	冷却塔	冷却塔	○	○		○	○	○	○	○
T-003	濃縮塔	高温	○			○		○		
T-004	蒸発塔	高温	○			○		○		

設備管理シートによる体系的検証は以下の手順で行う。設備の1基ごと、管理部位ごとの阻害要因の抽出と明確化により寿命予測を基にした設備管理の集大成を図る。

(1) 設備別流体リスト (表 2.33)

系別流体リストと流体別含有物質リストから設備別に流体を整理し把握する。

(2) 設備管理シート (表 2.34)

・ 阻害物質の明確化

プラント・系・機種・機器番号などの機器仕様、運転温度・運転圧力などの運転条件、運転管理シートで抽出した阻害物質を記載して明確化を図る。

・ 管理部位の設定

設備を構成している部位を抽出し、プロセス、材質、構造等を考慮して設備を管理すべき部位まで掘り下げ、劣化現象の発生し得る管理すべき部位を設定する。機械設備の機種ごとの管理部位の事例を表 2.35、電気設備の変圧器の事例を図 2.37 に示す。

・ 劣化現象の明確化

劣化現象ごとに劣化のメカニズム、パターン等を明確化する。管理部位ごとに運転管理シートからの情報からプロセス起因の阻害要因を抽出し、設計・運転条件・構造等から設備的阻害要因となり得る劣化現象を抽出して、劣化のモード、メカニズム、因子、発生促進要因、劣化のパターンの明確化を図る。劣化パターンは極力劣化状態を把握でき寿命予測が可能となる式で表す。劣化パターンの式化では、直線式  $y = Ax$ 、

べき乗則  $y = Ax^n$  程度の適用で始め実績により修正すれば良い。

- ・影響の評価

劣化現象が発生した場合のプラントに与える影響の評価により管理手法を検討するため、部位の機能喪失内容と喪失時の対応からプラントへ与える影響を評価する。

- ・寿命評価と寿命予測

各劣化現象に対してどのような寿命予測手法を取るか、手法の評価を含めて検討する。寿命予測の手法を適用して寿命を評価し、長期安全安定操業に対する検証を実施する。設備管理の律速項目を明確にするために A ; 4 年未満、B ; 4 年以上 8 年未満、C ; 8 年以上のように寿命のランク分けを行う。具体的な寿命予測の年数も可能な限り記載する。

- ・設備管理手法の整理

寿命予測を基にした管理・監視項目と管理手法の使い分け措置事項を記載する。寿命を予測するために管理すべき項目を運転監視項目も含めて記述し、どのように管理手法を使い分けして運転や検査の管理すべきデータを採取するのか記述する。管理項目が管理値に到達した際や劣化現象が発生した際に行う補修、掃除等の措置事項を記入して対応に問題の無いことを検証する。設備管理手法の設定で考慮すべき事項を表 2.36 に示す。

### (3) 評価

長期安全安定操業に現状の設備管理で問題無いことを確認する。

### 3) 設備管理シートの見直し<sup>[27]</sup>

設備管理シートは網羅的な検証を目的に作成するが経年による見直しが必要である。寿命予測の基になっている運転条件の変更や、検査結果のデータにより寿命予測の見直しが必要になる。使いこなして活用して内容の充実や書式そのものも見直し、新しい技術への取り組み等に繋げることが設備管理レベルの向上に必要である。また設備管理の遂行は寿命予測を基に順番を明確にしておけば毎回すべての項目について管理が必要な訳でなく、順番に片付けていけば良いので管理も容易である。管理表で寿命に基づき短い物から管理をすれば良く、すべての項目について確認していく訳ではない。補足をすると設備管理シートで検討した結果、問題なしと考えられる事項については、以降の運転条件の変更が無い限り配慮する必要がない。そのためにランクや余寿命について記述するようにしている。

設備管理シートでは記述欄が設けられていないが、寿命評価をした起点となる起点年月日、寿命到達年月日、寿命評価の結果を基に次回検査年月日を設定するのが設備管理を遂行する上で必須事項である。事例では設備管理シートの見直し修正時の管理面から設備管理のデータベースのシステムの中で年月日を設定するよう工夫されている。

属人ベースですべての設備管理シートの項目を管理する事は困難なことであるが、コンピュータ技術が発達し管理が可能な時代と成っている。筆者の経験からは自身で管理表を作成して管理するとかかなりの部分が記憶されており、特に注意を要する部分は明確で 400 ~ 500 基程度のプラント規模であれば管理はそうたいへんな事ではない。それ以上の規模になると属人的な管理では抜けなく遂行するのに困難が生じる。

設備管理シートはただ作る事が目的では無く、作る課程にも人材育成の要素がある。履

歴を知るということ、設備を知り設備管理の計画ができるということ、その後の改善でもどこをどのように直す必要があるかが容易に分ること、今後開発しなければならない劣化の検査技術も判明することなど、理解を深め意欲が沸き向上する要素がある。自身で作成すれば愛着も沸き理解・認識もできる。外注などで他者が作った物では成長の度合いは比すべくもない。設備管理は情熱が必要で運転管理と一体と成った寿命予測を基にした設備管理を表現したものが設備管理シートであり、その作成は運転管理部門とのコミュニケーションのためのツールにもなる。「作成する」の段階から「どのように向上させていくか」に視点を移し、見直しにより改善・向上していくという観念が設備管理シートには必要である。

#### 4) 設備管理シートの活用

作成や見直しの段階で人材育成、設備管理のレベル向上の要素があることは説明したが、その他にも以下の項目に活用する。

- (1) 規制緩和の認定事業者制度で要求される長期安全安定操業の必須事項である検証
- (2) 規制緩和の認定事業者制度で要求される高圧ガス設備の開放検査周期延長の根拠
- (3) 規制緩和の認定事業者制度で要求される危険源の特定活動における設備の発現リスク低減
- (4) ボイラー・第一種圧力容器設備の運転時検査の規制緩和における連続運転の根拠
- (5) 労働安全衛生法による化学設備の開放検査の法定周期を延長する際の根拠
- (6) 運転管理と一体の寿命予測を基にした設備管理の実践における運転管理項目とその監視ポイントの確認
- (7) 運転管理と一体の寿命予測を基にした設備管理の実践における設備管理手法の設定ツール
- (8) 運転管理部門と設備管理部門による運転・設備管理の審議やレビューでの反映事項の折り込み
- (9) 設備トラブルの未然防止のための確認、発生トラブルの再発防止のための歯止めの折り込み
- (10) 設備の弱点部位を管理するために必要な寿命予測や検査手法の向上技術の抽出
- (11) 設備管理に関わる知識データベースとして「技術伝承」のツール
- (12) CMMS（Computerized maintenance management system：設備管理情報システム）の検索機能による参照、比較、模倣、作成、検証、解析、評価、見直しなどによる情報の共有と横通し

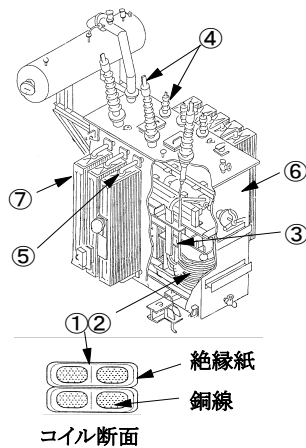
表 2.34 設備管理シートの例

AAAプラント	流体条件	系					装置					影響					管理の手法					措置事項
		部位	部位材質	型式	主要媒体と組	機構	主要駆動装置	重要因子			発生低重要因子	性能	対応影響	寿命予測	寿命評価	管理項目	管理手法の使い分け	措置事項				
								劣化	劣化	劣化												
原料油	重畳酸化水素	CO <sub>2</sub>	ボリマー	CO <sub>2</sub>	有機酸	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>					
SC10度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC20度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC30度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC40度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC50度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC60度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC70度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC80度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					
SC90度	SM400B	外部腐食	水分浸入による腐食	水分浸入による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食	劣化劣化による腐食					

表2.35 機種別管理部位（機械設備）の例

機種	管 理 部 位							
	塔	本体 (鏡・胴)	ノズル	内部金物 (トレイ サポ-トetc)	スカート	トレイ		
熱 交	本体 (鏡・胴)	本体 ノズル	チャンネル カバー	カバー ノズル	管板	チューブ (内面)	チューブ (外面)	ガスケット・ ボルトナット
炉	本体 ケーシング	APH チューブ	分解 チューブ	MIX チューブ	輻射 チューブ	節炭器 チューブ	過熱 チューブ	対流部 チューブ サポ-ト
圧縮機	ケーシング	ローター・ プレート	軸受け	ダイヤ フラム	段間 ラピッド パッキング	軸シール	ケーシング	
タービン	ケーシング	ローター・ プレート	軸受け	仕切板	段間 ラピッド パッキング	カバー	カップ リング	ケーシング ボルト
ポンプ	ケーシング	インペラ・ シャフト	軸受け		軸封		カップ リング	

油入変圧器の構造



	部位名称	構成材料	劣化形態
①	コイル	銅線	劣化しない
②	絶縁紙	絶縁紙	機械的強度低下
③	絶縁油	絶縁油	絶縁耐力低下
④	ブッシング	磚子	汚れ, 絶縁低下
⑤	ガスケット	コルク	変形, 亀裂
⑥	タンク, 配管	鋼板	発錆, 腐食
⑦	放熱器	鋼板	発錆, 腐食

図2.37 機種別管理部位（電気設備）の例

表2.36 設備管理手法の設定で考慮すべき事項

劣化の発現のプラントへの影響を考慮して、設備管理方式を設定する

寿命予測 (手法・評価)	寿命評価	監視項目	管理手法の使い分け	措置事項
<ul style="list-style-type: none"> <li>劣化モデル</li> <li>経験則</li> <li>傾向管理からの推測</li> <li>個別の手法</li> </ul> などの 寿命予測の手法 そのものの評価	寿命予測を 基に評価 結果から 手法の 見直し <ul style="list-style-type: none"> <li>OSI</li> <li>SDI</li> <li>OLM</li> <li>開放検査</li> </ul>	管理し、 監視すべき データ項目 <ul style="list-style-type: none"> <li>肉厚</li> <li>振動</li> <li>分析値</li> <li>温度</li> <li>流量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>OSI手法</b> 指圧線図・振動測定 ・油分析・SOAP・ フェログラフィー・ 軸振動・軸移動...</li> <li><b>SDI手法</b> 目視・サンプリング ・NDI・破壊検査</li> <li><b>OLM項目</b> 温度・圧力・流量・ 油圧・振動・</li> <li><b>ALARM</b> ・インターロック ・CONTROL</li> <li><b>パトロール</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>運転中</b> 予備機切替 ⇒ 兆候監視 部分停止 ⇒ バイパス・ バッファ・生産調整 運転条件変更 ⇒ 劣化させない 冗長化 全停止 ⇒ 設備改善・運転改良</li> <li><b>計画停止時</b> 寿命予測 ⇒ 停止時 (運転中) TBM 定期的更新 定期検査対応</li> </ul>

## 2.8 第2章の結言

第2章では、石油化学工業の概観から対象であるプラントの設備管理の課題を明らかにして、多目的最適化問題の解法となる本論文の重要性を述べた。解法である2項のアプローチ法は、合理的な解を得るリスクアセスメントを基にした設備管理の優先度設定と信頼性を向上させる段階的な5ステップの設備管理で長期連続運転の実現であり、論理的、体系的に標準化した技術で述べた。

プラントでは、事故に伴うリスクや経営に与える影響、コストを総合的に考慮して、経営判断と設備管理方針の同期が求められる。コスト削減必須の中、リスクへの傾注の必然からリスクアセスメントが必要である。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となる最適化の解の探索は難しいが、評価した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。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設備管理の計画から実行の標準化と定量化で、論理的な最適化の技術が目指せる。リスク評価による絞り込みのマネージメントの標準化した技術として、筆者が考案し実践してきた修繕費の優先度設定や設備管理計画への適用を示した。有限リソースで効果的な計画を実現する多数の関係者による合理的な意思決定手段としての評価も示せた。

- (1) 運転・設備管理部門が会して保全計画の項目を持ち寄り、抽出した項目を基に修繕費の予算を策定し、1案件ごとにリスク評価を行い実施の優先度を設定する。
- (2) 設備管理部門による信頼度の評価と想定故障によるシナリオを基に運転管理部門が影響度を評価する。最終責任はビジネスに関わるQCD案件を事業部、操業に関わるSE案件を事業所で分担し、実施する項目を決定する。
- (3) 効果として有資源の修繕費の適正配分のほか、リスク評価を通して経営層を含む企業内のリスクコミュニケーションやシナリオトレーニングなど世代間で保安と安全を意識したノウハウを共有する仕組みの構築もできた。

(4) リスクを中心とした設備管理の実践方法を保全方針や保全区分の設定の根拠となる保全等級への適用で提示した。

標準化した技術のモデル化が進めば数理的な解も得られるようになる。今後はリスクの根拠となる影響度と信頼度の定量化を可能とする取り進めが課題である。

プラントの長期連続運転の実現では、段階的な5ステップの設備管理で設備の信頼性の向上を図っていき、長期連続運転の実現で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する。筆者が実践してきた設備管理のレベル向上の施策の体系化と標準化した技術を示した。5ステップの段階的な設備管理は以下のように進める。

(1) 設備管理の体制の構築

運転管理と設備管理はプラントの操業開始で同時に要求され業務分掌による役割分担から知識や経験の維持と向上を図る体制の構築

(2) 安定運転の確保

異常兆候の早期発見による安定運転の確保で設備の寿命を発揮させる。異常兆候の早期発見の感性の維持向上も重要である。5S\*に始まるTPMの活動も運転安定化には大いに寄与する。

(3) 信頼性向上への取り組み

顕在化した故障の結果系から取り組むトラブルの再発防止による信頼性の向上である。発生した予期せぬ故障、すなわちトラブルは再発防止を図って信頼性向上に取り組む。原因究明では運転管理部門とのコミュニケーションが大切で、日常生活の状況が分らず仮説を立てて結果を導いては成らない。健康診断でも必ず医師とのコミュニケーションを取る時間が設けられている。設備管理部門にとって運転管理部門とのコミュニケーションを大事にする普段の姿勢が重要である。

(4) 安定連続運転への対応

阻害要因の腐食、磨耗、汚れ、閉塞、振動、疲労、経年劣化の原因系から取り組む安定連続運転への対応、原因系の阻害要因の把握から措置で安定連続運転を達成する。

(5) 長期安全安定操業の確保

網羅的な劣化モードの抽出で、寿命予測を基にした筆者考案の設備管理シートを使った長期安全安定操業への取り進めである。

最終的には長期安全安定操業の確保を目指し、設備管理の単位は設備から部位・部品に向かい網羅的な阻害要因の抽出と論理的な管理による対応が求められる。運転が長期化するのに伴い設備の寿命律速を明確にする必要が生じ、管理部位ごとの寿命予測に基づく設備管理を実施することが必要と成る。実現には運転管理と一体の劣化させない運転・設備管理と寿命予測に基づく設備管理が必要条件である。図 2.38 に供用期間に応じた設備管理の概要を示す。



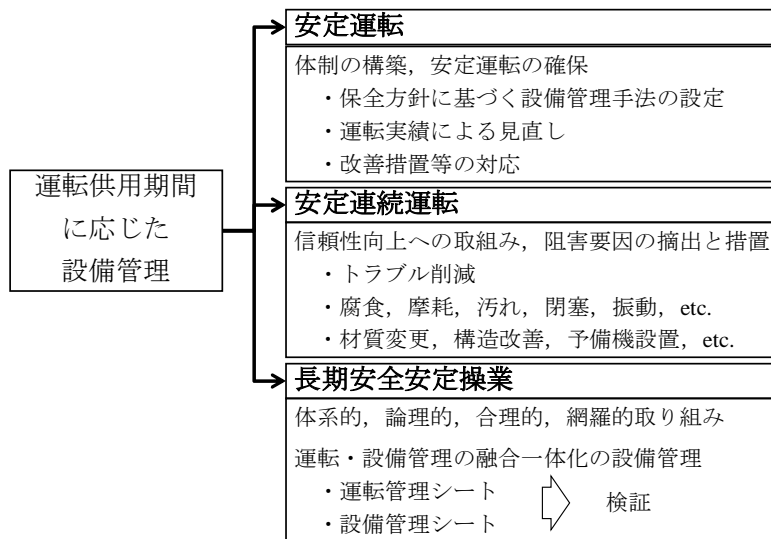


図2.38 供用期間に応じた設備管理

寿命予測を基にした設備管理では、日常の生活がどのように営まれているかの運転管理が非常に重要で、運転条件で寿命が決定される。定点の肉厚測定による測定データを基に最小二乗法などの近似線で寿命予測をするイメージを図 2.39 に示す<sup>[38]</sup>。直近の2点の減肉の傾きが違っており、減肉に影響する流量、温度、腐食成分の濃度などのストレスが変化しておれば、直近2点を結ぶ直線近似による寿命予測をすべきで、全測定データの近似線とは予測結果が異なる<sup>[30]</sup>。従って運転管理と設備管理の融合一体化が必要で、お互いの管理を網羅的、体系的に検証する手法が必要と成る。さらに信頼性の高い精度の良い検査技術が不可欠で適切な検査手法、寿命予測が適用できる体系化が必要となる。設備の劣化を的確に把握する技術、採取された検査データを基に寿命を予測する技術の的確な適用で、誤差やばらつきの精度を向上させることができる。

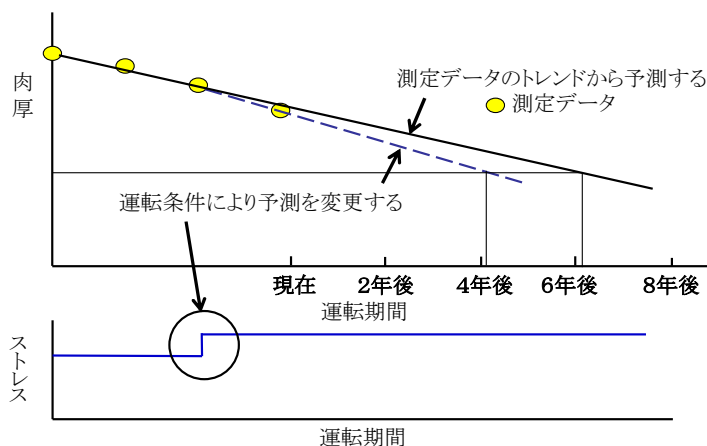


図2.39 定点の肉厚測定による寿命予測

設備管理手法の設定は部品ごと、劣化要因ごとに対応しなければならず、適切な設備管理手法を選択し体系的、かつ論理的に網羅的な検証を行うツールとして設備管理シートを提案した。作成後は運転実績・検査結果を評価して設備管理手法を見直し、より信頼性を向上させていく仕組みへの組み入れが必要である。作成された設備管理シートは設備管理に関わる知識データベースとして技術伝承に利用できるようなデータベース化する。管理部位ごとの管理は多量のデータを扱うので確実な遂行のためにもコンピュータ化が必須である。検証された設備管理手法の事例を他の同様の運転条件設備に展開することも容易くなる。寿命予測に基づく設備管理は、検証、評価、解析、見直しを実施することが重要で、決定された設備管理手法を工事・検査計画に確実に反映する。

運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理を可能とする網羅的な検証と体系的な取り組みについて「運転管理シート」と「設備管理シート」を説明した。図 2.40 に運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理の考え方を整理したものを示す<sup>[1]・[3]・[38]</sup>。運転管理シートと設備管理シートを相互に融合一体化して検討を進めることで、設備管理のレベルを向上させ長期安全安定操業の担保となる。

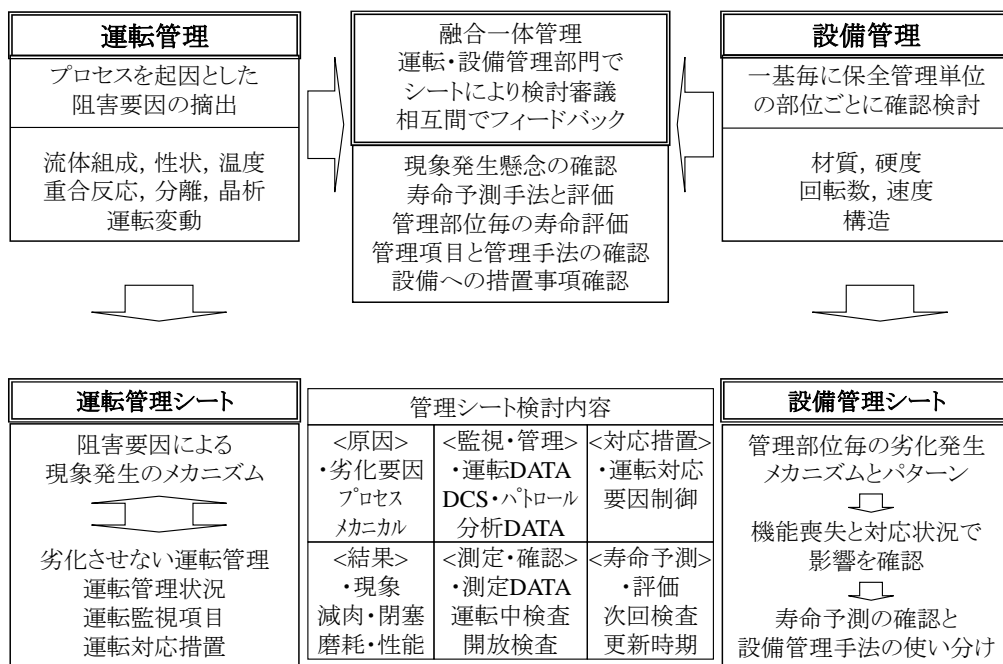


図2.40 運転管理と一体の寿命予測に基づく設備管理

## 第3章 設備管理の標準化した技術

第3章では、前章の最適な設備管理の定式化したアプローチ法を適用した設備管理の標準化した技術を示す。現状の設備管理の大きな課題となっている経年化によ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、工業用水熱交換器を例に上げて説明する。加えて設備管理活動のソフト面の影響を測定し制御するためのパフォーマンスを指標により評価する技術について述べる。設備の信頼性向上と設備管理コスト低減の最適化の標準化した技術としては、工場設備、塗装、配管管理、外面腐食を述べるが、いずれの技術も同時に信頼性の向上を図る活動も織り込んで長期連続運転の実現に寄与させており、それらの施策も加えて説明する。さらに長期連続運転のための信頼性向上の技術では、ステンレス製機器、工業用水熱交換器を説明する。それらの実施結果は企業経営に直結する設備管理コストや設備の信頼性によるリスクに現れ、また長期連続運転の実現に直接関与している。

### 3.1 工場設備の経年化による劣化の管理

石油精製、石油化学等の装置型の工場設備は、操業に伴う流体の温度・圧力・流速の変動、流路での膨張・圧縮・衝突、腐食成分による腐食、回転機のアンバランスによる振動や摺動部の摩耗など様々なストレスを受ける。これらのストレスを連続的または断続的に受け続けることにより、腐食、摩耗、汚れ、疲労、閉塞、経年による材質や品質の変化などが発生する。本論文では、設備が所有する機能に対して、ストレスが原因となって発生する設備性能の低下や停止、あるいは機能を妨げる現象の発現を劣化と定義する。さらに、劣化の進行により設備が所定の機能を喪失してしまった場合を故障とする。なおこれより以降、経年による劣化を経年劣化と呼ぶ。

昨今の経済情勢から設備の新設や増設の機会が減少している中で、昭和40年代から建設された多くの設備が40年以上使用されているため、適切な設備管理でそれらを延命させる必要に迫られている。高経年化した設備は、設計時に想定した使用期間を上回って稼働しており、いつ、どこで、どんな故障が発現するかの予測が困難になっている。故障の発生を抑えるためには、網羅性を上げて、寿命予測に基づき故障発生の前に対応する管理を行う必要がある。経年劣化の管理は設備管理の活動に大きく結びついており中心的課題と言っても過言ではない。

これらの対応を適切に行うには、管理の対象を部品のレベルに細分化して、「寿命予測を基にした設備管理」<sup>[63],[94]-[97]</sup>を適確に実行していくことが重要であり、そのためには計画、点検・検査、分析・評価、補修・更新のPDCAを回し、分析・評価の結果から次回の点検・検査の時期や方法、または改善・向上も考えた補修・更新を決定する必要がある。さらに材質や構造の設備面の改善のみを検討するのではなく、以後の運転に対しても、「劣化させない運転管理」として、劣化の原因となる流体組成や運転条件などの改善を検討し、劣化の発現を遅らせる、または発現させないよう運転管理に反映させて安定運転の信頼性を向上させていくことも重要である。工場設備の劣化管理には、以下の仕組みや技術が必

要である<sup>[39],[111]</sup>。

- (1) 設備の劣化の抜きの無い抽出のための仕組み
- (2) 設備の劣化評価のための検査や寿命予測の技術
- (3) 設備の劣化のリスクに基づく対応計画が策定可能な仕組み

ここで、(1) は、リスク評価による設備管理の優先度設定の仕組みや設備管理シートの技術を使う。(2) は、検査手法や寿命予測の体系化で記述した技術で対応する。(3) は、具体的な対応計画の成果物が求められる。設備劣化のリスクを基準とした優先度設定による中長期計画の策定を可能とするマネジメントを本稿で述べる。

### 3.1.1 経年劣化のマネジメント<sup>[86]</sup>

設備管理では長期的な視野に立った計画の立案が重要である。計画立案には設備の劣化要因に対する経年変化の実態を把握して、劣化の程度とその設備が故障することによる影響度を加味して評価し、優先度を決めて計画を作成する必要がある。すなわちリスク評価による修繕費の優先度設定で説明した手法の適用である。経年劣化への対応計画の策定は対策の優先度を決めて行う必要があり、その経年劣化評価の業務フローを図3.1<sup>[1],[2],[31],[39],[86],[111]</sup>に示す。

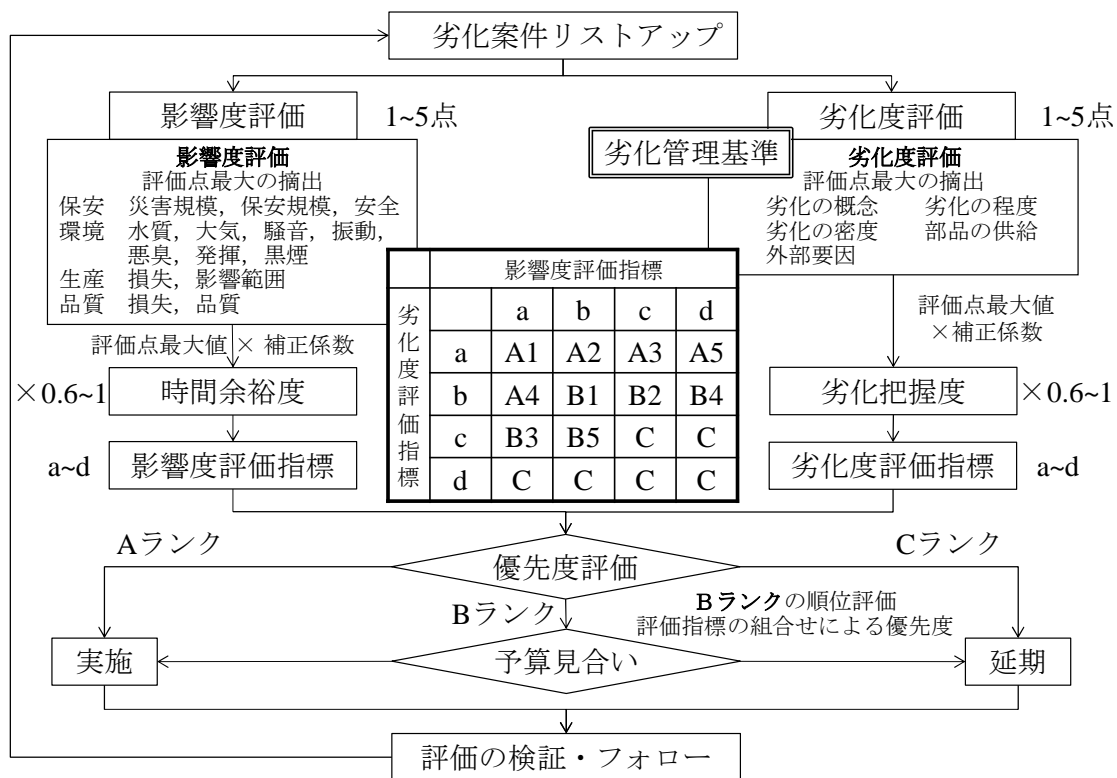


図3.1 経年劣化評価の業務フロー

各評価項目に従って評価するが、大きく分けて、設備が故障することによる保安事故や生産停止等の影響度評価と設備の劣化具合を評価する劣化度評価からなっている。このよ

うに設備の経年化を把握して管理するシステムを構築して、抜けの無い計画を立案する。ただ設備管理に要する費用は有限であり、リスク許容ができる案件では優先度を決め予算化しなければならない面もある。優先度については、設備劣化と故障影響の評価を組み合わせることにより決定しており、図中に示しているマトリックスを用いて優先度を定める。この中で、劣化度指標が a である A5 までの範囲を対策範囲として計画を取り進める。どの範囲まで対策を実施すべきかの判断は、企業のリスクマネジメントである。評価指標の特徴として故障発生に対する評価に際し、劣化程度の把握度に応じて劣化度評価の補正を行っていることである。劣化管理基準による評価であれば補正は無いが、根拠の希薄な懸念であれば最高 0.6 の補正がかけられ、劣化度指標のランクが 2 段階低減される。基準によらないが何らかの根拠が示されれば、その把握程度により 0.7~0.9 の補正がかけられ、0.7~0.8 では、1 段階の劣化度指標のランク低減となる。関係者は不安を払拭するために、劣化管理基準の策定に努力するという仕組みである。また時間余裕度では、予備機があり、故障の予兆を適確に捉えられ、安全に切替えができる場合には、0.6 の補正がかけられ、影響度指標のランクを 2 段階低減するなど 0.6~1 の補正が適用される。影響の範囲を特定することで、詳細な優先順位付けを可能にしている。図 2.6 のリスク評価による優先度設定との違いは、図 3.2 の経年劣化評価のイメージ<sup>[1],[2],[31],[32],[39],[86]</sup>に示すように、劣化把握度の適用である。

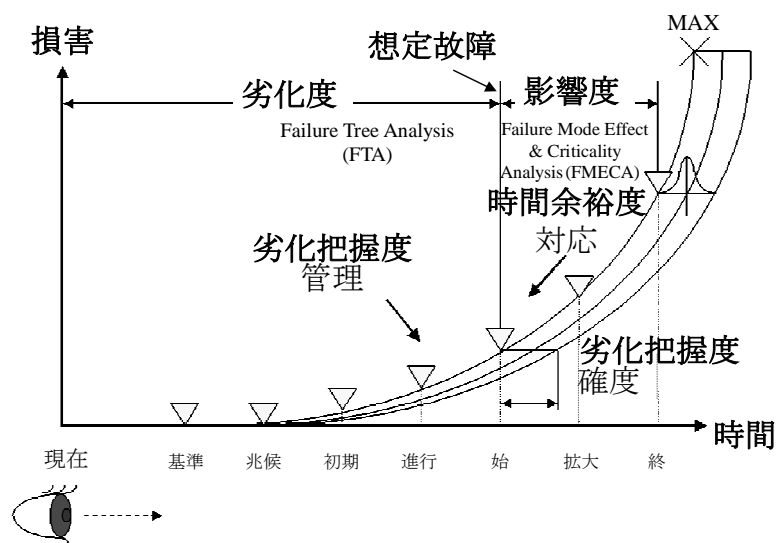


図4.2 経年劣化評価のイメージ

通常、劣化の案件は更新や大規模補修に繋がり、修繕費の範疇から投資の判断に移行するケースが多い。少額の経費である修繕費の案件は、故障率などによる信頼度を基に一律に判断するが、多額の投資的費用に繋がる劣化案件の場合は、企業としてのリスク方針により対応すべきであり、劣化管理基準を策定し、より精度の良い検査手法や寿命予測評価の技術を基に、経営 TOP の判断のための説明責任が要求される。すなわち、示した経年劣化評価のシステムは、経年劣化を管理するフレームであり、フレームを構成する個々の要素が検査手法や寿命予測評価の劣化管理基準である<sup>[1],[2],[86]</sup>。企業として取り組むべき横通しの可能な外面腐食の判断基準など、共通的な案件から劣化管理基準を策定して行けば良い。

劣化管理基準の構成として、機種ごとの構成部品による寿命支配要因と要因に対する劣化把握手法の適応、判断・診断・対策の評価技術などがあり、塗装劣化や外面腐食の他、電動機・ケーブル・トランス・DCSなどの横通しが可能な案件が上げられる<sup>[86]</sup>。経営層の投資判断に供する説明責任を果たす上でも、経年劣化評価のシステムが有効である。なお中長期の保全計画としては、A、B、Cのランクとともに5年程度の積み上げが可能なように策定し、毎年評価の見直しを行うようするのが良い。

事例企業では、第一期に建設されたプラント群が、20年を経過する1990年頃から全社的な経年劣化への取り組みを始め、1995年から筆者の策定した図3.1の経年劣化評価の業務フローによる経年劣化の計画策定を運用している。1999年には、リスク評価による修繕費の優先度設定に統合し、毎年、基準に基づき実施すべき案件を評価し対応してきている。したがって経年劣化を起点としたトラブルは、技術的レベルで抽出できなかった場合を除いて発生しない。また設備の経年劣化は、故障物理から考えメカニズムが明確であり、まったく抽出のできない案件は無い筈である。問題は精度で、実施時期を設定するリスク評価における発生確率は、寿命予測を基に行うが、ばらつき・誤差がある。そこで、策定される劣化管理基準を基に、1997年から設備の部位毎の寿命予測を基にした設備管理を実現するために、設備管理シートの作成を開始し、2003年からは、寿命予測や検査手法の精度向上のプロジェクトを立ち上げている。さらに2006年から過去に遡って措置事項の妥当性の評価と抜けのない抽出に取り組み、2007年からその後に発生する懸念事項の設備管理レビュー\*の場での検証に取り組んできている<sup>[1],[2],[32],[86]</sup>。抽出された設備ごとの経年劣化は、設備管理シートに落とし込まれ、検証、伝承のツールとして基準化されている。このような一貫した向上のためのマネジメントが行われることが最適化に必要なのである。結果として事例企業での筆者の経験からは、生産改良を除く生産維持のための費用の内、2割程度は経年劣化への対応費用として継続されている。

ここで設備の経年化に対する取り組みについて述べたが、まだまだ設備管理が十分であるとは言い難い。説明した計画策定のシステムは、設備管理の支援ツールであり、それらを駆使して有効に機能させ、経年劣化によるトラブルの未然防止を図るには、システムを使用する人の教育も重要である。またデータ入力レベルにより、システムの機能するレベルが決まってしまうので、目標に応じたデータの入力が必要である。経年劣化の対応計画の情報管理システムの例を図3.3に示すが、これらのシステムを使用することで抜けなく、さらにリスクマネジメントも考慮した設備管理を実施する環境が整いつつある。

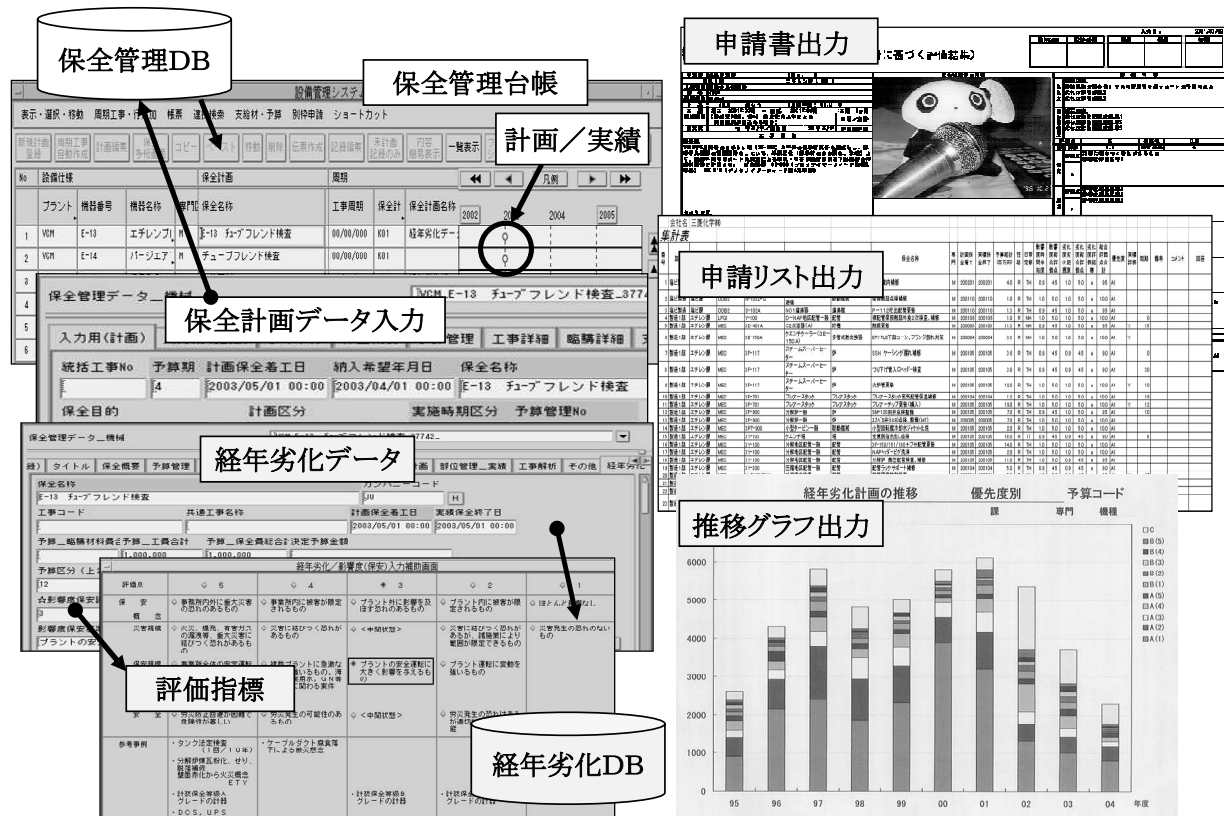


図3.3 経年劣化の対応計画の情報管理システムの例

### 3.1.2 経年劣化への対応技術

経年劣化への対応は設備管理部門の専門性の発揮を要求する分野であり、経年劣化という分野で技術的取り進めをしても十分に成り立つほどその範囲は広い。経営的な観点からも経営層への説明責任を果たすことが責務である。経年劣化への対応技術について以下に述べる。

#### 1) 回転機・静装置・バルブなどの機械設備

回転機では、経年劣化を考慮した個別設備の部位ごとの寿命予測に基づく管理を設備管理シートで設定しており、日常管理で振動測定や周波数分析、油分析や油中金属粉分析等による状態基準保全のCBMでの対応を指向している。塔・槽・熱交換器などの静機器では、同じように設備管理シートによる経年劣化を考慮した設備管理を設定し、熱交換器の炭素鋼管の極値統計解析による寿命予測やNDIの水浸UT適用によるロボットを含めた診断技術、非磁性管には渦流探傷(ET)などを適用している。配管に使用されるバルブでは、大口径のバルブを設備なりに個別に管理し、高圧ガスに関わる設備の第一バルブは、法規に則り検査が実施される。配管システムの一般バルブは、配管管理の部品管理として計画的検査で、経年劣化に対応する。

## 2) 計装設備

計装設備における経年劣化では、寿命劣化、製造・部品供給停止、装置設備の陳腐化の3要素を考慮して対応する<sup>[25],[26],[40]</sup>ので、比較的劣化が起こる前に更新してしまう装置・設備が多い。経年劣化への取り組みとして、DCSでは、故障率の推移に注目するが、初期故障が多い場合、プログラム改訂等のシステム変更時のデバッグをしっかりとやっているかを確認対応する等、ただデータを採取しているのではなく、解析結果を基にした対応が必要である。

## 3) 電気設備

電気設備における経年劣化では、受電設備、変圧器、ケーブル、電動機など、さまざまな種類の絶縁劣化との戦いが、そのほとんどを占めると言って過言ではない。活線状態や停止しての検査による絶縁劣化の状況把握から寿命予測に繋げる各種技術への取り組みがなされている。

## 4) 土建設備<sup>[86]</sup>

土建設備における経年劣化では図3.4のプラント群の基盤設備の例<sup>[34]</sup>に示すような護岸、栈橋、トンネル、共通の道路、橋、建物、ラックなどのインフラ設備に関わるコンクリート構造物の経年劣化診断・評価技術を構築することが必要で、港湾設備の電気防食・RC構造物の割れ・落コンの打音検査、高層煙突の赤外線、埋設配管の黒鉛化などの検査結果と記録から診断技術に取り組むのも一つの方法である。通常は1回/年の目視による不良部を計画的に取替え・補修で対応計画を策定するが、常時使用している設備のように補修困難な構造物は、予備系作りから検討が必要となる。その他、経年劣化を懸念する点検が十分に出来ず、あるいは、やり難い部位として以下があり、診断技術を開発する必要がある。

- (1) 活性汚泥設備などの廃液が存在する各種ピット類の内部
- (2) 土中の機器や建家の基礎、埋設配管、特に曲がりや継ぎ手部、内面ライニングなど
- (3) コンクリート製建家躯体内に打ち込まれた配管類や排水溝
- (4) 橋梁の裏面など物理的に検査の困難な部位
- (5) 人が生活している場所や予備機や仮設が大掛かり、停止期間が取れない部位

## 5) 劣化モデルによる管理

設備管理を実施する環境は整いつつあるが、設備において未経験の劣化の発生も考えられる。劣化の予知技術の向上がぜひとも必要である。さらに今までの設備管理は、発生した現象から対応策を立てる後追いの設備管理で、再発防止によるトラブル削減は可能でも、経年劣化によるトラブルの未然防止には十分ではない。したがって寿命予測の体系化の中で寿命予測の取り組みの1つとして述べている設備の経年劣化を要因により予測し、対応する劣化モデルによる設備管理を取り進める必要がある。設備の寿命を予測する方法論として、1つは、決定論的な方法で過去の実績を基に故障物理等で種々検討して、各種パラメータとの関連を掴み劣化モデルを構築する。もう1つは、確率論的手法で寿命を統計的に処理すると母数が小さければばらつきが大きいですが、十分に大きく取ると収斂するような場合に、寿命予測に利用できる方法である。予測する寿命支配要因に応じて最適な方法を



採用すればよい。劣化モデルによる経年劣化の管理考え方を図 3.5 に示すが設備は運転などの使用条件により劣化する。この劣化のメカニズムから故障物理や文献などから導いた理論により劣化モデルとして構築する。劣化モデルとは、劣化要因であるパラメータを入力することで、劣化状態の予測を出力するシステムである<sup>[11]</sup>。このような考え方を設備管理に導入することで、設備が故障する前の適切な時期に対応できる。まだ劣化モデルについては、構築されている対象が少なく精度も良くない。しかし、劣化モデルに検査結果や実績評価のデータを入力することで、さらに精度向上が図れる。劣化モデル構築による寿命予測は、経年劣化を管理する設備管理の有効な手法である。

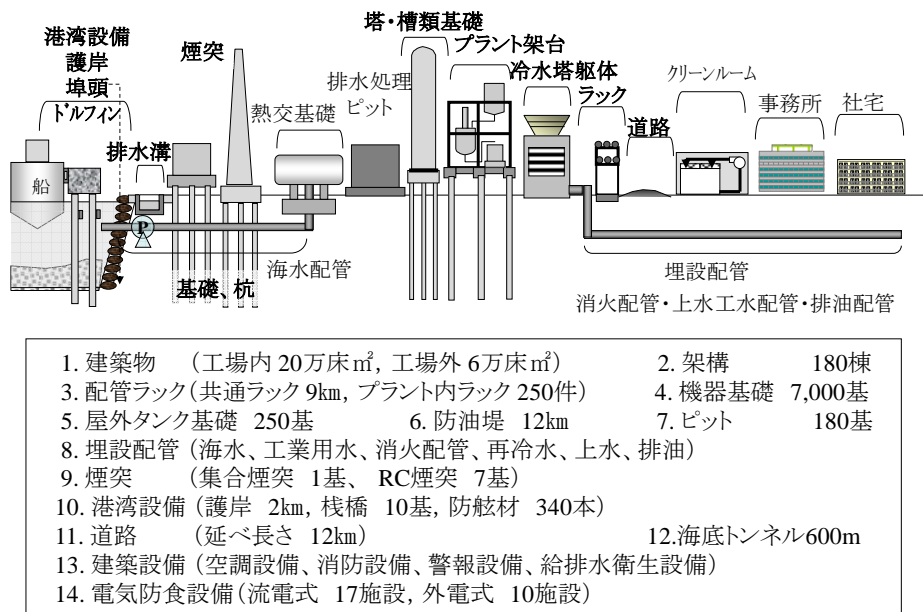


図3.4 プラント群の基盤設備の例

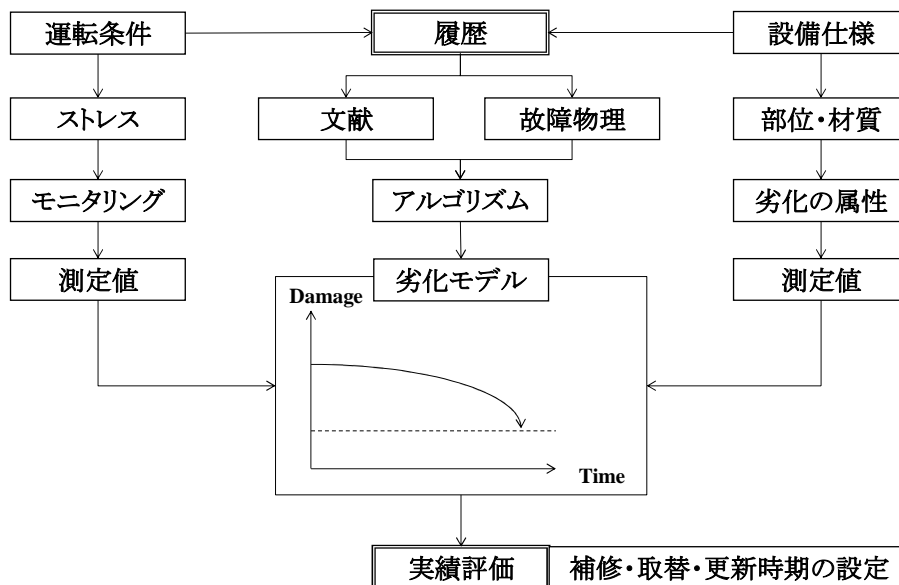


図3.5 劣化モデルによる経年劣化の管理

### 3.1.3 設備の劣化を基点とした管理<sup>[1],[2],[86],[115]</sup>

経年による工場設備の劣化が進行しており、劣化の顕在による故障の発生時期や部位が予測できない場合、過去の履歴の傾向管理から予測して行う一般的な計画検査を実施するだけでは、安全安定運転の担保に不足する可能性がある。そのため、日常の計画的で網羅的なパトロールで頻度と精度を向上させ、異常の兆候を早期に発見する体制を確立し、計画検査と相互に補完する必要がある。ここでは、劣化を基点とした管理の考え方を劣化の抽出、特定、測定、評価、復元、防止、管理の7項目で整理して以下に説明する。

#### 1) 劣化の抽出

設備ごとに管理すべき劣化を抜けなく抽出するために、設備の部位ごとに網羅的に固有の条件から考えられる劣化要因を上げ、劣化させない運転管理とその管理項目を監視する手段を確認する。次に、劣化発現の条件が成立するかを劣化メカニズムに基づく論理的な検証で絞込みを行い、管理すべき劣化の抽出を行う。さらに運転部門と設備管理部門が一体となって、運転管理や設備管理がどのように行われていたかの情報を共有する場や仕組みを設け、他社の事故・トラブルなど外部からの情報も含めて管理の対象とする<sup>[87]</sup>。

#### 2) 劣化の特定

抽出された劣化に適切な対応を取るために、設備が何によってどのように劣化するのか劣化メカニズムの特定を行う。設備の部位ごとに劣化要因から劣化の現象、メカニズムを明確にし、劣化させない運転管理を検討し、寿命到達前の措置が可能となるように対応時期を設定する。対応時期の設定は、措置を行う部位で構成される設備の停止、場合によっては工場の停止を伴うことから、できるだけ少なくする事が求められる。そのため、クリティカルとなる部位の実施機会の何回目かに合わせて対応を行うなど各々の部位の措置の時期を整理することが必要となる。

#### 3) 劣化の測定

腐食、磨耗、閉塞、疲労、変質などの劣化は、現象として肉厚、割れ、硬さ、面積、体積など劣化に対応する変化を生じる。そこで、変化を測定することが可能な検査手法を適用して、設定した対応時期に測定する。測定は、劣化の判断や評価のために定量化に努め、測定結果に誤差、ばらつきを生じないよう劣化状況との比較検証により、検査機器の精度や検査者の技能などの検査技術のレベルを向上していく。さらに測定結果と劣化状況との比較検証により、設定した測定時期が適切であったか確認し、次の測定や措置の時期の設定に反映して、安定運転の信頼性を向上させる。

#### 4) 劣化の評価

測定結果と劣化状況との比較検証を基に、劣化メカニズムから故障を発生させない測定データの許容限界値を設定し、限界値に至るまでを寿命として劣化の評価を行う。劣化の評価は、測定結果による良否の判断も含め、劣化の進展速度に基づく寿命予測により行う。この場合、寿命に影響するその後の運転計画や設備管理の計画も要因として考慮し、評価

結果に誤差、ばらつきを生じないようにする。さらに評価結果と劣化状況との比較検証で、劣化部位の代表となるデータ採取やデータ処理の方法など、差異を減少させる寿命予測技術の要因を検討し予測精度の向上を図る。設備を構成する部位ごとの寿命予測の結果を基に、供用期間に許容限界値に到達する事の無いよう、次の検査時期や補修、更新の適正な時期と範囲を設定する。

劣化の評価では、設備の供用期間と寿命の関係から設備にかかるコストや安定運転の信頼性の妥当性も評価する。コストの低減や信頼性の向上が必要となれば、材質、構造、機能などの改善による寿命延長やプロセス変更による設備の不要化などの安定運転を阻害するリスク低減策を検討する。

#### 5) 劣化の復元

劣化の評価結果から設定された時期に行う補修、更新、改善による劣化の復元の方法を策定する。復元した設備の部位は、復元前の劣化の進展速度から設定した時期に劣化の測定を行い、復元前後の劣化の進展速度の比較検証を実施する。この際、材質、構造、機能などの改善による寿命延長やプロセス変更によるリスク低減策を図った場合は、復元の部位、仕様、要領、劣化の測定データの初期値などの記録を整理しておき、改善による復元の効果を評価する。もし差異があれば、復元方法、使用条件など要因を調査し、その後の運転管理や設備管理に反映させる。

#### 6) 劣化の防止

抜けの無い劣化抽出と劣化の特定から、劣化させない運転管理や設備を構成する部位ごとの劣化の測定、許容限界値、措置の時期などの設備管理の手法を設定することを述べた。これらの設定した管理により、劣化による設備の停止などの故障が発現しないよう、あるいは発現前に調整や整備の措置で対応して劣化の防止を図る。さらに劣化の特定による要因とメカニズムから、劣化要因の回避や低減などの劣化を防止する有効策を検討する。また、有効策による安定運転の信頼性向上を更に進めるため、設備の材質、構造、機能などの改善による寿命延長やプロセスの変更による設備の不要化などを検討する。

#### 7) 劣化の管理

設備管理の最後のステップとなる劣化の管理では、まず抽出した案件をリスク評価し、故障が発現した際の影響度と発生確率の指標によるリスクマトリクスで対応の優先度を設定する。これらを基に、測定や対応措置の実施、延期を判断し、劣化への対応計画を策定する仕組み<sup>[1]-[3],[25],[26],[28],[34],[39],[40],[86],[111]</sup>を構築する。リスクへの対応は、許容できるレベルまでの回避、除去、分散、低減、移転、保有の施策などがある。例として、プロセスの改善、予備系列、予備機、バイパスラインの設置、冗長化、使用条件に対する安全率の向上などが挙げられる。

### 3.1.4 工場設備の経年化による劣化の管理の結言

設備管理の標準化した技術を適用して最適化を目指した事例を、設備管理の活動において大きな課題である経年劣化の管理を取り上げて説明した。有限リソースを有効に使用するためリスク評価による優先度設定を適用し、同時に信頼性の向上を図る活動も織り込んで長期連続運転の実現も目指す施策である。経年劣化を管理するための仕組みやその考え方を具体的な取り組み事例を交えて、本項で整理し説明を加えた。

経年劣化の管理では、設備劣化の抜けの無い抽出のための仕組み、劣化評価のための検査や寿命予測の技術、リスクに基づく対応計画が策定可能な仕組みが必要と述べ、抜けの無い管理対象の抽出や検査や寿命予測の技術は、劣化管理基準の策定で対応し、策定を促す仕組みとともに、リスク評価による優先度設定で計画を策定する仕組みを事例で示した。40年を超えるプラントも稼働している状況下、経年化による劣化は避けられず、未経験の高経年化した設備では、部品レベルの寿命予測を基にした劣化の管理が求められ、設備管理を抜けなく遂行するためにシステムによる管理が必須となる。設備管理の活動で経年劣化の管理は主要な課題であり、劣化を基点とした管理の考え方を述べた。経年劣化を管理する環境は整いつつあるが、まだまだ未然防止の領域に到達していないのが現状であり、今後も継続した取り組みで向上を図ることが必要である。

## 3.2 集合体基準の劣化管理による塗装の管理<sup>[14]</sup>

工場設備の劣化管理には、劣化の検査や寿命予測評価の技術以外にも、抜けの無い劣化抽出やリスクに基づく対応計画を策定する仕組みが必要である。劣化管理の対象の中には、外面腐食による設備劣化や工場設備の塗装劣化などのように、個別の寿命予測による管理ではなく集合体基準で劣化の管理をした方が効果的なものがある。特に塗装に関しては、劣化部が散在しており劣化の程度もばらついているため、定量的な評価が難しい。さらに劣化しても設備の性能維持で問題となる状態に至るまでには時間的余裕があり、また塗替えによる効果の評価に長期間を要するため、リスク評価による塗装の劣化管理の効率化が困難である。本論文では、塗装の劣化管理の方法と塗装管理を効率的に行うための集合体基準の管理手法に関して、有効性を含めて事例で報告する。

### 3.2.1 集合体で行う劣化管理

劣化管理の手法は以下の2つに分類することが出来る。

#### (1) 個別の劣化管理

設備の部位ごとの材質や形状などの仕様、使用する環境や運転条件などの固有の条件ごとに、検査技術の適用や寿命予測を基に評価して実施の「時期」を設定する。

#### (2) 集合体基準で行う劣化管理

塗装、断熱材、外面腐食など管理対象が膨大なものは施工面からまとまった範囲を一括して合理的に管理の対象とする。この管理対象を管理が可能な大きさの部分の集合体として取扱い、検査や寿命予測を基に評価する部分の「対象」を設定する。

設備の部位ごとの固有の条件を基に個別の寿命予測で対応する劣化の管理例として、加熱反応管のクリープ劣化や浸炭劣化、スケール付着、エロージョンによる磨耗などに対する管理などがある。これに対して、裸配管や断熱材下の配管の外面腐食や塗装の劣化などは、対象の大きさや劣化の形態から個別の寿命予測では管理するのが困難であるため、ある面積や長さごとの集合体基準で劣化の管理をした方が効果的であると考えられる。特に塗装の管理に関しては、施工に占める足場や前処理の付帯工事の割合が大きく、まとまった範囲を管理の対象として一緒に塗替えする方が施工面から合理的であると考えられる。その場合には、限られたコストや工期の中で良好な部分も塗替えする事となるので、より効果のある部分を選択する集合体基準の劣化管理が求められる。

さらに塗装の劣化では、劣化が発現しても直ちに設備の機能が喪失する訳では無く、さらに劣化が進行した後に炭素鋼製設備の外面腐食が始まる。配管外面腐食の調査<sup>[116]</sup>によれば、その腐食速度は検査データの97%が0.2 mm/年以下であった。一般には設備の耐圧性能の寿命である肉厚限界値に至るまでには通常数mmの余裕代が設けられているため、故障発生までには時間的余裕があるが、このことが劣化への対応時期の設定をかえって難しくしている。実施の優先度を落として塗替え時期を延期していると腐食が進んでしまい、設備の補修や更新が必要となる事態を招いてしまう危険性がある。

### 3.2.2 塗装の劣化管理

塗装の対象として、塔、槽、熱交換器の静装置や回転機などの動装置で構成される工場設備の他、プラント間を繋ぐ配管やラック設備、埠頭、栈橋、保安防災設備、厚生設備、原料・製品・資材の倉庫等の共通的な設備もある。設備を塗装する目的は主に劣化防止であり、塗膜で防水して発錆や腐食から保護する役目を持つ。またそれ以外にも、美観の維持・向上で、社員のモラルの維持や顧客の印象の向上、道路や標識での安全性の確保、さらには防カビや防藻での菌類の繁殖を抑える衛生管理やトランスなど電気設備の絶縁、遮熱による省エネなどの機能性の付与など多岐にわたる。

既述のとおり、工場設備の塗装の劣化は集合体基準を適用し、施工面や劣化管理の面から合理的に管理しやすいまとまった範囲をエリアとして管理の対象とする。工場全体を漏れなくエリア分けし劣化の抽出、特定、測定、評価、復元、防止の管理を行う。管理するエリアのイメージを図 3.6 に示す。開放検査の機会に塗替えを計画する面積の大きい大型のタンクや特殊な塗装管理を必要とするトランスなどは、設備自体をエリアの単位として管理する。タワー群では塔ごと、または図 3.6 のように数塔まとめてエリアとしても良い。塗替え計画を立てる際の考慮事項は、以下の通りである。

- (1) 工場の設備ごとではなく、まとまった面積を持つエリアごとに塗膜劣化の程度を評価して塗り替え時期の優先度を設定する。
- (2) 優先度の高いエリアから塗替えを行うが、工事管理面や費用面からまとまったエリアを一緒に施工するよう計画する。
- (3) 塗装に伴う足場や養生にかかる費用は、塗装費用の50%を超える場合も多く、その他の集合体で管理している外面腐食検査や他の検査・補修、締結部のガスケット更新、標識やラック設備の補修などと合せて、効率的な運用を図る。

塗装の劣化管理の方法について合計の塗装面積が 3.36km<sup>2</sup>、管理するエリアの数が 1,300 (平均 2,600 m<sup>2</sup>) のプラント群からなる事例工場で行った具体例で以下に説明する。

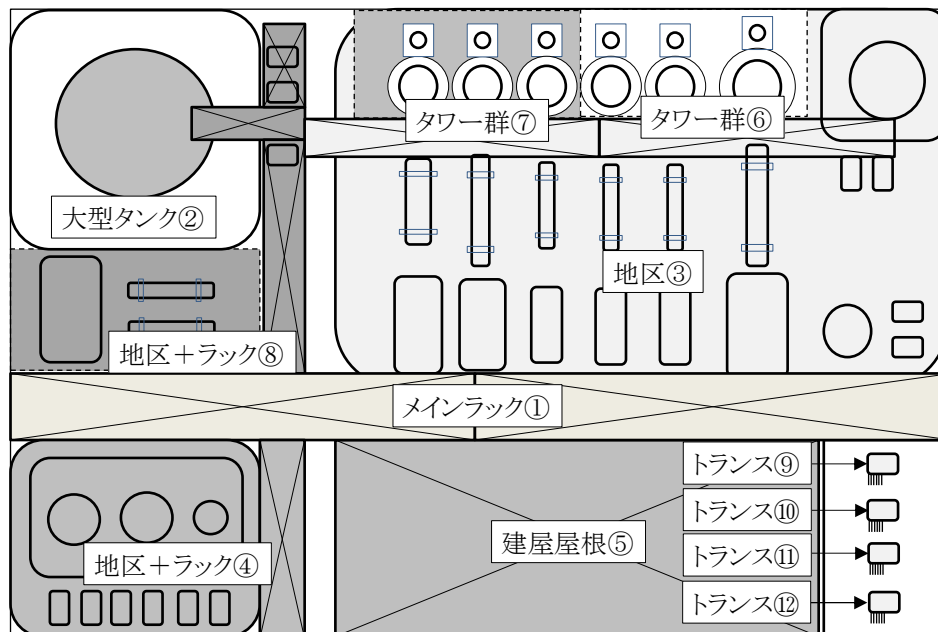


図3.6 管理するエリアのイメージ

#### 1) 塗膜劣化の評価

塗膜劣化による劣化程度を評価する方法<sup>[117]-[119]</sup>として、表 3.1 に ASTM D-610<sup>[120]</sup>に準拠した塗膜劣化度判定基準の例を示し、表 3.2 に日本塗料検査協会の塗膜劣化度判定基準の例を示す。いずれの場合も対象物件の劣化の現象や程度を判定する。塗装においては、高温・多湿・飛来塩分・紫外線などが劣化に繋がるストレスとなり経年により劣化する。その塗膜の劣化は、色あせ、割れ、膨れ、剥れ、発錆などの現象<sup>[118],[121],[122]</sup>を伴うが、評価項目が多くなるほど作業は煩雑となる。これらの現象の中で、発錆面積の大小が他の劣化現象より見た目の影響が大きいいため、表 3.1 にある発錆率による塗膜の劣化度判定法を劣化度評価として採用する。工場設備の多くは炭素鋼製であり発錆率による劣化度評価はシンプルで利便性も高く、判定用のサンプル写真や図の適用も容易である。

表3.1 塗膜劣化度判定基準(ASTM D-610準拠)

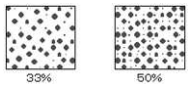
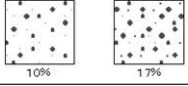
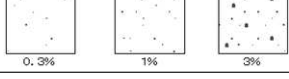
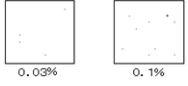

劣化度	発錆率		定義
I	30%以上		発錆総面積が左欄の面積発錆率となった場合
II	5~30%		同上
III	0.1~5%		同上
IV	0.1%以下		色あせて小さな割れ・膨れ・剥れ・錆が発生しかかった場合
V	0%		異常なし

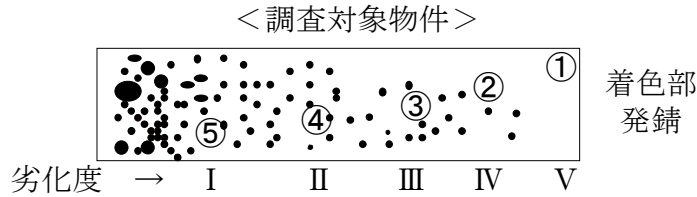
表3.2 日本塗料検査協会の判定基準例

	ランク	内容	評価点
発錆	1	ごく僅かの錆が散見される	1
	2	やや錆が目立ち始めている	2
	3	錆が徐々に進行している	3
	4	既に錆がかなり進行している	4
	5	かなりひどい発錆状態になっている	5
	6	危険な状態まで錆が進行している	6
剥離	1	剥がれは認められるが著しくはない	1
	2	剥がれが著しい	2
割れ	1	割れは認められるが著しくはない	1
	2	割れが著しい	2
光沢	1	光沢が著しく減退している	1
	2	光沢が全くない	2

## 2) 定量的なエリアの劣化度評価

まとまった面積を持つエリアを管理単位とし、塗膜の劣化評価を行う場合、エリアすべてが同一に劣化しているので無く劣化部は散在しており、その劣化度もばらついている。同一指標のもとに比較・評価して優先度の設定を可能にするには、表 3.1 の 5 段階の劣化度ごとにエリアの面積比を求めて、定められた評価点をかけ合わせ、合計した点数をエリアの評価点とする方法が適用できる。具体的な評価点の算出例を表 3.3 に示す。ここで、エリアの一部分の塗膜の劣化が全体の評価にならないよう、評価項目に該当する面積を目測で算出し記録する。

表3.3 評価点算出例



区分	劣化度	評価点	面積比	係数	評価点
①	V	1点	×10%	×10	1
②	IV	2点	×10%	×10	2
③	III	3点	×20%	×10	6
④	II	4点	×20%	×10	8
⑤	I	5点	×40%	×10	20
合 計					37

### 3) 劣化度評価の考慮事項

塗装の劣化管理における塗装計画の立案は、発錆率の評価点による優先度の設定で可能となる。しかしながら、工場設備の中には発錆の初期段階で性能維持に問題と成る設備や塗替え費用が高額な案件もある。それらに対する考慮事項を以下に示す。

- (1) 屋外設置の水銀灯、トランス、配電盤等の電気設備は、水分の浸入が電気事故に直結しており、かつ鋼板厚さが薄く、局部的な発錆でも故障を想定する必要がある<sup>[123]</sup>。トランスの冷却用フィンは、絶縁油の漏洩から火災・破裂の危険性もある上、一旦発錆すると構造上ケレンが困難で塗装の効果を十分発揮できなくなるので、劣化度IVの色あせて小さな割れ、膨れ、剥れ、錆が発生しかかった場合から評価点を5点として評価する。屋外設置の水銀灯、配電盤等の電気設備についても、劣化度の評価点を1、3、4、5、5点に変更して評価する。
- (2) 建家屋根は、雨水浸入が電気事故に直結する他、建家内の財産損失やコンピュータトラブルを引き起こす要因となり、かつ鋼板厚さが薄く、局部的な発錆でも故障を想定する必要がある。また小さな開口でも補修実施が必要となり、電気設備と同様の劣化度の評価点とする。劣化度IIの建屋屋根で漏水し大規模補修となったケースや劣化度Iで屋根板全面補修に至ったケースもあり、劣化度IやIIでは、よく観察して補修に至らぬように塗替え時期を設定する。
- (3) 高層煙突、フレアースタック、大容量タンク、大規模建屋、橋梁設備などの塗替え費用が高額な案件は、中長期的な観点から費用の平準化を図る。塗替え費用が高額な案件の例として、高層煙突の8年周期で80百万円、フレアースタックの30百万円、大容量タンクは開放検査に合せての塗替えが10年周期で100百万円、大規模建屋の20年周期で300百万円、橋梁設備の15年周期で100百万円などがある。

### 4) 定量的な劣化度評価の適用による効果

事例工場での塗替え実績を図3.7に示す。1年度から塗替え部の劣化度を発錆率で評価し始めた。2年度までは、塗装状態の善し悪しという主観的なイメージで劣化の評価を行



い、優先度を設定して計画的な塗装を実施していた。関係者一同によるパトロールで、優先度を確認して横通しを図っていたが、塗替え部の劣化度を発錆率で確認すると劣化度Ⅰの占める割合は、20~30%で高くはなかった。3年度から工場全体をエリア管理する集合体基準による劣化管理を適用し、発錆率の評価点による定量的な優先度で塗替えを実施した。3年度の劣化度Ⅰの占める割合は、75%程度まで上昇し塗替えによる塗装の劣化の復元に効果が上がった。4年度以降については、他検査の実施に伴う足場・養生の有効活用で実施した塗装があり効果を弱めているが、他検査の実施に伴う塗装を除いた場合には、劣化度Ⅰの占める割合が75%程度であり、集合体基準による劣化管理を適用し、発錆率の評価点による定量的な優先度で塗替えを実施する有効性を示している。

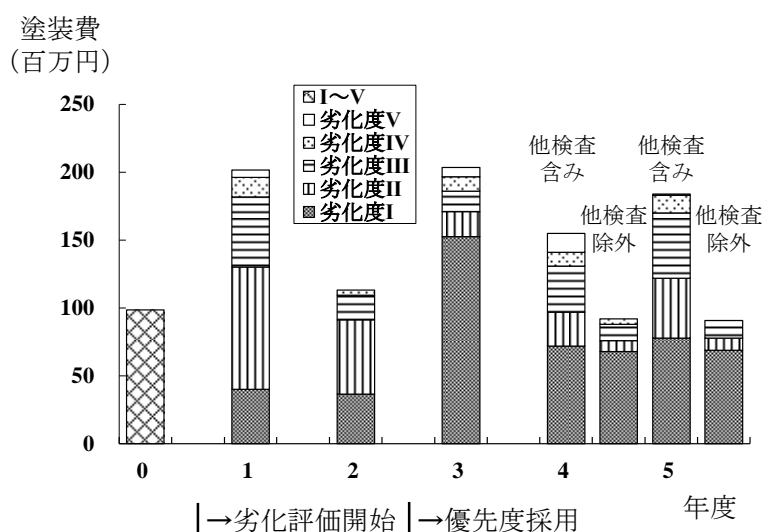


図3.7 塗装実績の劣化度推移

### 5) 劣化度評価の検証

塗膜劣化の評価は、専門家により行うのが合理的だが、対象となる面積が大きく、人の判断によるので、誤った評価の低減や評価レベルの横通しを目的に検証することが必要である。劣化の復元に効果的なエリアの選択のためにも、塗替えの優先度の高いエリアを検証する。該当エリアの関係者の他、工場を横断的に管理している部署の参画などで、客観性を持たせ優先度の横通しを図る。さらに塗装の劣化を管理する上で、塗装仕様と環境から想定していた劣化の進展と劣化評価の適正度を検証する。特に塗膜の剥離や発錆大などによる塗替え周期の短い案件については、周期の短い原因を明確にして、適正な塗装仕様への変更などで塗替え周期の改善を図る。これらの検証を容易にするためには、塗装仕様、塗替え周期、塗装費用、塗膜が晒される環境条件などのデータを整理しておく必要がある。工場全体の劣化状況の把握や優先度に応じた年間の計画リスト、費用算出や各種解析のためにも、膨大なデータの取扱いが必要となるので、事例データベース等を用いた管理ツールなどのシステム化が望ましい。以下のような検証すべき事項や検証のために必要な管理すべきデータが考えられる。

### (1) エリアの基本情報

エリアの名称、塗装面積（塗装1回分の面積）、設定塗装周期（実績の塗装周期年）、施工費予算（前処理費を含む塗装費予算と足場や安全対策費等からなる足場他付帯費予算）

### (2) 塗装の劣化度

年度ごとの劣化度（エリアの劣化度ⅠⅡⅢⅣⅤの面積比、評価点）、エリアの劣化進行状況

### (3) 塗装の実績

実績施工費と施工時期、施工会社、施工期間、塗装寿命（前回施工からの経過年数）、㎡単価（施工費／塗装面積）、年単価（施工費／塗装面積／経過年数）

### (4) 塗装仕様

ケレン等級、塗料仕様（下・中・上塗り塗料のメーカー・品名・品質と塗り回数）

### (5) 塗装の環境

運転温度、対象物件（機械装置、配管、ラック、塔槽タンク、倉庫・建家、煙突、電気設備等）、設置環境（一般、粉塵、海岸近傍、栈橋埠頭、湿潤・氷結・高熱・酸性・アルカリ等の塗膜が晒される表面の状態）

### (6) 配置の情報

エリアの塗装の劣化度や塗替え実績を配置図上に色分けなどで表示をし、配置による比較や劣化の進行を確認し評価できるようにする。システム上でエリアの塗装の劣化度や塗替え実績が連携され、配置図に表示できれば、確認作業が軽減できる。

## 3.2.3 塗装管理の実例

塗膜劣化の評価による優先度に従い劣化の進行したエリアを効果的に塗替えしていく事で、塗替え実施の効率化を図ることができる。また工場全体の塗膜劣化の進行状況が把握できることから、進行させないための必要塗装面積や費用などの算出が可能となり、長期的な塗装劣化の対応計画が毎年の必要費用の平準化とともに策定可能となる。さらにエリアの塗替え周期を把握することで、改善の必要な塗替え周期の短いエリアが明確になり、塗替え周期の適正化に向けて、戦略的な改善策の検討ができるようになる。以下に事例を紹介する。

### 1) 塗装の劣化進行

環境条件の違いにより塗装の劣化進行も異なり<sup>[124]~[126]</sup>、環境条件に適した塗装仕様を選択しなければならない。鋼橋では、各環境条件とも約10年程度で塗替えが行われているとの報文<sup>[127]~[129]</sup>もあるが、事例工場における改善を検討する劣化の進行と経過年数の目安として、塗装から劣化度Ⅳに到達する期間4~5年、劣化度Ⅲまで6~8年、劣化度Ⅱまで7~10年、劣化度Ⅰまで10年としている。ここで、事例工場における15年の調査期間で、塗替えを実施した案件に対し、塗膜の寿命と言える水分が塗膜を通過し母材に到達して発錆する劣化度Ⅲの状態に到達する<sup>[130]、[131]</sup>までの平均経過年数を調査した事例を以下に示す。

- (1) 一般の環境は、直接海に面していない配置にあり、飛来塩分の影響が少ないと考えられる工場設備の環境で、事例工場で採用されている塗装仕様は、鉛系錆止塗料とフタル酸樹脂塗料の組合せである。塗替えた 18 案件の内 6 案件が調査期間中に劣化度Ⅲに到達し、その平均は、8.3 年であった。残り 12 案件については、調査期間の間では到達せず良好な状態を維持していた。
- (2) 海岸の近傍は、直接海に面している配置にあり、飛来塩分の影響があると考えられる工場設備の環境で、事例工場で採用されている塗装仕様は、鉛系錆止塗料とフタル酸樹脂塗料の組合せである。塗替えた 18 案件の内 5 案件が調査期間中に劣化度Ⅲに到達し、その平均は、7.5 年であった。残り 13 案件については、調査期間の間では到達せず良好な状態を維持していた。
- (3) 栈橋の環境は、常に海水の塩分に晒される厳しい条件の配置にある栈橋の環境で、事例工場で採用されている塗装仕様は、鉛系錆止塗料と塩素ゴム系塗料の組合せである。塗替えた 6 案件すべてが調査期間中に劣化度Ⅲに到達し、その平均は、4.7 年であった。

一般や海岸近傍の環境では、目安の 6～8 年を満足しているが、栈橋の 6 件は海水の湿潤が繰り返される条件で、さらに寿命延長の改善を図る必要がある。

塗替えを実施した案件の前回の塗装からの経過年数を表 3.4 に示す。エリア管理を行っているプラント群からなる事例工場の主要な敷地と飛地などの 4 地区で調査した事例である。塗替えを行ったエリアの平均経過年数は 8.1 年であった。D 地区のエリアの経過年数が短い原因は、取扱い原料からの飛来塩分などの影響を受けているためであり、その後に塗装仕様の変更や発生源対策が取られている。塗装寿命と考えられる塗替え時期は、鋼橋の場合には、多くが 10 年程度で行われていることから塗膜劣化度の評価による効果の把握には、少なくともその程度の期間が必要であり、評価に長期間を要する困難さが塗装の管理を難しくしている

表3.4 地区別塗装塗替えの経過年数

地区	塗装実施面積 ×10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup>	経過年数 平均	経過年数 Min～Max
A	1,850	7.8	5～10
B	331	9.6	5～10
C	65	9.3	5～10
D	16.5	5.8	5～8
合計	2,262.5	8.1	5～10

## 2) 維持費用の算出と効果

工場全体の塗膜劣化の状況を塗装面積の劣化度別の推移で示したものを図 3.8 に示す。工場設備の新設や増設のほか、撤去や廃止に伴い塗装面積も増減するが、1 年度の工場全体の塗装面積を 100%とした。工場の塗装に対する印象は発錆率に影響されることは先に述べた。維持費用の算出根拠として、1 年度の状況を維持するものとし、発錆が目立つ程度となる劣化度 I と劣化度 II の合計を増減無く維持する塗装に必要な額を維持費用とする。維持費用の算出に必要な劣化度 I II の塗装費用推移と毎年の塗装実施額とその結果としての増減額を合わせて図 3.9 に示す。図 3.8 の劣化度 I と II を取り出し、費用に換算したものが図 3.9 である。

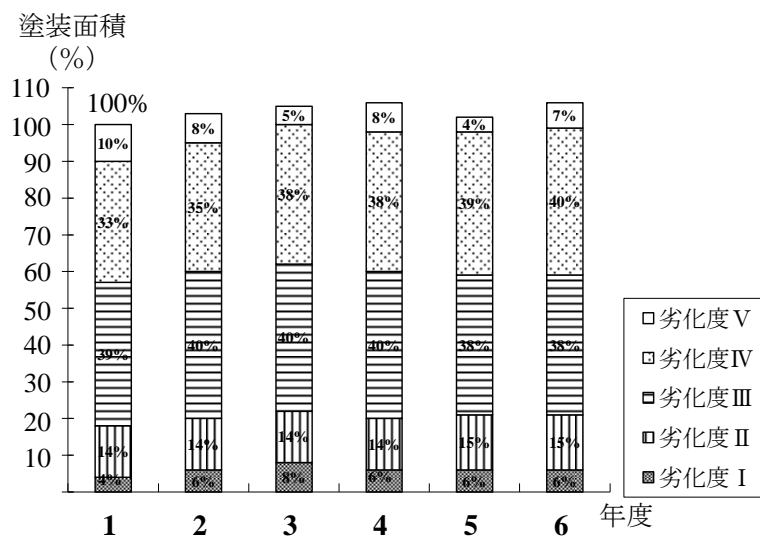


図3.8 劣化度別塗装面積推移

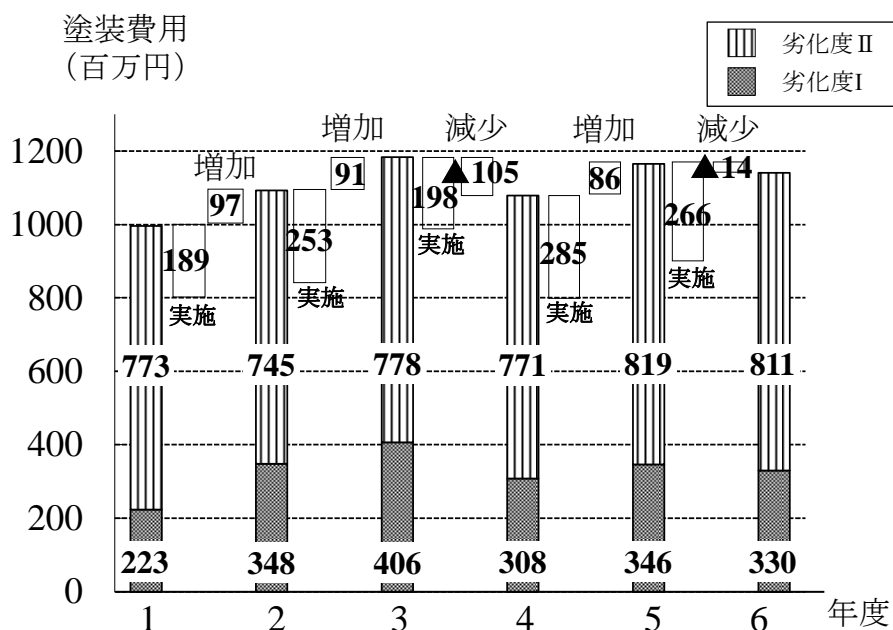


図3.9 劣化度IIIの塗装費用推移

1年度の劣化度調査の結果、劣化度Ⅰが223百万円、劣化度Ⅱが773百万円で、計996百万円に対し、189百万円の塗装を実施した結果、2年度の劣化度Ⅰが348百万円、劣化度Ⅱが745百万円で、計1,093百万円となり、増加額が97百万円となる。1年度の増加させない維持費用の算出は、増加額の97百万円と実施額の189百万円の合計で、286百万円と考える。以降計算を繰り返していくと、2年度344百万円、3年度93百万円、4年度371百万円、5年度252百万円で5年間の平均額は約270百万円になる。

図3.9から集合体基準の劣化管理を適用し、評価点による優先度に基づき塗替えを始めた3年度は、塗装実績198百万の結果、4年度のⅠⅡの面積は減少し、費用に換算すると▲105百万となった。必要な維持費用は、その和の93百万円となり、適用しなかった1、2年度の286百万円と344百万円に比較し、1/3以下に減少している。4、5年度は、評価点による塗替え以外に、計画検査に伴う塗替えなど良好な部分への塗替えをした結果であることは既述した。

### 3.2.4 工場設備の劣化管理における塗装の管理の結言

工場設備の劣化管理には、設備劣化の評価のための検査や寿命予測評価の技術の他に、抜けの無い劣化抽出やリスクに基づく対応計画の策定が可能な仕組みが必要な旨を述べた。また個別の寿命予測でなく、まとまった範囲を管理の対象とする集合体で行う劣化管理があることを述べ、工場設備の塗装管理の実例を基にして集合体で行うマネジメントの有効性を示した。集合体で行う塗装の劣化管理を以下の手順で説明した。

- (1) まとまった面積を持つエリアを管理の対象とし、発錆率による塗膜の劣化度で評価する。塗装の劣化は、散在しており程度もばらついて、かつ発現しても直ちに影響が出ず、リスクに基づく判断が難しいので、劣化度ごとの面積比に評価点をかけ合計点数をエリアの評価点とし、高い点数から塗替えの優先度を設定する。
- (2) 工場全体の劣化状況の把握や塗替えの計画、費用算出や各種解析、長期にわたる塗替え周期に関する検証に必要なデータを整理する。工場全体、およびエリアごとの塗膜劣化の状況を把握して、劣化を進行させない必要塗装面積や費用の算出、塗替え周期の短いエリアの改善を行う。
- (3) 10年程度の長期にわたる塗替え周期に関する検証は困難であり、各種解析が行える必要なデータ項目を示し、検証の実例として15年間の調査による異なる環境条件の劣化進行を示した。塗り替えを行った平均経過年数は8.1年、塗り替え後に塗膜寿命の劣化度Ⅲに進行した経過年数は、一般環境で8.3年、海岸近傍で7.5年、栈橋では4.7年であった。
- (4) 集合体基準の劣化管理を適用し、劣化状態を劣化度Ⅰ～Ⅴに分類し、主観的なイメージから定量的な評価点による優先度に変更して塗替えした場合の有効性を、塗装実績に占める劣化度Ⅰの割合の増加分により表現した。

実績のデータを蓄積して、弱点エリアの塗装の塗料や施工要領の改善による寿命延長やコスト低減を図るとともに、劣化の防止と施工面から効果的なエリアに見直しをしていくことが今後の課題である。

### 3.3 配管の劣化管理<sup>[132],[133]</sup>

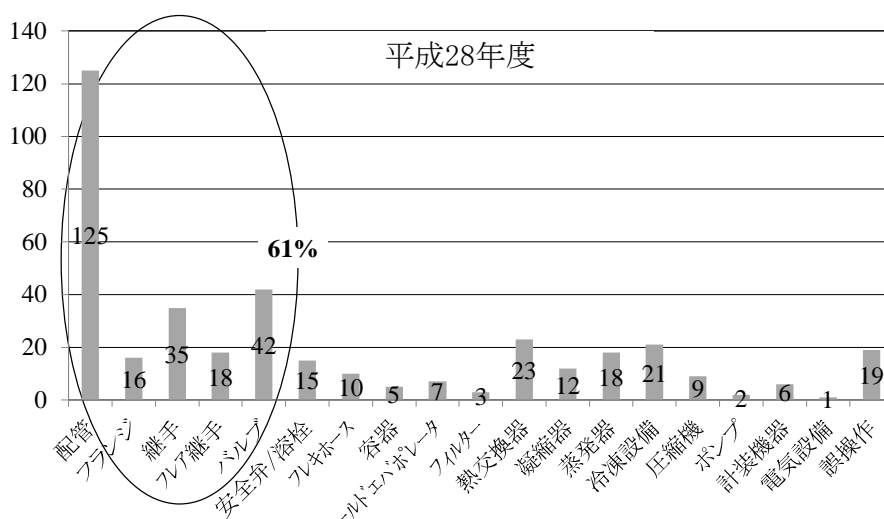
産業インフラとして急激な膨張を続けた石油化学や石油精製のプラントには、40年を過ぎて稼働しているものが多くある。プラントは圧縮機やポンプ等の動装置、塔、槽、熱交換器等の静装置、それらを接続する配管類から成っている。また多種のプロセスを有機的に繋げて連続化しており、一部の故障や事故はプラント群に影響を与え、生産機会の損失は他業種に比較して甚大である。可燃性、毒性、腐食性流体等の物質は苛酷な条件下で取り扱われることが多く、設備の劣化に与える影響が大きい。さらに外面腐食もある。火災、漏洩事故が発生すれば、その周辺地域への影響も著しく、安全安定操業は企業存続の基盤である。しかしながら保安事故はたびたび発生しており、最近の大企業の事故は大型化、かつ複雑化している。社会的にも事故災害を防止するマネジメントシステムが要求されている。事故統計から規模の大きい事業所の配管管理は十分でなく、対策も未完で事故発生リスク面から解決すべき喫緊の課題である。本稿では配管の劣化管理のあり方について業務フローで示した後、長期連続運転の実現に喫緊の課題と成っている外面腐食対応を主体とした配管管理の充実について述べる。

#### 3.3.1 配管管理の要求<sup>[132]</sup>

消防白書の石油コンビナートの事故発生状況の推移<sup>[32],[38],[132],[134],[135]</sup>によると、近年は200件を超え高止まりしている。平成25年と28年の石油コンビナートの一般事故発生状況を表3.5に示す<sup>[32],[35]-[38],[132],[134]</sup>。平成25年の事故228件で、総数698事業所の内、レイアウト規制の第1種184事業所が158件、発生確率0.86となっている。平成28年では事故250件で、総数686事業所、レイアウト規制の第1種174事業所が176件、発生確率1.01となっている。それ以外の事業所に比較し明らかに発生確率に差があり、最も管理されている筈の事業所の悪い結果が継続していることに驚かされる。また図3.10<sup>[38],[132],[134]</sup>は、高圧ガス保安協会の高圧ガス関係事故集計<sup>[136],[137]</sup>を基に、高圧ガス製造事業所の平成28年度の事故387件を機種により分類したグラフである。フランジ継手やバルブを合せた配管の割合は61%を占め、事故防止の観点から配管管理の強化の必要性を示している。さらにコンビナート等保安規則が適用される大規模製造事業所に絞り込み、保安法関係事故を機種で分類したものが表3.6<sup>[3],[34],[38],[132]</sup>である。同定義の配管の割合は、概ね60%を超えている。配管は事業所単位で1,000kmオーダーの長距離、かつ広範囲で有機的に接続されており、形状も複雑で部品数も膨大、使用条件も多様で管理すべき事項が多々ある。また経年劣化の主要項目である外面腐食の進行は、大気中の硫化物や海塩粒子等の付着、装置の構造、運転温度、断熱材下への雨水の侵入などの関係で変化する。設備の経過年数が進み弱点の発現は保安事故や長期停止のリスクに繋がるので、信頼性確保とコストの最適な配管管理が要求されている。海外でもRBIを取り入れた配管管理の研究<sup>[138]-[142]</sup>が進められているが、検査に重点があり配管管理の方法としては不足のようである。

表 3.5 石油コンビナートの一般事故発生状況

		平成 25 年度			平成 28 年度		
		特定事業所数	事故件数	発生確率	特定事業所数	事故件数	発生確率
第 1 種	レイアウト適用	184	158	0.86	174	176	1.01
	適用外	194	22	0.11	189	25	0.13
第 2 種		320	48	0.15	323	49	0.15
合計		698	228	0.33	686	250	0.36



出典 高圧ガス保安協会 平成28年高圧ガス関係事故集計から筆者が分類

図3.10 高圧ガス製造事業所の事故（機種）

表3.6 コンビ則高圧ガス製造事業所の事故

	① 配管	② 配管 フランジ	③ バルブ	④ 熱交 フランジ	⑤ 計装 機器	⑥ 静回 転機	⑦ 合計	①+② +③ /⑦	配管 %
平成17年度	6	1	2	0	0	6	15	0.600	60.0
平成18年度	18	4	3	4	1	7	37	0.676	67.6
平成19年度	10	1	5	5	0	10	31	0.516	51.6
平成20年度 <sup>*1</sup>	19	3	6	2	0	13	43	0.651	65.1
平成26年度 <sup>*2</sup>	20	3	4	2	2	14	45	0.600	60.0

出典 高圧ガス保安協会

\*1 平成20年度途中で公表された43/79件のデータ分類による

\*2 平成27年高圧ガス関係事故集計から筆者が分類

### 3.3.2 配管管理の業務フロー

設備管理部門の要員が配管管理を行う際に、考慮すべき事項やデータをどのような業務フローで対応しているかを整理したものが、図 3.11 の配管管理の業務フローである<sup>[132]</sup>。

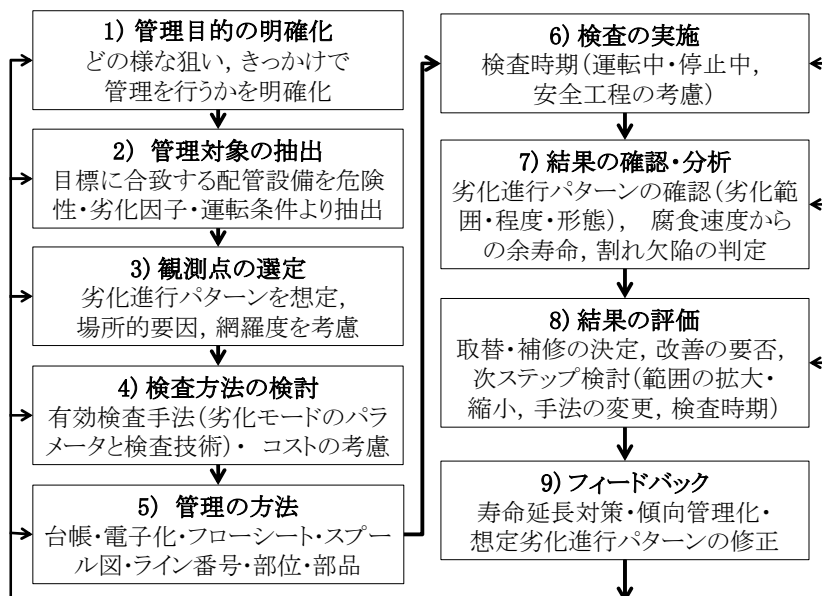


図3.11 配管管理の業務フロー

#### 1) 管理目的の明確化

配管管理を行う動機や目的には、行政指導による発生重大事故の類似再発防止や社内外の事故トラブルの水平展開などの他、補修更新部位の工事履歴の確認による再発防止、検査履歴からの劣化兆候のフォロー、適用法規による法定点検を含む傾向管理、未検査部位の確認による未然防止などがある。未然防止では、故障物理から想定される劣化の懸念の他、設計・施工時の不備のカバー、影響度や信頼性のリスクによる要求、改造や運転条件の変更に伴う要求などがある。管理の目的は、流体の組成や運転条件と材質の組合せから劣化モードの特定による他、適用法規も満足させる必要がある。流体の組成では、劣化に影響する微量成分の濃度やスラリー、スラッジなど、運転条件では、温度、圧力、流速、pH、密度などの条件の他、使用年数も考慮に入れる必要がある。

#### 2) 管理対象の抽出

管理対象の抽出では、目的に合致する配管が持つ火災や爆発、毒性、有害性、生産、品質、環境への潜在的危険性 (Hazard) と腐食、摩耗、閉塞、振動、応力、疲労、脆化、劣化の Hazard を顕在化させる劣化因子を運転条件との組合せで評価し、配管のランク付けを行い、優先度を設定する<sup>[88]</sup>。評価は、普段使用されていないが起動時などの特殊な時の使用やバッチ運転\*、触媒の活性化や再生に関与する配管、微量成分でも濃縮の可能性などの運転背景をしっかりと掴み、運転条件の変更など使用履歴も考慮する。配管管理の管理対象の抽出のための優先度設定の考え方を図 3.12 に示す。



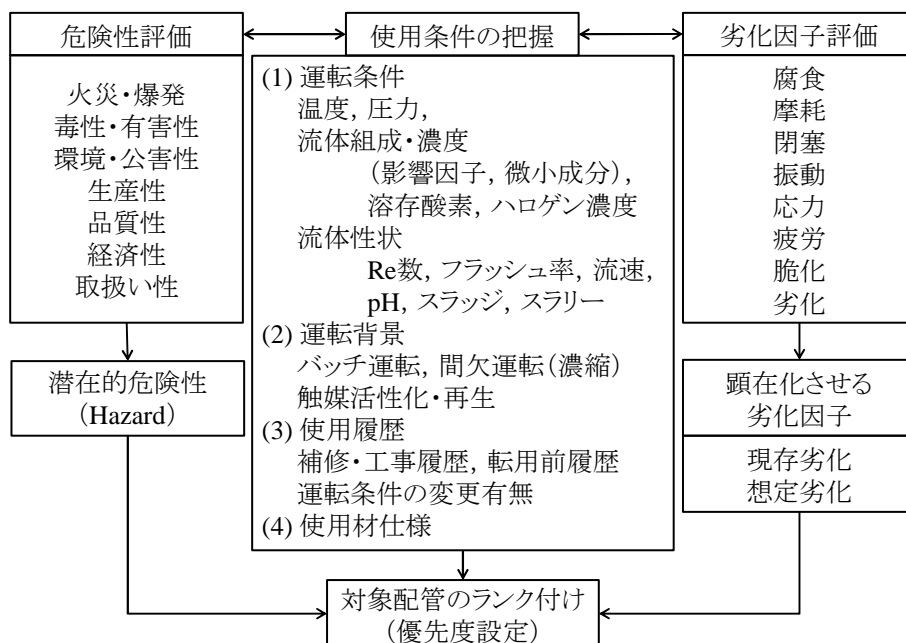


図3.12 管理対象抽出のための優先度設定の考え方

### 3) 観測点の選定

観測点の選定は、劣化進行のパターンを想定して、場所的要因、観測点の網羅度を考慮して選定する。すでに、どのような配管を管理するかが明確になっており、どのような部位、点を観測点とするかを設定する。部位が設定されていて検査計画する場合もあるが、その場合であっても優先度に応じて検査が実施される。観測点の選定の際に考慮すべき事項をフローにまとめ、図 3.13 に示す。

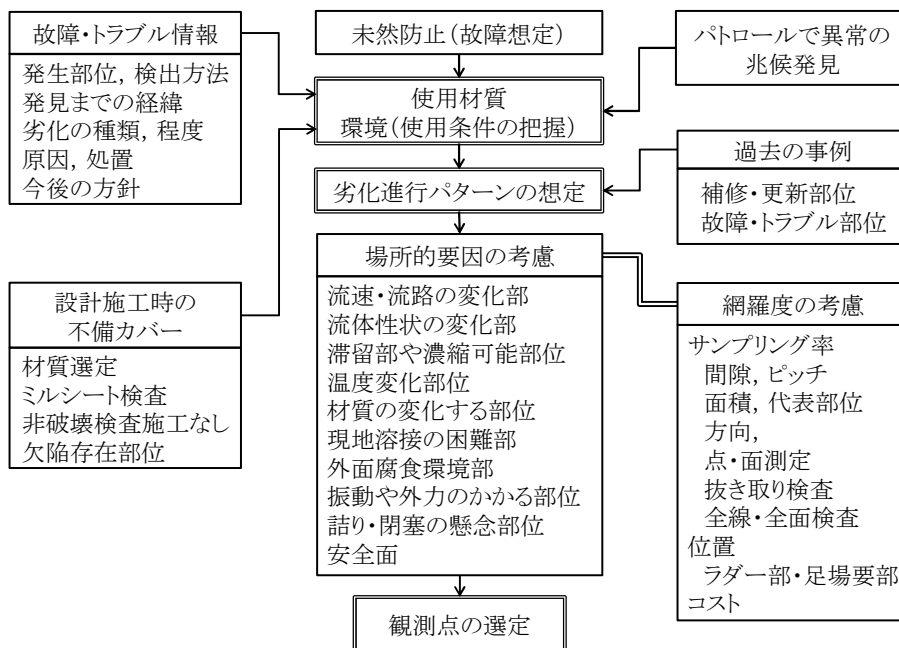


図3.13 観測点の選定のフロー

#### 4) 検査方法の検討

検査方法の検討では、想定した劣化進行パターンで、観測点を決めた後、その劣化程度を知る有効なパラメータとそれを計測する検査技術について検討する。有効な検査手法が無く、故障・トラブルの影響が大である時には、改善を検討しなければならない。改善は、傾向管理が可能な検査手法の取り入れと劣化因子の除去による管理の不要化の検討が必要である。また、検査に伴う足場、断熱材の解体復旧、塗装の除去復旧、下地処理などの付帯工事に伴う費用についても考慮が必要である。観測点の選定や検査方法の検討では、API570<sup>[143]</sup>やJPI-8S-1<sup>[144]</sup>、KHKS 0851<sup>[145]</sup>などの配管維持規格や検査規格があり、具体的な方法が詳細に記述されている<sup>[104, [146]-[148]]</sup>。それらの付属書には、観測点とすべき部位の事例なども図示されている。ただ設備管理のマネージメントとして、配管管理をどのように構築していけば良いかという設備管理のPDCAの観点には不足していると思われる。

#### 5) 管理の方法

配管管理の困難な理由に、管理すべきデータの膨大なことがあげられる。配管を構成する部位の1か所でも故障を起こせば大事に至る可能性があり、そこに難しさがある。ただ漏洩の発生でも、影響の少ない部位とそうでない部位を全く同様に扱うのは、効率的にも経済的にもムダである。配管管理を行う上では、管理の必要な配管に対し、的確な代表部位を見つけ出し、効率的に管理を行うことが重要となる。さらにその管理の方法も管理対象の配管ごとに、配置図、フローシート（P&I、EFD）\*、スプール図\*、経歴台帳、傾向管理台帳やグラフ、測定用紙、個別工事の検査記録などのツールを使って、肉厚測定や放射線検査の検査手法、オリフィスや制御弁、T管衝突部などの部位や部品、流体などで管理することとなり、データ解析も含めて電子化（Electronic Data Processing System ; EDPS）によるシステム化が欠かせない。図面などの書類やデータ、履歴が属人化せぬよう情報の共有を最優先として、システムによる一元管理を進めるべきである。その後に計画の支援として、管理対象、故障モード、劣化部位、検査手法などによる絞り込みや抽出が可能となるデータの登録などで、システムの充実を図っていけばよい。管理の実例として、以下を紹介する。

##### (1) プロセスの工程ごとのフローシート

流体、温度・圧力の設計条件、サービスクラス\*などで、配管ラインを設定し、配管ラインにユニークとなる番号などを記載して、フローシートで、管理対象の配管ラインが分かるように管理する。

##### (2) 配管検査（肉厚）実績計画管理表

管理対象の配管ライン（番号）ごとに、設備間の繋がりを表した From-To で整理し、配管サイズの追記などで、現地の該当配管が判別できるようにする。設計条件とともに設置年や検査周期、実績と計画の年表などの記載で、経歴と計画が分かるようにする。概略の減肉速度 mm/y を記載できれば、肉厚測定の検査周期の誤った設定を防止できる。

##### (3) スプール図\*

立体的に見える配管図上に検査や肉厚測定の実施部位やポイントを付番などで明確にする。

#### (4) 配管検査（肉厚）台帳

スプール図の検査部位の番号ごとに履歴が分かるようにしたもの。肉厚測定では、元厚みと必要肉厚を記載しておき、測定値と前回値との差異を記載すると判断の誤りを防止できる。毎回、配管ラインの代表部位として、適切かの評価とともに残存寿命の評価を実施し、台帳に記載する。

#### (5) 検査（肉厚）記録用紙

個別の検査記録として、実施部位の明確化と検査結果の照合ができるように記録する。懸念がある部位は、朱記やマークにて、後々の管理で抜けの無いよう工夫する。

#### (6) 検査・工事記録

検査や工事を実施した際の概要が分かるように記録を作成する。実施年月日や該当配管の仕様、配管番号、動機、施工者、検査・工事費用、工事概要、原因、処置、対策、故障解析、使途解析、次回検査年月日、フォローすべき事項などを記載する。簡易図などで表現しても良い。関係者への開示で情報の共有を図る。

### 6) 検査の実施

検査の実施に当たり、運転管理部門による日常点検、設備管理部門による検査、専門会社に依頼する検査に区分して、以下の事項を考慮する。

- (1) 日常点検では、五感を中心としたパトロールで、変色、発錆、漏れ跡、変形、振動、異音、異臭、断熱材の不良などの異常の兆候を見つけ、検査対象の絞り込みの材料に有効に使う。
- (2) 設備管理部門による検査の実施時期を OSI、SDI など、安全な工程に配慮して設定する。OSI では、プラントの一部の工程の操業停止、SDI では、定期修理中の他、必要なら臨時にプラントを操業停止しての検査も考慮する。
- (3) 検査計画は、必要な検査精度が得られる安価な検査方法と検査に要する時間の確保、検査器具が使用可能な作業環境、判定基準の準備と不合格時の処置を考慮しておく。
- (4) 工程管理では、足場設置解体、断熱・塗装工事、検査の下地処理などの付帯工事の期間、検査・工事に必要な要員を確保する期間、検査結果の不良の際の補修期間などを他の作業・工事との錯綜も考慮して確保する。
- (5) 予算管理は、計画予算の遂行と臨時に行う検査・工事の予算を確保し、検査・工事費の実績解析で、必要なら作業方法などの改善を検討し、次回へのフィードバックを図る。適切な代表部位の選定と基準に基づく方法による検査・工事の費用を予算化するが、保全等級に応じた保全方針に基づく重点指向的な検査の遂行に努める。
- (6) 検査時期や工程管理、予算管理にも影響する補修に必要な長納期品の手配などの材料管理を考慮する。
- (7) 検査・工事の準備として、工事の発注のための仕様打合せで、検査・工事の範囲、内容、要領、工事期間、工程、工事場所の条件、関連工事の有無と内容、安全に関する事項や規則、現場説明などを行う。
- (8) 作業中の安全確保として、圧抜き、液抜き、洗浄、冷却、ロックやマーキングの規則\*による縁切りなど安全措置の方法と担当を明確に定め、配管の状態を安全に管理する。OSI では、流体や運転温度、圧力などを共有する。足場の確保とともに墜落防止や機

材の落下防止にも配慮する。

### 7) 結果の確認・分析

検査結果を確認し、劣化の有無を判断する。劣化速度の有意差や変化率の違いの有無、劣化部位の限定や最大値の推定などを分析し、劣化進行パターンを確認する。劣化損傷の範囲や部位の特定、劣化モード、劣化の程度を把握し、劣化因子のパラメータと検査方法のマッチングや結果の精度を評価する。肉厚測定結果からは、腐食速度を求め、余寿命の推定を行い、割れなどの劣化については、各種判定法で評価する。

### 8) 結果の評価

結果の確認・分析を基に、補修や取り替え、更新の判定を行う。短寿命の場合には、原因を究明し、改善の要否を検討し、想定劣化進行パターンに違いが発生しておれば、その修正の要否を評価する。検査結果を基に、範囲の拡大、縮小、変更、検査手法の変更や次回検査時期などの次ステップの検討を行う。それら結果の評価のフローを図 3.14 に示す。

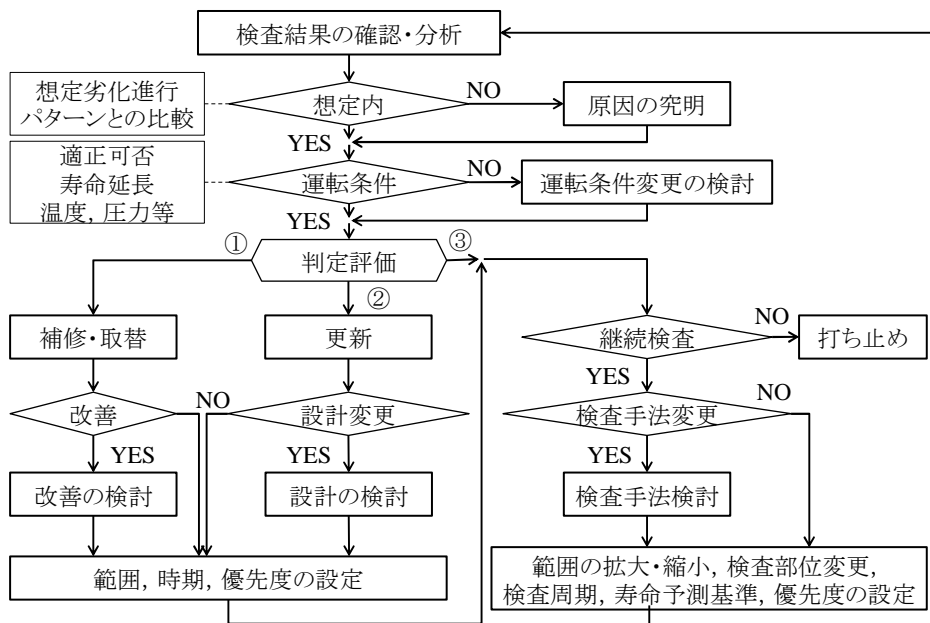


図3.14 結果の評価のフロー

### 9) フィードバック

結果の評価は、寿命延長対策や傾向管理の対応、想定劣化進行パターンの修正などにフィードバックして、配管管理のレベル向上を図る。結果の評価による今後の補修や取り替え、更新の計画、その後のフォローのための検査の計画にフィードバックを行う。配管の敷設、改造、更新により、配管の変更が生じた際には、履歴管理や図面の修正などの関係書類やデータをすべて変更する必要がある。関係書類には、P&I や EFD を含むフローシートや配置図、配管図、スプール図、部品図の他、検査実績計画管理表、経歴台帳、傾向管理台帳やグラフ、測定用紙などもある。配管仕様や運転条件、配管部品についてもフィー

ドバックし管理する。寿命延長対策の検討では、原因究明から可能なら運転条件の変更も視野に入れる。高級材質への変更では、ステンレス材への配慮事項として、低炭素鋼 L 材や Ti、Nb 添加の安定化鋼の採用、炭素鋼では、応力除去焼鈍を施した材料の適用などがある。形状の変更では、配管継手の差し込み部を突き合せ溶接に変更して隙間部の回避や T 管衝突部の 45 度挿入に変更で衝突緩和などがある。その他に電気防食、防食テープや樹脂被膜、溶射の適用もある。検査は、保全等級による保全方針に基づいた計画で対応するが、劣化パラメータを的確に把握する手法の適用と同時に傾向管理を可能とする試みも検討し、想定劣化進行パターンに差異が生じた際には、代表部位や検査手法の変更、管理範囲や配管ラインの増加や減少、変更などの修正を加えてフィードバックする。

### 3.3.3 配管管理の強化<sup>[132]</sup>

毎年の定期検査の実施で健全性を確認していたプラントは、認定事業所制度を起点として、長期連続運転が可能となっている。40 年を超える経年化した設備であっても、優れた検査手法や寿命予測技術の向上を基に、高いレベルの管理ができていると考えられる。一方、配管については、その膨大な管理すべき量から、各事業所とも全範囲を見切れておらず、管理下に置くための施策が、途上であると事故実績から推量できる。定期検査の間隔の長期化に伴う工事・検査の集中で、工程や管理する要員、費用面などの制約から、一度に検査が可能な量が制限され、次回検査までの安全担保が困難になっていることも予想される。したがって信頼性向上は日常管理を強化する方向となる<sup>[11],[31],[32],[35],[36],[38],[86]</sup>。さらに外面腐食管理は、ライン管理とともにエリア（ブロック）管理も行い網羅性の向上が必要となる。漏れにおびえる事のないようにする強化には、見切れ、やり切れる方法を採用して信頼性を向上させることが必要である。

#### 1) 日常管理の強化

従来は、運転管理部門によるパトロール時の気付きを中心とした体制で教育を実施し、専門部門は、協力会社と通常検査を行い補完していた。強化は、運転管理部門主体の日常管理でプラントを細かくエリアに分割し、担当を決めて、外面腐食や配管振動を対象に全面を網羅的に行う。設備管理部門は、運転管理部門の日常管理のバックアップ教育を実施し、人材育成を担当する。また運転管理部門のレベル向上が達成され、十分な機能を発揮するまでの間は、OB や専門協力会社を活用した年間計画の全面外観検査 PIP (Plant Inspection Patrol)の導入で信頼性の確保を図る。オンサイトのみでなく、プラント外への送り出し配管や受け入れ配管部分についても、その日常点検要領をルート図、写真、コメント作成等で、パトロール要員が点検し易く、抜けの無い点検ができるようにする。

PIP とはトラブル防止を目的に専門家が目視、および簡易な検査装置を使って予め定めたエリアの全面を計画的に外観し、不具合を抽出する検査パトロールを言う。専門的な視点での気づきを上げるだけでなく、運転管理部門の日常点検では抽出が難しい不具合をカバーし、専門家による結果と運転管理部門の日常点検を照合することで、着眼点や判断基準の気づきを醸成できる。全体の網羅的な検査で膨大な労力やコストをかけ健全性を担保するやり方は合理的と言えず、発生の可能性を潰す日常管理の強化がより適切である。た

だ数および質の両面で通常の体制での対応はなかなか困難と言わざるを得ず、PIP による支援が実効性を上げる。点検対象は配管部品のバルブ、伸縮継手、スプリングハンガー\*、吊りバンド、ダミーサポート等の不具合も対象としており、テーマを絞った点検も可能である。外面腐食の点検は、外観目視が主体であり経験や感性による個人差が出やすい。そこで腐食・構造・材料・必要板厚などの知識、点検上の注意事項、過去のトラブル事例、断熱材や外装の要領、防食塗装等の教育とその確認試験で、外面腐食の点検技量を認定し、認定者の点検により、精度向上を図る。外面腐食診断士のような制度を設ければ、点検への動機付けや責任感の醸成に繋がる。

## 2) 先読みパトロール

運転管理部門の日常管理の強化では、漠然と異常の有無を点検するパトロールでは無く、断熱材の雨水浸入不良部とか、配管の振動 100 $\mu$ p-p 以上というように目的を明確にして、**Time** (時間を変え、頻度を考え)、**Place** (場所を変え、面積を分担し)、**Object** (項目を絞り、テーマを決めて) で、網羅的に行う。さらに日常点検での異常兆候の発見力向上には、何故そうなっているのか、放置したらどうなるかの深読み・先読みの観点を取り入れる。第2章の日常点検の強化で紹介している図 2.16 の深読み教育資料の例では、グリースガンの放置を見て軸受異常を深読みする<sup>[93]</sup>。図 2.17 の先読み教育資料の例のような不具合の放置が及ぼす影響を教育資料に整理して、伝えていくことが理解と感性を高めさせる。

## 3) 計画検査の強化

日常管理が基盤であるが、計画検査の精度向上による信頼性確保も必須である。計画検査には、管理する単位ごとに定められた **Tag** と仕様、配管図面に、工事・検査記録の基盤の整備が必須となる。通常の担当体制の中で、不足する配管管理に関わる基盤の整備を行う時間の捻出は困難であり、長期間を要することが予想される。点検・検査の実施から計画的な補修で、管理下に置くまでのリスク低減のために、設備管理に長けた専門会社への外注を含め、専任要員による体制の構築で短期化が求められる。さらに基盤が整備されても、基盤を維持し、基盤に基づく計画を確実に実行できる体制の構築が必須である。配管管理の強化は、相当な覚悟で取り組まねば達成できない。

### 3.3.4 計画検査における劣化管理の要領<sup>[132]</sup>

以下の4つの視点の劣化管理が必要で、管理要領の検討を進めるが、対象、範囲のどこまで深掘りするかが重要である。また管理に必要なツールとしての図面についても、作成と管理の具体策を定め取り進めすることがポイントである。

- (1) 腐食等による内面の劣化管理
- (2) 主に外面腐食による外面の劣化管理
- (3) フランジ部等の配管締結部の劣化管理
- (4) 配管部品の劣化管理

### 1) 腐食等による内面の劣化管理

内面腐食、エロージョン、FAC (Flow Accelerated Corrosion)、熱疲労、クリープ、脈動等が劣化の対象となり、従来は、腐食ループごとに、配管管理シート\*を作成し、流体成分から劣化現象を予測していたが、配管は多岐、複雑、広範囲に敷設されており、部位で抜けを生ずる可能性がある。そこで管理の単位は、ライン管理とし、劣化要因の網羅的抽出から検査の検証の仕組みで管理する。フローシート上に考えられる劣化要因や過去のトラブルを残らず列記して、スプール図で、その劣化要因が考えられる部位を洗い出し、検査・測定ポイントとして、適切に検査管理されているか検証する。抜けのない管理のために、過去の検査・補修実績から劣化要因があるものは、検査・補修の時期を記載し、運転条件の変更や検査・補修をした際に見直す。他プラントにも関係するものは、リストアップして対応を確認する。高圧ガス・危険物・毒劇物・FAC 対象の熱水配管等の重要度の高いラインは、スプール図が必須である。

図 3.15 の配管管理の部位の例のように配管管理を行うには、弁などの部品その他、多種多様な部位のデータ入力やその図面データの入力などのデータの管理が必要となる。経年化による劣化を管理するには、部位管理が必要で図形が無いと部位を表現することの難しいことが分かる<sup>[11]</sup>。部位管理を可能とする必要から、フローシート、配管の形状等、図面データと配管仕様データをリンクできるシステムが要求される。

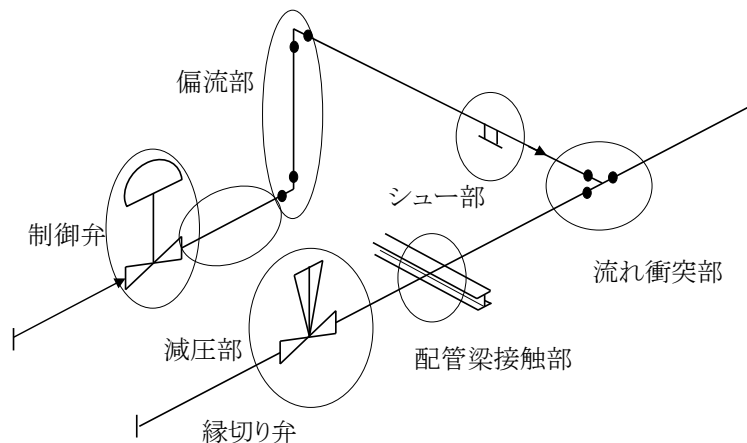


図3.15 配管管理の部位の例

### 2) 主に外面腐食による外面の劣化管理

CUI (Corrosion Under Insulation) を含む外面腐食を主体とした配管管理では、配管梁接触部、結露配管部、小口径配管の取出し部、サポート部品なども対象に、劣化要因としての熱疲労や振動などを加えた運転管理部門による先読みパトロール等で、日常管理の強化を図る。それを担保に、分割したエリア管理の計画検査で、CUI や裸配管、配管部品を含めた点検・検査の網羅性を強化する。

従来は、配管管理の単位は、From-To で、影響度と信頼度からリスク評価して、検査実施の可否を判断し、対象の配管は、外観目視による 1 次検査の後、全面断熱材を撤去し、

目視による2次検査を行い、ケレン後に3次検査の詳細検査を行ってきた。強化は、管理の単位にエリア（ブロック）管理を加え、最長15年を周期として、全面を網羅できる計画検査を実施する。運転管理部門と設備管理部門の数次のスクリーニングによる評価で、部分的に断熱材を剥しての部分検査を適用できるようにする。計画はエリアで行うが、スクリーニングによる部分検査適用の評価判断は、ラインごとに行う。なおスクリーニングでは、客観的で定量性のある評価・判断が可能となる非破壊検査などの診断技術への取り組みを検討する。

### 3) フランジ部等の配管締結部の劣化管理

締結部では、漏洩管理のためのガスケットやボルトナットの寿命と締付けの緩みを主な劣化管理の対象とする。バルブのフランジ部の検査・補修をする際には、本体ガスケットや軸封部の管理も一緒に対応すべきで、配管部品としての個別管理と整合性を取る。締結部に焦点を当てた日常点検の強化と計画的な空気や窒素による気密検査の実施で、健全性を確認する事も有効である。激しい毒性の流体が流れる配管では、すべてのフランジ締結部や継ぎ手部の増し締めや更新時期などの履歴を含めて、個別に管理することが必要で、配管図やスプール図が必須となる。ここではガスケットに対する寿命の判断やノン石綿\*後の仕様の選定、締付け管理の要領は、省略するが基準を定めて対応すべきである。

### 4) 配管部品の劣化管理

配管の管理では、通常の設定管理に加え、形状が複雑であり、かつ広範囲で、膨大な配管要素を管理しなければならないという配管の持つ特徴が管理を難しくしている。事例事業所では、全長1,500kmの配管があり、弁では、50万個、ガスケットでは、100万枚に達する膨大な数量が約200万m<sup>2</sup>の事業所内に張りめぐらされている。配管管理の対象として配管部品を整理し、部品ごとの管理要領を定める。管理単位は、ライン・部品とし、異常がプラント停止に繋がるバルブなどの部品、スプリングハンガー、トラニオン\*等は、数量、位置等が把握できるように図面管理やリスト化し、専門家による通常検査、またはPIPにて個別に管理する。法定検査に関わらない安全弁、バルブ、エキスパンション等は配管と同じ扱いとして管理する。

### 3.3.5 配管の劣化管理の結言

近年の事故統計の結果からは、整備されている管の大規模な製造事業所でも、配管管理は行き届いておらず、管理下に置く施策も途上で、事故防止の観点から喫緊に解決すべき課題である。事例企業でも、修繕費の15~20%程度を配管の検査や補修の維持費にかけていたが、プラントの建設費に占める配管の割合が30%程度であったのに対し、そこまでは占めていなかった。広範囲で複雑に敷設されている配管は膨大な配慮すべき部位や部品を有しており、経年化に伴い劣化を懸念する箇所が増加して事故・トラブルのリスクが高まっている。配管管理は部位・部品で管理する必要があり、管理するための論理的、体系的な配管の劣化管理のマネジメント技術を業務フローと具体的な要領で提示した。

(1) 配管管理の業務遂行の具体的なPDCAの要件を管理目的の明確化、管理対象の抽出、



観測点の選定、検査方法の検討、管理の方法、検査の実施、結果の確認・分析、結果の評価、フィードバックの段階ごとに示した。

- (2) 日常管理の強化はエリアに分割して担当を決め全面を網羅的に行うが、信頼性を確保するため PIP など専門家による補間や資格制度の取入れなど人材育成も示した。さらに異常兆候の発見力を向上するマネージメントとして先読みパトロールを示した。
- (3) 計画検査における劣化管理の要領をプロセス流体による損傷などを対象とする内面、大気腐食や劣化による損傷を対象とする外面、フランジ部等の配管締結部、配管部品で示した。

事例企業の全事業所における生産に影響を与えたトラブルの配管割合は、配管管理強化前の数年を 25~30%、月 2 件程度で推移していたが、強化年から半減し 3 年目には、トラブル総数の削減が進んで配管割合 13%、月 0.4 件に減少した。このまま配管管理強化の PDCA を回していけば、トラブル撲滅も可能と考えられる。

### 3.4 外面腐食による劣化の管理<sup>[39],[104],[132],[133]</sup>

設置後 40 年を超えたプラントが多く、設備の経年劣化が進んでいる。経年劣化のマネージメントには、工場設備の経年化による劣化の管理でも論じたが、以下の 3 項目が必要である。

- (1) 設備の劣化の抜けの無い抽出のための仕組み
- (2) 設備の劣化評価のための検査や寿命予測の技術
- (3) 設備の劣化のリスクに基づく対応計画が策定可能な仕組み

外面腐食の劣化管理は、近年になり種々提案されるようになってきた<sup>[116],[149],[150]</sup>。ここでは、すべての企業が直面している大きな課題である外面腐食の劣化管理をリスク評価による優先度設定の適用と長期連続運転の実現を目指した信頼性向上で最適化の施策について、適用例と効果を含めた考察を述べる。

#### 3.4.1 外面腐食の劣化管理への取り組み

経年劣化の管理の中で、喫急に解決しなければならない最重要事項は、外面腐食管理である。部位と時期の特定が困難なことがその要因となっている。外面腐食は、雨水の浸入や結露等とともに保温・保冷材の有無、塗装の効果、保温・保冷材の切り欠きの有無、設備や配管の形状、ラグやサポートの構造など多くの条件が腐食要因となり、条件を整えればどこにでも発生する。従って、その発生場所、発生時期の特定が難しく、内面腐食と比べ定点測定による傾向管理が難しく、事故防止の観点からも外面腐食対策を的確に講じることが重要となっている。さらに配管の検査は、管理対象範囲が膨大で高所や狭い場所に設置される場合もあり管理しづらい面がある。特に、保温材や保冷材で被覆されている高圧ガス配管の外面は、雨水などの浸入により腐食が進行し、配管にピンホールを発生させるなど重大な事故につながる恐れがあり、保安上の問題でもある。1989 年に高圧ガス保安協会から外面腐食対策に関する報告書<sup>[151]</sup>が発行される前頃から経年劣化の主要項目として社会的にも問題視されてきた。しかしながら検査の実施、特に大型の機器に対しては、足

場の設置解体、断熱材の撤去復旧、前処理、重防食を含む塗装など付帯工事を含む費用が膨大で、従来のプラント単位ごとの計画の立案から検査の実施で対応するには、かなりの負担であった。特に認定事業者制度に伴う検査機会の減少で、検査時期に検査・工事が集中し、労働力や工程の制約もあった。そこで、より効果的な計画の立案で、検査を実施していく必要から優先度を設定するシステムが要求された。事例事業所では 1991 年までの設備管理の実績データを基に、外面腐食の検査指針を 1992 年に策定し、以降この指針に基づき、外面腐食への取り組みをしており、実績により指針を向上させてきている<sup>[111]</sup>。また事例企業の他事業所にも展開し、機器と配管の CUI の検査に適用している。2008 年にはそれまでの加点方式により優先度を設定する方法から、蓄積データを基に、腐食速度の評価で寿命予測する方式に変更した。点数による優先度設定から、寿命予測により信頼度を評価し、影響度とのリスク評価で、優先度を設定する方法とした。ここでは、筆者が事例企業で取り組んだ、断熱材下の外面腐食のマネジメントを中心に論じる。

### 3.4.2 外面腐食の管理の対象<sup>[148]</sup>

外面腐食は、すべての構築物において発生する劣化現象と言え、管理すべき対象も多様である。過去に経験したトラブルを整理して、管理の対象を設定した事例を以下に示す。

#### (1) 大型機器

検査のための足場を含む付帯費用が嵩む機器で、図 3.16 の事例<sup>[31],[34]</sup>に示すような自立塔で、概ね高さ 15m を超える機器や 30m<sup>3</sup> を超える貯槽などを管理の対象とする。通常、検査費用が経費として扱われる修繕費の枠を超え企業の方針に影響するほど嵩むので、特にカテゴリーを設けて企業リスクとして取り組めるよう管理する。CUI への取り組みとして、以降の説明の中心となる対象である。

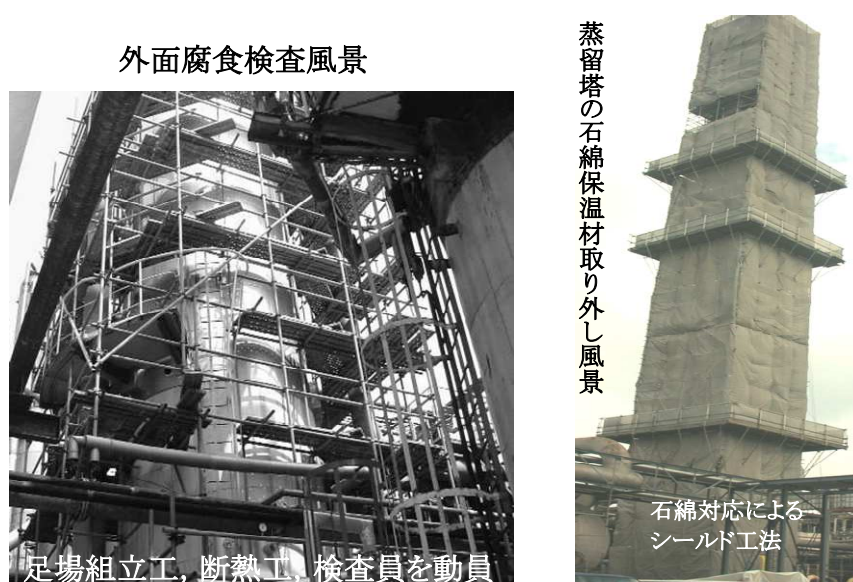


図3.16 大型機器の外面腐食検査の事例

## (2) その他機器

大型機器を除く塔・槽・反応器・熱交換器などで、プラントごとの修繕費の枠で対応が可能な対象である。

## (3) 断熱被覆配管

適用法規の高圧ガスや危険物流体のリスクの高い配管で保温材や保冷材の断熱材で被覆されている CUI の対象配管である。

## (4) 裸配管

適用法規の高圧ガスや危険物流体のリスクの高い配管で、断熱材で被覆されていない配管、特に運転温度が気温より低くなる部位では、結露するのでより腐食し易い。From-To で、ライン管理を行う対象である。

## (5) 配管梁接触部

適用法規の高圧ガスや危険物流体のリスクの高い配管で図 2.23 の例に示すようなラック上に敷設されている配管と梁の接触部位。隙間に雨水が滞留し腐食し易い環境を形成する。ラックの梁ごとに識別が可能な管理が要求され、規模の大きいプラントでは数万か所の管理が要求される。

## (6) 小口径配管の取出し部

小口径配管の取出し部では雨水が浸入し易い構造部であり、配管の肉厚が薄いことからトラブルの発生確率が高い。また本管は断熱、取出し部以降は、断熱なしの状況も見られ結露水などが浸入し易い。図 3.17<sup>[31],[34],[38]</sup>に示す小口径配管取出し部の元弁までは、本管と同じ管理の取扱いが必要である。P&I など個別に識別を可能とする管理が要求される。

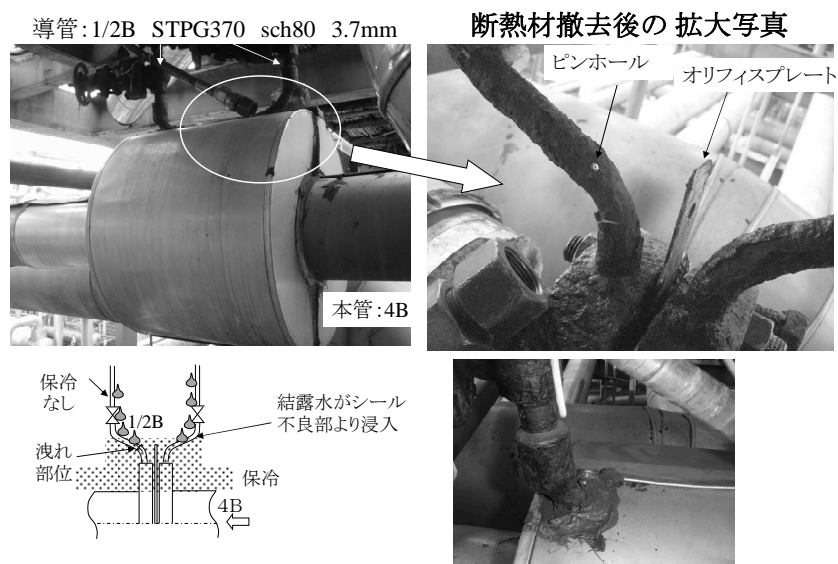


図3.17 小口径配管取出し部の外面腐食の事例

## (7) 計装導管

差圧式流量計のオリフィスの上流下流の圧力取出し導管を含む計装機器用の取出し導管で、元弁以降の導管を管理の対象とする。本管と元弁で縁が切れるので、管理レベ

ルが低くなり、運転中に思わぬ計器の故障に繋がる。1/2B の外径 21.4mm の配管が多く使用され、肉厚測定が難しいので、外形測定での代替などで効率的な検査を工夫している。また継続検査の必要な場合は、コスト面から更新する場合が多いのも特徴。

#### (8) ダミーサポート・トラニオンサポート

配管に直接溶接して支持するサポート部のサポート配管の内側で、本管の外面部位を対象とする。図 3.18<sup>[31],[34],[38]</sup>に示すトラニオンサポートの内側の外面腐食の事例のように、本管が腐食するので、破孔すれば事故に繋がる危険性の高い対象である。同時に設置される場所や構造から検査が困難であり、SDM\* (Shut-Down Maintenance) 時などの機会に、計画的な検査を行う必要がある。スプール図などの併用で、全か所の個別の識別が可能なように管理する対象である。

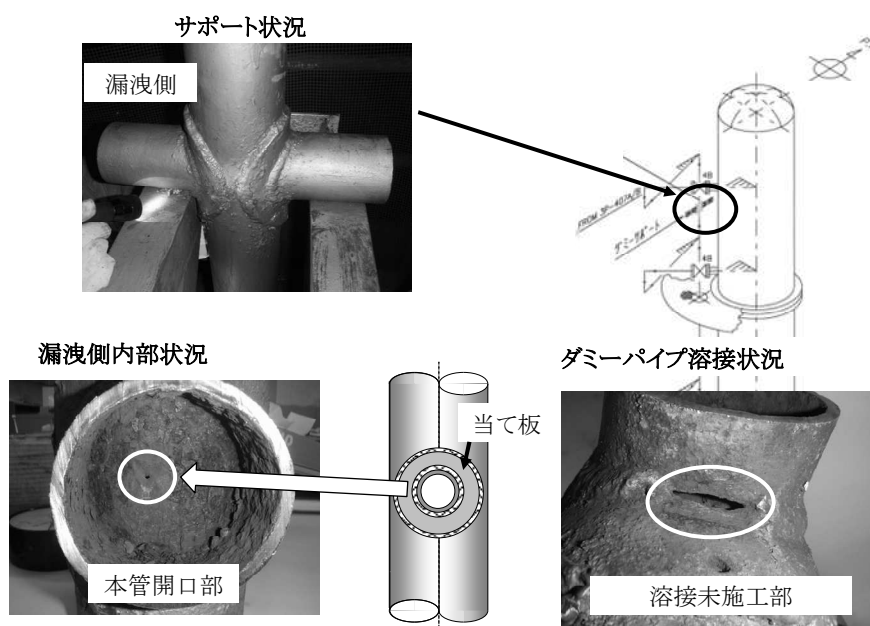


図3.18 トラニオンサポートの内側の外面腐食の事例

#### (9) スプリングハンガー\*

配管熱膨張収縮に伴う熱応力を吸収するために設置された配管部品で、発錆や腐食による固着や作動不良など、その機能を発揮できなくなった際に、熱応力による配管の熱疲労割れなどの発生が懸念される。配置図やスプール図の併用で、個別に識別が可能となる管理が必要な対象である。

#### (10) その他

低合金鋼を含む炭素鋼と SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L のステンレス鋼製の設備、配管を対象とする。炭素鋼の場合は、外面腐食による減肉現象、ステンレス鋼の場合は、ESCC (External Stress Corrosion Cracking) で、割れや IGC (Inter Granular Corrosion) で、粒界腐食の現象を外面腐食管理の対象とする<sup>[152]</sup>。炭素鋼やステンレス鋼製のタンク底板の外面腐食も対象ではあるが、タンク底板の腐食として個別の劣化管理すべき対象と考えここでは除外する。配管部品としてはスプリングハンガーやダ

ミーサポート・トラニオンサポート以外にも、バルブや吊りハンガー、伸縮継手のエキスパンション、配管シューなど、配管の劣化管理で述べているように多数が存在するが、ここでは配管の部位と捉えて管理する。塔の頂部から下降するオーバーヘッドの配管など、検査の困難な部位は塔の部位と捉えて管理する。

### 3.4.3 外面腐食検査の優先度設定のシステム

#### 1) 外面腐食の問題と要求

経年劣化の案件の中で、最大の手間と費用を必要としているのが、外面腐食への取り組みである。外面腐食は、大気中の硫化物や海塩粒子等の付着と装置の構造、運転温度の関係等、設備の設置されている環境により、外面腐食の発生および進行速度が変わってくる。特に、外装板の施工管理や維持管理のレベルによる雨水の浸入や結露による外からは見えない断熱材下での腐食管理は、直接外面腐食が発生しているか点検することが困難で、断熱材を撤去して検査すると費用がかさむという問題がある。配管管理と外面腐食検査の費用の推移の事例を図 3.19 と図 3.20 に示すが増加傾向が顕著である<sup>[1]-[3],[34],[38],[86],[87]</sup>。外面腐食対策ガイドの報告<sup>[16]</sup>によれば修繕費の 16%の企業の事例や欧米の 25%の報告がなされている。事例の 2 事業所の割合は、それほどではないが、多額の費用と対応を余儀なくされている。そこで、使用条件や外観の点検結果により、断熱材下で外面腐食が発生していると考えられる設備を選定する外面腐食検査の優先度評価の管理システムが必要となる。

#### 2) 外面腐食の発生因子

外面腐食対策ガイド<sup>[16],[150]</sup>によれば外面腐食の管理は、始めの計画の段階として管理の対象の設定から検査の優先順位付けの対応が要求されている。筆者が事例企業において、構築し実践した外面腐食検査の優先度評価の管理システムについて説明する。まず断熱下の外面腐食について、その腐食メカニズムについて説明する。断熱下の外面腐食の発生要因を特性要因図\*にまとめると図 3.21 に示すようになる<sup>[1],[2],[39],[111]</sup>。5つの要因に整理でき、使用年数や運転温度、断続運転の有無などの運転上の要因、酸性雨を含む降雨や結露や冷水塔近傍などの湿潤な雰囲気などの環境的要因、断熱材や塗料の劣化や破損の他、施工不良による水の浸入が起こる外装的要因、水の入り易い外装の劣化や施工不良を生むフロア一貫通部や各種サポート部、小口径取出し部、さらには入った水が滞留する接触・隙間部などの構造的要因、外面腐食を発生する材質や発生から故障までに影響する使用肉厚などの設計上の要因により構成される。

#### 3) 外面腐食の発生メカニズム

外面腐食が発生するメカニズムについて整理すると炭素鋼の場合が図 3.22、ステンレス鋼の場合が図 3.23 のようになる。炭素鋼とステンレス鋼ではその発生メカニズムに違いがあり、ステンレス鋼では条件が揃えば割れの発生に繋がる。熱履歴や酸性雨、海岸近傍では海塩粒子の飛来、日光の紫外線、振動などの要因により、金属表面に水が接触する防御となっている外装材やその目地などの開口部を塞ぐシール材が経年劣化で破損する。施工不良の部位があれば、当然雨水や結露の防御には成り得ない。断熱材に浸水し、金属表面

の塗料まで浸水すると塗膜の劣化を助長し、ついには金属表面に水分が到達し、発錆して外面腐食が始まる。水分が氷結するか、加熱され蒸発で常時乾燥している運転温度では、外面腐食の発生は起こり難く、水分が滞留し易い構造では、外面腐食が進行し易い。ステンレス鋼では、断熱材への浸水により断熱材中の塩素イオンの濃縮が起こり、溶接や加工時の残留応力や鋭敏化している部位などでは、IGC や ESCC の発生に繋がる<sup>[152],[153]</sup>。

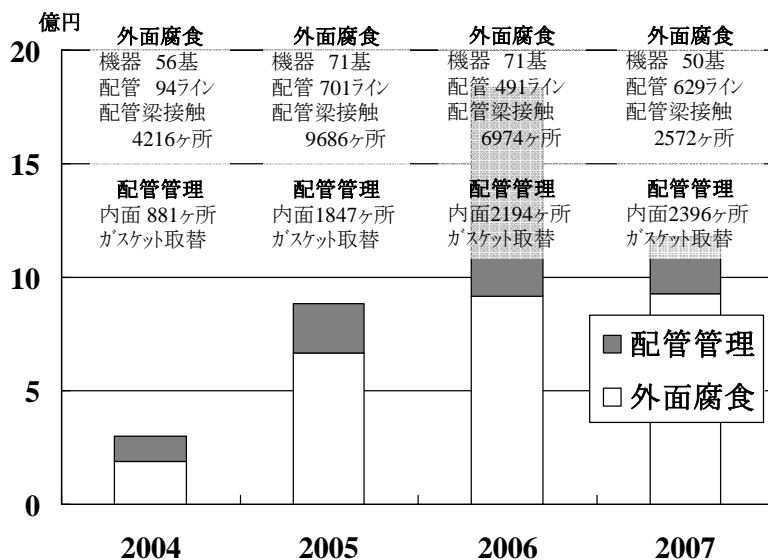


図3.19 配管管理と外面腐食検査の事例

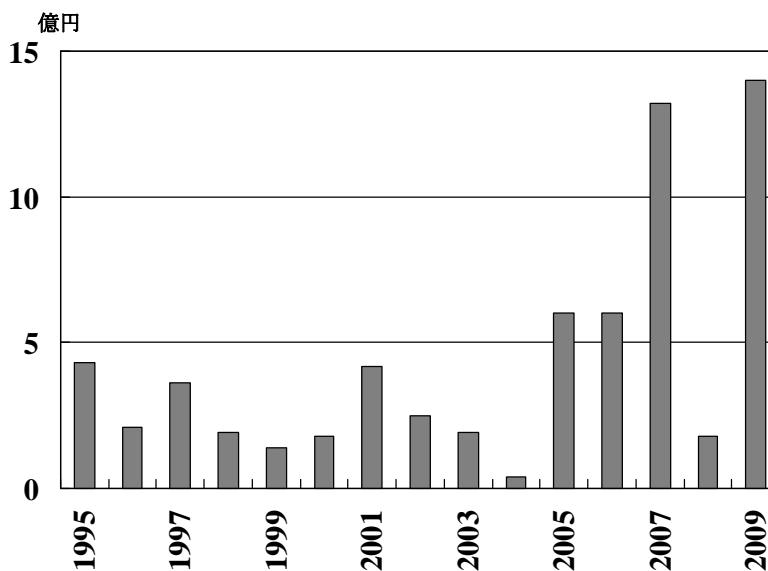


図3.20 外面腐食検査の事例

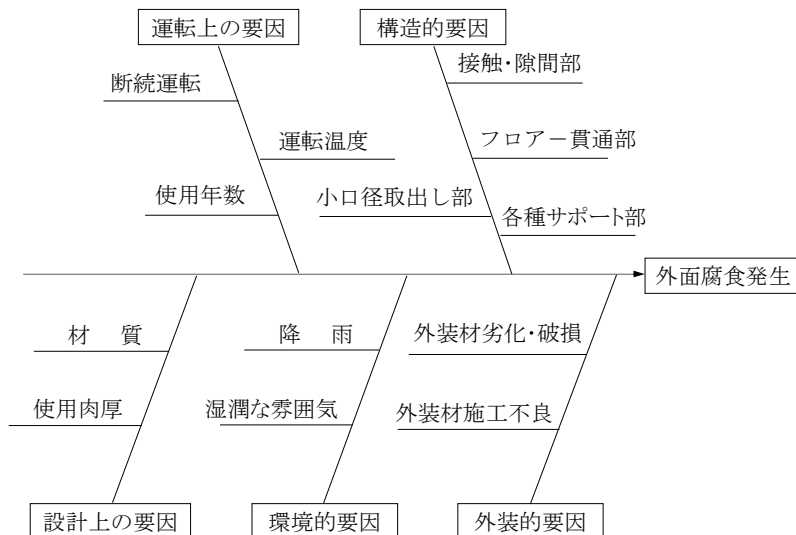


図3.21 外面腐食の発生因子の特性要因図

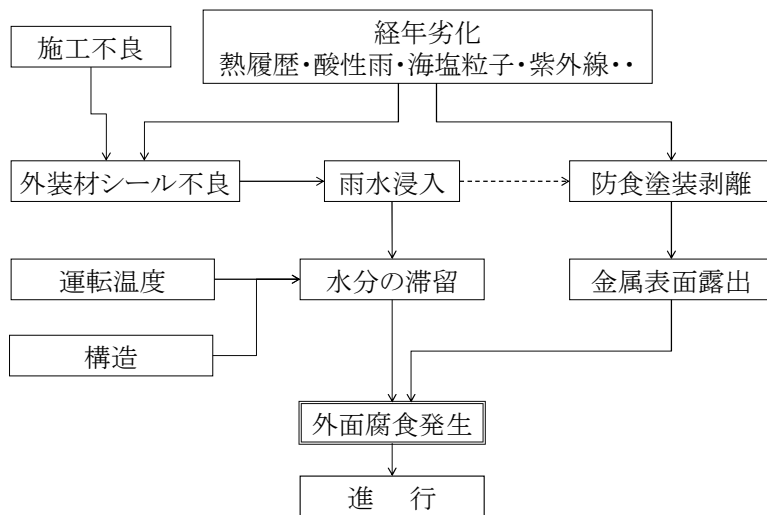
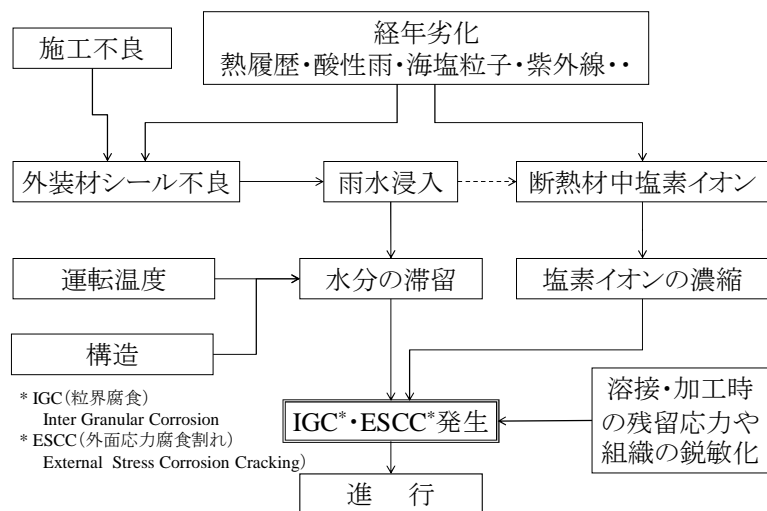


図3.22 炭素鋼の外面腐食の発生メカニズム



\* IGC (粒界腐食)  
Inter Granular Corrosion  
\* ESCC (外面応力腐食割れ)  
External Stress Corrosion Cracking

図3.23 ステンレス鋼の外面腐食の発生メカニズム

#### 4) 外面腐食の発生確率と運転・設備管理データの関係<sup>[2],[39],[111]</sup>

外面腐食の発生メカニズムにおける要因で、どのようなものが発生に影響があるかを調査した。運転管理や設備管理のデータを調査した結果、設備の使用年数により外面腐食発生の確率に違いが出た。また運転温度によっても発生の確率に違いが出た。1991年までの設備の検査結果の調査を基に、炭素鋼製の設備の使用年数で、外面腐食発生の確率を整理したものを図 3.24 に示す<sup>[1],[2]</sup>。これは、長期の使用による外装板の損傷と雨水浸入による塗装の劣化による結果であると考えられる。図 3.25 にステンレス鋼製の設備を調査した結果を示す。炭素鋼製の設備では 16 年を超えると急激に外面腐食の発生確率が増しており、ステンレス鋼の設備では炭素鋼製の設備に比し、短期間で発生確率が高まり経年とともに増加している。図 3.26 は炭素鋼製の設備の運転温度と外面腐食の発生の関係を示したものである<sup>[1],[2]</sup>。縦の軸に示したのは、断熱下の外面腐食検査を実施した蒸留塔である。蒸留塔は、塔頂から下部まで温度分布が付いており、外面腐食が発生した温度範囲をプロットすると、発生が著しいのは 20～85℃の範囲であった。このようにして、それまでの設備管理で蓄積したデータを整理し、外面腐食の発生の確率を算出することにより各要因の重み付けをした。

点検基数	腐食発生基数				合計
	10年以下	11～15年	16～20年	21年以上	
656	15	28	154	45	242

～1991年工事記録の調査結果

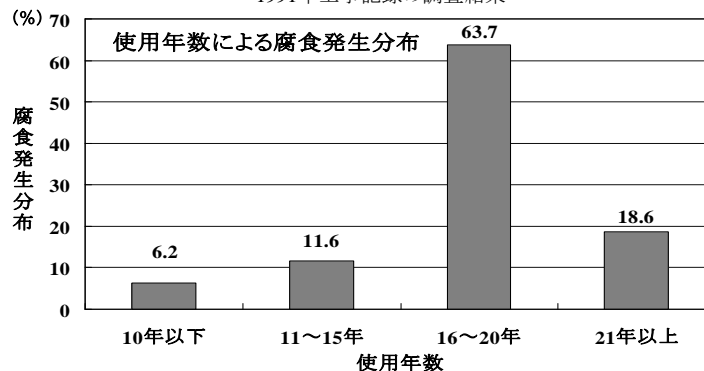


図3.24 炭素鋼製の設備の使用年数と外面腐食発生の確率

点検基数	IGC・ESCC 発生基数			合計
	7年以下	8～10年	11～15年	
254	5	13	31	68

～1991年工事記録の調査結果

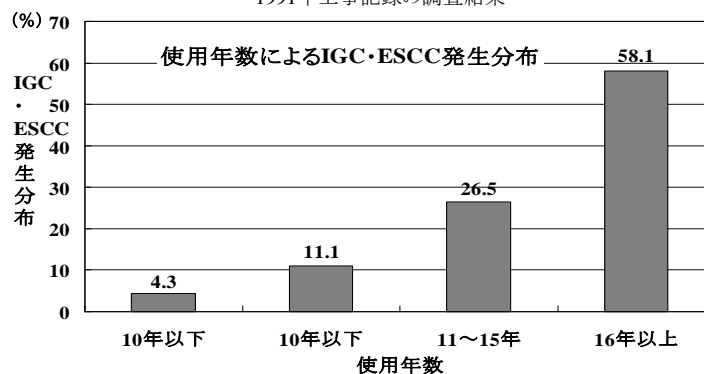


図3.25 ステンレス鋼製設備の使用年数と外面腐食発生の確率



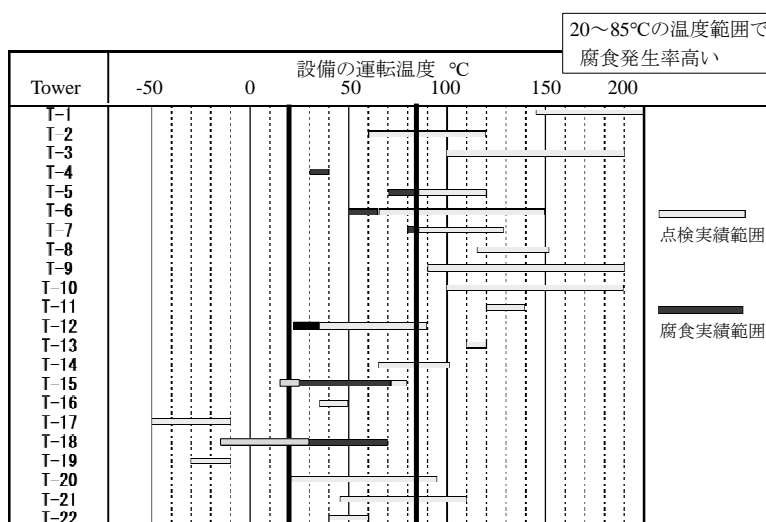


図3.26 炭素鋼の外表面腐食の検出温度範囲

### 5) 外表面腐食の発生確率の評価項目<sup>[39]</sup>

外表面腐食の評価管理システムの構築に際し、評価の項目には使用条件劣化度、外観劣化度、設備の重要度からなる表 3.7 に示す項目を設定し加点方式を採用した。使用条件劣化度は、設備の使用条件により評価する項目で、外表面腐食の発生確率で重み付けした使用年数、運転温度、連続運転か休止やバッチの不連続運転かを評価する運転状況、海岸近傍か屋内、屋外を評価する外部環境、断熱材の有無、水の滞留の有無を評価する外部構造、発生時の損傷程度に影響する使用板厚や内部の腐食率を評価する内部腐食の項目がある。外観劣化度は、設備の外観状態により評価する項目で、水の浸入の可能性から外表面腐食の進行状況を予測し、ある程度検査範囲を決定することができる。そもそも水が浸入する状態を放置して良いはずがなく、また浸水により劣化した断熱材を更新する戦略面から外観劣化度の評価点を大きくしている。断熱下の外表面腐食の検査対象を決定するためには、故障発生による影響度も評価してやる必要がある。まずは優先度設定の評価項目の重み付けを点数化して、加点方式により優先度を設定する評価システムとした。

表3.7 外表面腐食検査の優先度設定の評価項目

使用条件劣化度	外観劣化度	重要度分類
・使用年数 ~5	・外装やシール、 水抜部等の状態 から雨水浸入	・内容物 ~3
・運転温度 ~3		・圧力 ~1
・運転状況 ~2		・生産影響 ~4
・使用板厚 ~3		
・外部環境 ~3	予想できる 7	
・断熱有無 ~2	可能性あり 3	
・内部腐食 ~2	良好 0	
・外部構造 ~3		

各項目評価点数の総和で優先付けを実施し計画的に検査

### 6) 外面腐食の管理システムの業務フローと検証

管理システムの業務フローとして図 3.27 に外面腐食検査の対象選定のフローを示す[1],[2],[39],[104],[111]。点数化した評価の合計点数により、検査対象を選定し検査計画を立案する。検査対象の選定が正しかったかどうかを検証しなければ、点数の評価システムとして適正か否か判断できない。そのため検査実施後に解析評価を行い、損傷大で補修に至った外面腐食やその発生を認めた的中率により点数の見直しを実施する。機器と配管の検査結果により点数の評価システムを検証した例を図 3.28 と図 3.29 に示す[39]。この検証によりどの点数範囲まで検査を実施すべきかを決定でき、機器では検査の対象とする評価点の閾値を 19 点以上と定めた。検証結果からは安全側での設定であり概ね適切と言える。配管では点数の増加とともに的中率が上昇しており、点数との関連性があると評価できる。点数が高いほど外面腐食の発生確率が高いと判断したが、少し外れているものがあり評価項目の点数を見直しフィードバックすることで精度向上を図っている。このように外面腐食検査の対象選定のフローの中で検証を行い管理システムとして向上する仕組みとした。

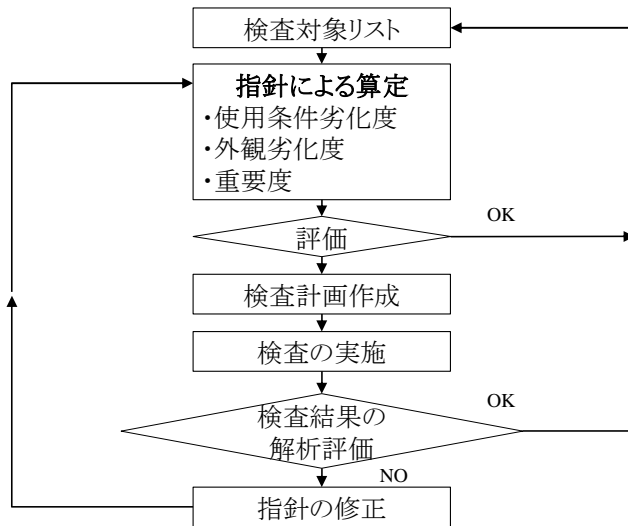


図3.27 外面腐食検査の対象選定のフロー

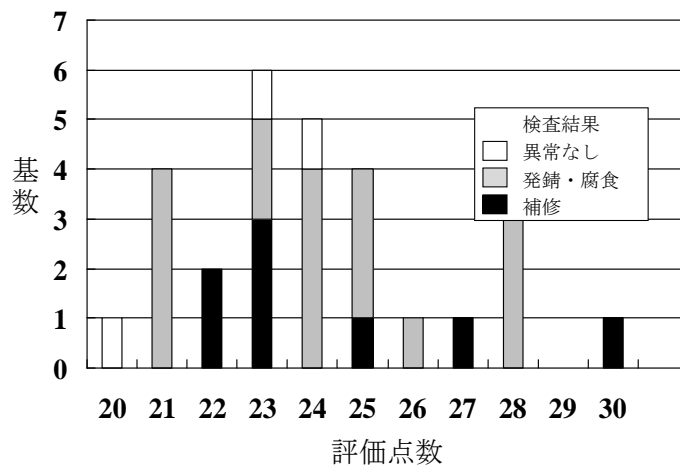


図3.28 評価システムの検証(機器)

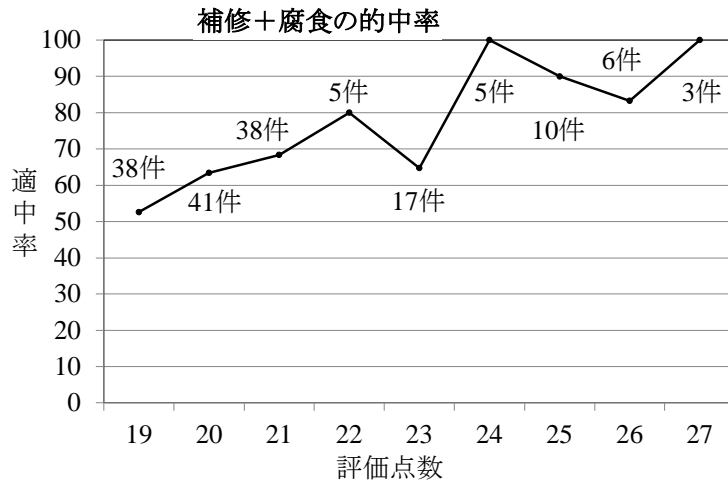


図3.29 評価システムの検証(配管)

### 7) 外面腐食の管理システムの運用効果

外面腐食への取り組みを始めた 1992 年からの外面腐食により機器や配管の補修や更新に至った発生件数の事例事業所における推移を図 3.30 に示す。外面腐食検査の優先度設定の評価システムを適用して以降、減少傾向を示しており機器では発生しなくなったが、配管では広範囲で複雑な形状に加えて肉厚に余裕が少ないことなどもあり、撲滅に至っていない。機器の安全担保の向上も含めて、より精度の高い寿命予測の観点からの取り組みが必要と考えられた。

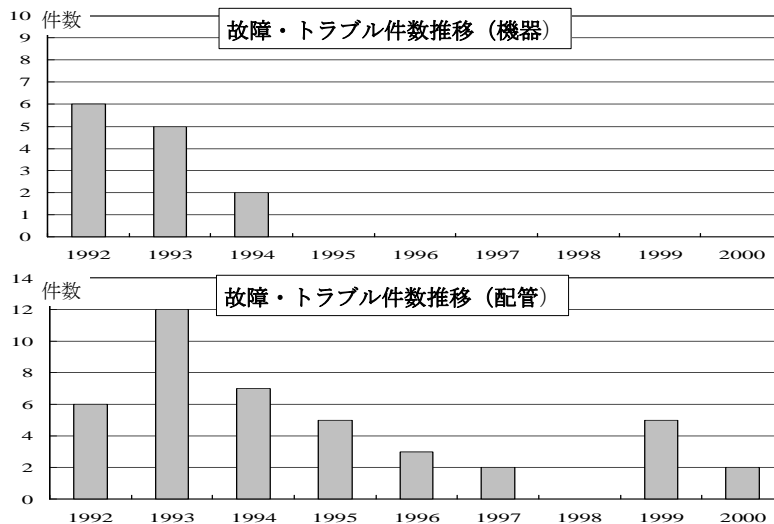


図3.30 故障・トラブルの件数推移

### 3.4.4 寿命予測を基にした外面腐食検査の優先度設定

経年劣化は、寿命予測を基に対応するのが基本である。そこで加点方式の的中率から腐

食速度 (mm/y) への移行を進めた。事例企業の各事業所の 2005～2007 年の外面腐食検査の 182 基の実績データを収集し統計的解析手法を用いて、外面腐食速度の推定式を設定した<sup>[154]</sup>。腐食深さと使用年数から仮の腐食速度を算出し、これを目的変数とし、各腐食要因の項目を説明変数として多変量解析\*を行った<sup>[155]-[157]</sup>。

1) 外面腐食検査の優先度評価の管理システムの検証

評価項目の中には、重要度や使用板厚、内部腐食などの外面腐食発生要因では無い項目が含まれており、これらを除外した各腐食要因の項目を評価して、その点数の和を劣化度とし大きいと外面腐食の進行も大きいと予想する。したがって腐食深さと劣化度の点数の和をプロットして図 3.31 を作成し、劣化度数と腐食速度との相関を単回帰分析\*で確認したが相関は良くなかった。図 3.32 に腐食速度と劣化度数の回帰分析を示すが、より相関は低い結果となった。各事業所の場所的な環境条件による腐食速度の違いが大きく影響していると考えられるが、政策的に外観劣化度の点数を高く設定したことなども理由として上げられる。一般的に相関の良否を判定する決定係数\*の $R^2$ の値が  $0.8 <$  の場合に相関が非常に良いとし、 $0.5 <$  の場合はやや良い、 $0.5 >$  では良くないとする。

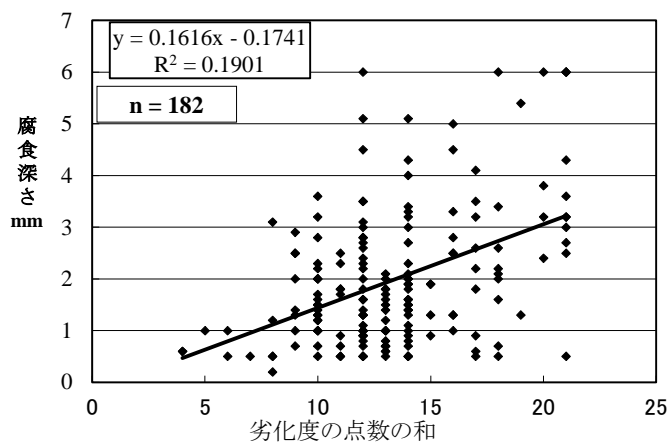


図3.31 腐食深さの従来評価の検証結果

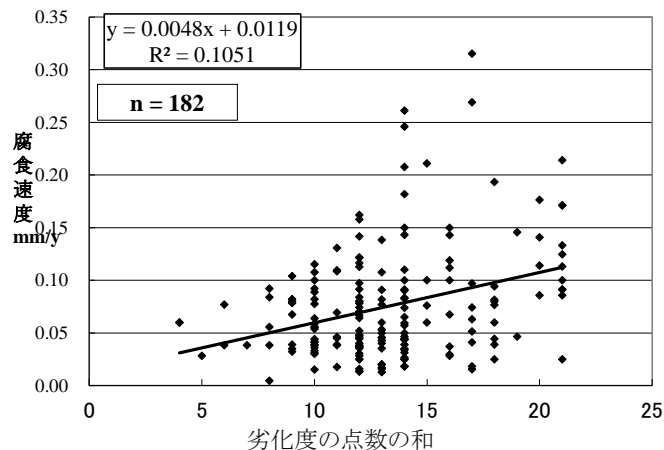


図3.32 腐食速度の従来評価の検証結果

## 2) 外面腐食速度への考慮事項<sup>[158]</sup>

腐食速度は腐食深さと使用年数の関係で整理されるが、外面腐食の発生メカニズムから水分の浸入があっても塗膜が健全な期間は発錆が起こらないので、塗膜の健全期間を除いた使用年数での考慮が必要である。いつから水分の浸入が始まったかという課題はあるが、データは無く、また採取も困難である。塗膜については一般的に4~6年の寿命と言われており<sup>[115]</sup>、これを前提に評価方法を検討する。また外面腐食は大気腐食でもあり設置場所の環境に大きく影響を受ける。大気腐食では気温と湿度、降水量、ぬれ時間、硫黄酸化物や窒素酸化物などの汚染物質、飛来する海塩粒子や塵埃などが腐食に影響する環境因子となる<sup>[159]-[161]</sup>。ここで海風の影響が大きいなど設備の設置されている環境条件が異なり腐食速度が大きい事業所などは母集団が異なるので別の解析データ群として取り扱う。算出された評価点は違って来るが外面腐食の劣化メカニズムを基にしている評価項目と算出方法は同じである。また検査では腐食深さを測定し、最大値を評価するので Gumbel 分布に従う<sup>[162]</sup>と考え、対数正規分布の累積確率により統計的に意味のある環境因子を劣化度に寄与する項目として再確認した。加点方式による劣化度の合計点数と腐食速度との重回帰分析\*を行い、相関の良いように項目の点数を調整し、塗膜の寿命も API581<sup>[64],[67]</sup>の一回塗り5年を中心に振って腐食速度を算出し、劣化度の合計点数と回帰分析した結果、塗膜の寿命を5年とした場合に最大の決定係数 $R^2=0.451$ を得た。

## 3) 外面腐食速度の予測式と評価点数の算出方式

劣化度の点数の算出方式を加点方式から API581 や他報文<sup>[150]</sup>のように各項目の積による方式を採用して相関を確認することとした。すなわち外面腐食に影響する劣化度の各項目の評価点の積を腐食劣化度 $K$ として、外面腐食速度 $V[\text{mm/y}]$ を基準腐食速度 $V_0[\text{mm/y}]$ と腐食劣化度 $K$ の積で表現する。ここで5項目の腐食劣化度の各項目の $A$ は使用温度、 $B$ は運転状況、 $C$ は外部環境、 $D$ は外部構造、 $E$ は外観劣化度の表3.7に示した評価点である。

$$V = V_0 \times K = V_0 \times A \times B \times C \times D \times E \quad (3.1)$$

式(1)の各辺に  $\ln$  を取れば、以下の式(3.2)が得られる。

$$\begin{aligned} \ln V &= \ln(V_0 \times K) = \ln(V_0 \times A \times B \times C \times D \times E) \\ &= \ln V_0 + \ln A + \ln B + \ln C + \ln D + \ln E \end{aligned} \quad (3.2)$$

式(3.2)を基に多変量解析を行い、腐食速度と各項目の相関を整理した。解析データの目的変数の外面腐食速度は、実測の腐食深さ $H[\text{mm}]$ を使用年数 $T_0[\text{y}]$ で除した仮の数値として  $\ln$  に取り直した。ただし $T_0$ は塗膜の寿命年数 $T_1[\text{y}]$ 腐食が発生しないと考え、実際の使用年数 $T[\text{y}]$ からその分差し引いた年数とする。

$$\ln V = \ln(H \div T_0) = \ln(H \div (T - T_1)) \quad (3.3)$$

また説明変数の腐食劣化度 $K$ の各項目の評価点 $A \sim E$ は、ここでは各点数に0.1を乗じ1を加えて加工して  $\ln$  に取り直した。

$$\ln K = \ln(0.1 \times A + 1) + \ln(0.1 \times B + 1) + \ln(0.1 \times C + 1) + \ln(0.1 \times D + 1) + \ln(0.1 \times E + 1) \quad (3.4)$$

多変量解析により求められた各項目の回帰係数を $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$ 、 $F_D$ 、 $F_E$ として式(3.4)の該当する項に乗じて各項目の評価点を算出する。

$$\ln K = F_A \times \ln(0.1 \times A + 1) + F_B \times \ln(0.1 \times B + 1) + F_C \times \ln(0.1 \times C + 1) + F_D \times \ln(0.1 \times$$

$$D + 1) + F_E \times \ln(0.1 \times E + 1) \quad (3.5)$$

算出された評価点の底に e を取って各項目の点数を設定した。

$$e^{\ln K} = K = e^{F_A \times \ln(0.1 \times A + 1)} \times e^{F_B \times \ln(0.1 \times B + 1)} \times e^{F_C \times \ln(0.1 \times C + 1)} \times e^{F_D \times \ln(0.1 \times D + 1)} \times e^{F_E \times \ln(0.1 \times E + 1)} \quad (3.6)$$

それらの積で算出した腐食劣化度  $K$  の点数と塗膜寿命  $T_1$  を振った腐食速度  $V$  との相関を 1) 外面腐食検査の優先度評価の管理システムの検証 の項と同様に確認すると、塗膜の寿命を 5 年とした場合では、 $R^2=0.536$  を得て、6 年で  $R^2=0.547$ 、7 年で  $R^2=0.527$  となり低下したので塗膜の寿命を 6 年と設定した。同じ塗膜の寿命の場合には、先に述べた加点方式による決定係数より積による決定係数の方が高い数値を示しており、積方式で腐食劣化度  $K$  を求めることとした。いくつかの事例事業所で得られた外面腐食速度  $V$  の式は以下の通りで、0.14～0.582 mm/y の値を取る。

$$V = 0.04 \times K + 0.1 \quad (K = 1.0 \sim 12.042) \quad (3.7)$$

そこで寿命  $L$  [y] と残存寿命  $L_R$  [y] を表す式は内部の腐食速度  $V_I$  [mm/y]、余裕肉厚  $N$  [mm] を考慮すれば以下となる。

$$L = N \div (V + V_I) + T_1 \quad (3.8)$$

$$L_R = L - T \quad (3.9)$$

同様に配管では、495 点の実績データを解析し以下の式となった。

$$V = 0.006 \times K + 0.09 \quad (K = 1.0 \sim 41.08) \quad (3.10)$$

外面腐食速度  $V$  の値は、0.096～0.34 mm/y となる。文献<sup>[130]</sup>の調査結果では、塗装による使用年数の修正を行う場合を 5 年としており、外面腐食速度は以下が示されている。

Tower,  $n = 1834$ , 累積 95% 値, 0.22 mm/y, Max 0.71 mm/y

配管,  $n = 1890$ , 累積 95% 値, 0.18 mm/y, Max 0.55 mm/y

他文献<sup>[158],[163],[164]</sup>で示される外面腐食速度のデータと比較しても、概ね妥当性があると評価できる。このように対応すれば、劣化の評価が寿命予測を基にした残存寿命で評価でき、各種規格化<sup>[64],[116]</sup>もされている発現した際の影響度と寿命予測による残存寿命の信頼度のマトリクスによるリスクランキングでリスク評価し外面腐食検査の優先度設定を行う評価システムに組み込める<sup>[111]</sup>。ただ外面腐食速度の予測式は、採取データを基にしているものであり、場所の環境や設備管理の背景による差異を含め、今後も引き続き検査結果のデータを基に適宜検証を行い精度の向上に努める必要がある。

### 3.4.5 外面腐食の管理の体系

外面腐食の劣化管理のうち配管については、配管の劣化管理で含めて論じているので、機器を中心に述べた。機器に比較して配管は広範囲で構造・形状も複雑で、多数の部品を持っており管理すべき部位が膨大でなかなか管理がしづらい。一方、腐食による 1ヶ所の破孔でも重大な事故に繋がることから設備管理の対応には網羅性が要求される。この項で述べたマネジメントは、SDM 時に対応する計画的なメンテナンス、すなわち計画保全についての説明であったが、40 年を超える経年化した設備を稼働させている多くのプラントを念頭におけば、計画保全のみでの網羅性の確保がいかに困難であるか想像できる。安全安定操業の確保には日常管理の強化が欠かせない。網羅性を確保するための体系的な取

り組みを図 3.33 に示し外面腐食の管理の体系の説明を加える。

- (1) 計画検査とそれを補完する日常管理の体制で臨み、計画検査では劣化の状態や青酸やホスゲンなど万一の際の影響度が非常に高く、個別の管理が必要と思われる配管を From-To で管理する。安全を担保するために原則として断熱材を撤去して全面的検査を行う。
- (2) From-To で管理する以外の配管は、配管部品を含めて最高 15 分割したエリア管理で対応する。1 年に 1 エリアの計画検査を行い、最高 15 年をかけて全域を検査する。
- (3) エリアの計画検査では、3 次にわたるスクリーニングを行い、部分検査の適用が可能な配管を精査、さらには NDI 技術の適用を模索する。部分検査の適用の場合でも、検査結果で問題があれば、拡大検査、または全面検査に移行する。
- (4) 1 年に 1 エリアの計画検査の担保として日常点検でパトロールをしている運転管理部門が 1 年をかけて全域を隈なく点検する。不良部は運転管理部門と設備管理部門の協議で即時補修を行うか、計画的に対応するか、傾向監視の対象とするかを決定し発見者にフィードバックする。点検の精度向上を図り信頼性を確保するために専門家による PIP の採用や設備管理部門との合同パトロール、教育などの実施も計画する。
- (5) すべての点検・検査結果は、個別の管理やエリア管理の選択、部分検査の適用や全面検査の判断、更新計画、検査箇所や検査時期の見直し、次回の検査エリアや日常管理への展開、配管や塗装・断熱の仕様の見直しなど、次回計画への反映を図る。

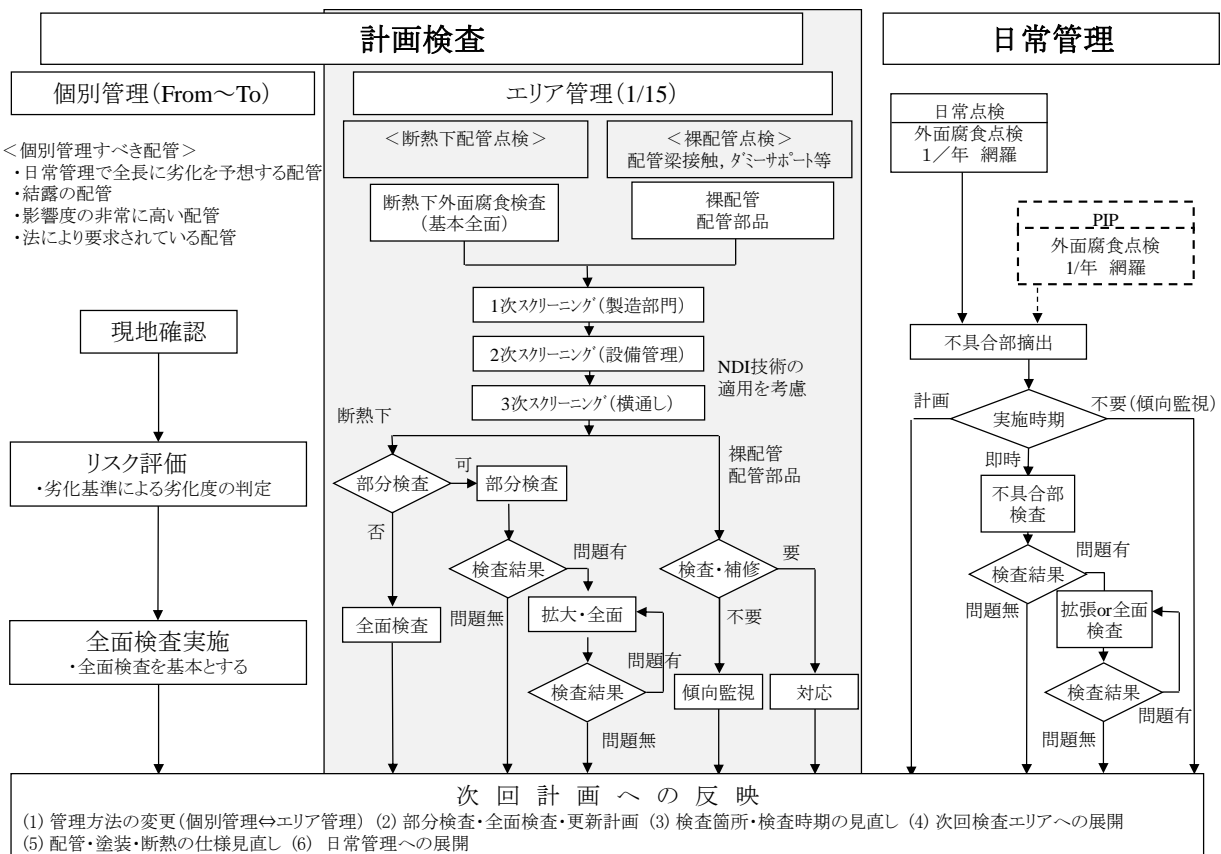


図3.33 外面腐食の管理の体系

### 3.4.6 外面腐食による劣化の管理の結言

外面腐食の劣化管理は、経年劣化の案件の中でも最もコストと労力を要している課題である。信頼性を確保しつつコストとの最適なバランスを取り、リスク低減に効果的な検査計画の立案を可能とする優先度を評価するシステムを策定し、管理下とするまで適用した事例を示した。根拠に基づくリスク許容と費用の確保による計画の策定、検査の実行、検査結果による根拠の検証から精度向上のPDCAを回すことが必須事項である。外面腐食の劣化管理については、すでに実用に耐える具体的なガイドライン<sup>[116],[150]</sup>が発行されている。事例企業もそれらの策定に参画しており、相当部分が採用されている。それらのガイドラインでも始めの段階においては、管理の対象の設定から検査の優先順位付けを要求している。本論文では、より設備管理のマネージメントに主眼をおいて、優先度の設定による外面腐食の劣化管理の方法を述べた。この標準化した技術を通じて以下の事項が得られた。

- (1) 外面腐食に至る特性要因図やメカニズムから主要因を抽出し、運転履歴や設備管理のデータで整理して、重要度も加味した加点方式の点数項目を設定する手順が示せた。運転温度 20~85℃が炭素鋼の腐食発生の領域であり、使用年数では、炭素鋼、ステンレス鋼とも 16 年を過ぎると急激に腐食の発生率が高まるなどの特徴を点数に反映し、合計点数により優先度の設定を行う。
- (2) 外面腐食検査の優先度評価の管理システムによるリスクを基にした中長期的な計画が可能となり、予算の確保と実行の管理で運用した結果、故障・トラブルの発生は低減し効果が確認できた。
- (3) 合計点数と腐食発生の的中率でリスク評価の検証を行い、外面腐食検査の優先度評価の管理システムの妥当性が確認できた。
- (4) さらにリスクを低減するための施策として寿命予測を基にした外面腐食検査の優先度評価の管理システムを指向し、点数項目のうち劣化に関与しない項目を除いた劣化度の合計点数と腐食深さや腐食速度との回帰分析の結果、決定係数 0.1~0.2 で相関は不調であった。
- (5) 安全担保の向上を目指して炭素鋼の検査データを基に多変量解析などの統計解析を利用して腐食速度の予測式を策定して寿命予測する方法を示した。残存寿命により信頼度を評価し、影響度とのリスク評価で優先度を設定する方法に移行した。
- (6) 評価項目の点数の加点方式より積方式の方が、同じ塗膜寿命の場合には外面腐食速度の式の当て嵌めが良かった。腐食測定データが Gumbel 分布に従う<sup>[162]</sup>ことから対数を取った方がより近似することによると推測できる。本論文では外面腐食速度の式の決定係数 $R^2$ から塗装の寿命を 6 年に設定することが良いと推測された。ただ塗装仕様を変更すれば再検討が必要である。
- (7) 予測式から配管に比べ機器の外面腐食速度が大きい傾向のようである。ただ機器に比較し配管は総じて薄肉であることから寿命への配慮は必要である。
- (8) 腐食速度の予測式は、採取データの環境など由来に変化が生ずれば検証し、必要なら修正を行っていかねばならない。場所の環境による影響が大きく事業所によっては自らのデータのみで独自の予測式を策定する必要があった。ただ本論文で示した要領に従えば策定は容易である。

本稿では炭素鋼と低合金鋼の CUI を対象としているが、大気とのシール性能を要求する



保冷材下の CUI は対象外である。またステンレス鋼の外面腐食も腐食形態が異なる<sup>[153]</sup>ので対象外としている。評価項目は管理のし易さからは極力少ない方が良いが、本稿での 5 つの評価項目ではすべての CUI を表すことができなかつた。場所や部位、材質、保冷など含めた予測式の策定は今後の課題である。多変量解析などの統計解析を利用して腐食速度の予測式を策定し、寿命予測が可能となるが、設置された環境の違いが影響するので項目の選別が肝になる。

図 3.21 の詳細版として運転や設備管理のデータ収集の際の調査項目として考慮すべき事項を特性要因図に整理した図 3.34 を示す。

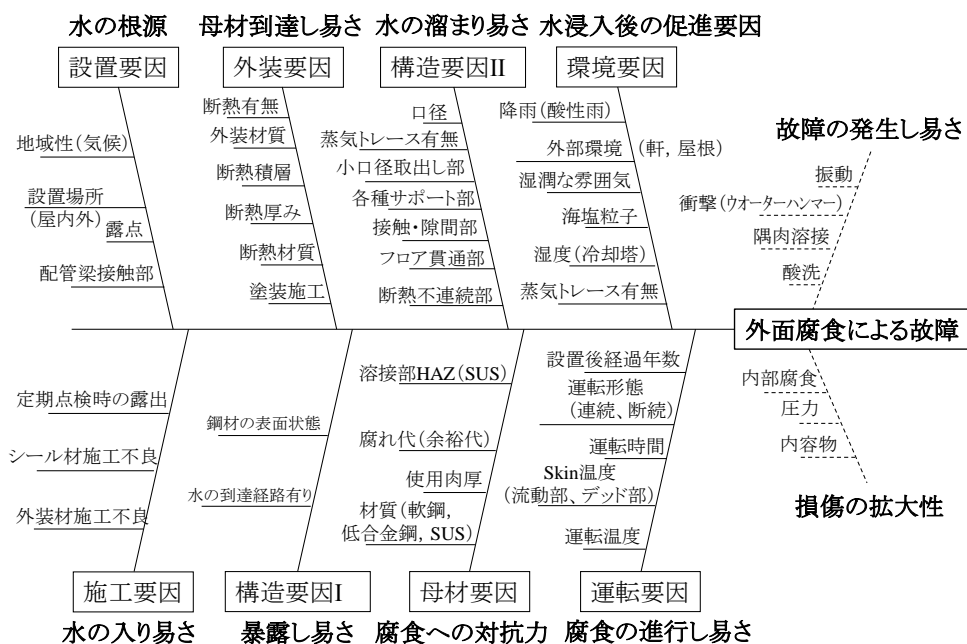


図3.34 外面腐食による故障の発生因子の特性要因図

### 3.5 ステンレス製機器の鋭敏化による劣化の管理<sup>[153]</sup>

石油化学等のプラントでは、耐食性ととも製品品質確保のために 18Cr-8Ni オーステナイトステンレス製機器を使用しているが、溶接線の熱影響部で、炭化物の析出に伴う鋭敏化という耐食性が著しく劣る現象が知られており<sup>[165]</sup>、溶接部近傍で粒界腐食や SCC (Stress Corrosion Cracking) による劣化損傷を起す場合が少なくない<sup>[152]</sup>。もともと耐食性で採用されている 18-8 ステンレス鋼の劣化した鋭敏化域を回復させる案に、損傷箇所を共材によって溶接ライニングで被覆する方法があるが、更新に比し費用では優れている一方、同様の損傷が発生するリスクが存在する。本論文では、長期連続運転の実現のために信頼性を向上し、設備管理コストの低減も得るための施策として適用した事例を報告する。

リスクの要因となる鋭敏化を抑える溶接条件の設定手順と評価法として採用した腐食試験法について述べ、評価結果に基づく鋭敏化の抑制に効果のある水冷法の適用、Tig 溶接の採用による適切な溶接ライニングによる施工方法と、実機での有効性の検証結果を報告する。

#### 3.5.1 鋭敏化の発生機構<sup>[165],[166]</sup>

SUS304、SUS304L 製の塔・槽・熱交の外表面腐食調査の結果、IGC (粒界腐食 : Inter Granular Corrosion) や IGSCC (粒界型応力腐食割れ : Inter Granular Stress Corrosion Cracking) が観察できた部位を図 3.35 に示す。すべてが機器の溶接線の HAZ (Heat Affected Zone) 部にあり、内面にも同様の損傷が発生する。本来、耐食性に優れているはずの 18Cr-8Ni 鋼製の機器の HAZ 部に、このような損傷が発生するのは、溶接時の熱履歴により、クロム欠乏域が生成する現象である鋭敏化のためと考えられる。

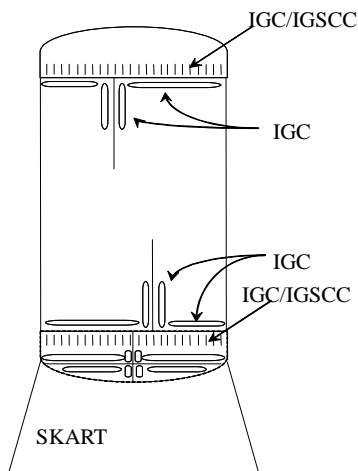


図3.35 塔・槽・熱交の損傷部位

鋭敏化の発生の熱履歴と鋭敏化域のイメージを図 3.36 に示す。熱処理、溶接時等に 500 ~ 800°C の熱履歴を受けると、不安定な結晶粒界で、固容限界を越えた炭素が Cr と結合してクロム炭化物が析出する。その時、母材からの Cr の拡散が遅れ、クロム炭化物の析出部

の外側に、鋭敏化域と呼ばれるクロム欠乏域が生成する。鋭敏化域は、クロムが欠乏しているために耐食性を失っている。クロム炭化物の析出とクロム欠乏域のイメージを図 3.37 に示す。鋼中の炭素量、加熱時間、溶接入熱、溶接パス数の増加は、鋭敏化の程度を増加させる。さらに、塔・槽・熱交の鏡部では、製作時の絞り加工による転位が発生し粒子がすべる。この部位では加工応力が残留し硬度も大きくなり、加工による硬化とともに粒界に炭化物が析出し、誘起マルテンサイトを呈して耐食性を損なっているものと考えられる [167]。

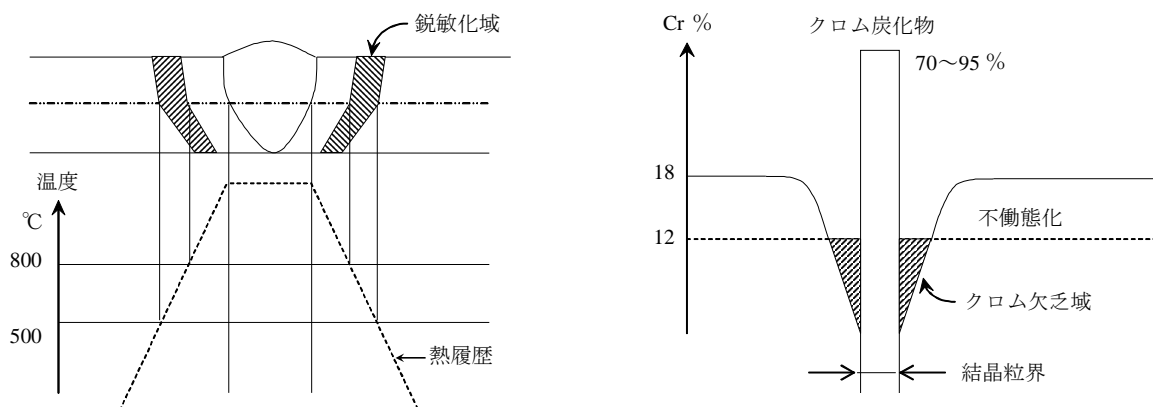


図3.36 鋭敏化発生の熱履歴と鋭敏化域のイメージ 図3.37 クロム炭化物の析出とクロム欠乏域のイメージ

### 3.5.2 鋭敏化の許容限界

ステンレス鋼の鋭敏化の評価として適用でき得る JIS に定められている標準的な腐食試験方法を表 3.8 に示す。JIS G0571 は、10%しゅう酸エッチング試験方法で、選別試験として採用され、クロム炭化物の析出状態を観察し、みぞ状組織は完全にみぞで囲まれた結晶粒が 1 つ以上ある組織と定義され、他の熱酸試験を必要とするが、段状、混合組織は免除される。クロム炭化物析出が不連続であるので粒界腐食は進行しないとされるものであるが、実際には粒界腐食している事例がある。粒界上のクロム拡散がマトリクス中に比して速いため、不連続であっても粒界に沿って連続的にクロム欠乏層が形成される場合があると

表3.8 ステンレス鋼のJISによる腐食試験方法

JIS G0571	ステンレス鋼の しゅう酸エッチング試験方法
JIS G0572	ステンレス鋼の 硫酸・硫酸第2鉄腐食試験方法
JIS G0573	ステンレス鋼の 65%硝酸腐食試験方法
JIS G0575	ステンレス鋼の 硫酸・硫酸銅腐食試験方法
JIS G0580	ステンレス鋼の 電気化学的再活性化率の測定方法

の説<sup>[168]</sup>である。

本論文では、混合組織の JIS G0571 による結果の程度をクロム炭化物の析出状態でさらに3分類する。析出長さ／粒界長さを判断基準とし、Lは析出が見られる程度で1/4未満、Mは1/2未満、Hは1/2以上として以降を進める。図3.38にJIS G0571に示されている組織写真と溶接線のHAZ部で採取した混合組織Mの実例を示す。

これらの測定法による SUS304 における比較試験の結果が、表3.9に報告<sup>[169]</sup>されている。ここで JIS G0580 の結果は EPR 法 (Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Method) <sup>[170]-[171]</sup>による電気化学的再活性化率 (鋭敏化度) の測定器による。粒界腐食の発生しなかった程度を鋭敏化の許容とするなら JIS G0580 では5%近辺、JIS G0571 では健全なオーステナイト組織を示す段状組織から混合組織へ移行を始める組織状態が許容と言える。また、予歪を受けていない SUS304 の鋭敏化と IGSCC 感受性の検討で、鋭敏化度が約5%以上の材料は、海塩粒子を含む大気中で著しく割れ感受性の高いことが報告<sup>[172]-[174]</sup>されている。

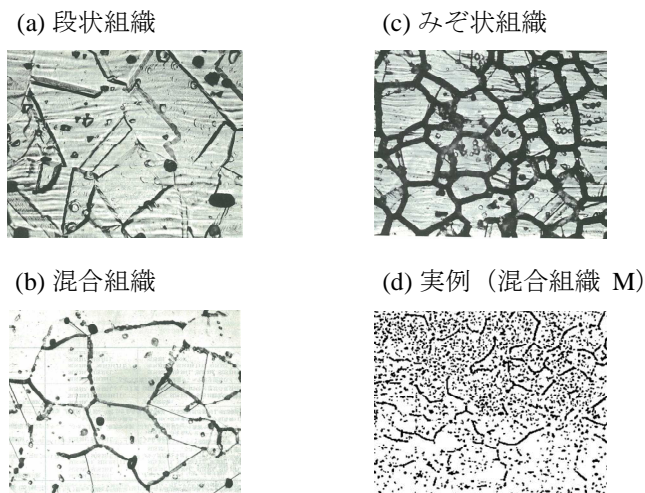


図3.38 JIS G0571組織写真と実例

表3.9 SUS304における各種試験方法の比較

G0572	○ NO-IGC		× IGC	
G0573	○ NO-IGC		× IGC	
G0575	○ NO-IGC		× IGC	
G0571	Step	Dual		Ditch
G0580 (EPR)	1.0%	5.0%	10%	50%

ステンレス製の塔・槽機器を JIS G0571、JIS G0580 で鋭敏化調査した結果を表 3.10 に示す。表記は、鏡と胴の溶接線の胴側 HAZ 部は□、鏡側 HAZ 部は○、鏡のスカートとの溶接線 HAZ 部は△、IGC が観察されれば各々●■▲、◎は IGSCC を示す。上添字の数値は JIS G0580 (EPR 法) による測定値、下添字は JIS G0571 による結果の程度を表す。EPR 法による測定は、鋭敏化域が狭い場合や IGC・IGSCC を発現させている場合には、その影響を受け正しい鋭敏化度測定ができていないとも考えられるので注意を要する。組織的にみぞ状組織では、そのほとんどに IGC・IGSCC を発生させており、調査結果の例から鋭敏化の許容限界は、混合組織からみぞ状組織に移行する組織状態にあるといえ、表 3.9 と良く一致している。

表3.10 ステンレス製機器の鋭敏化調査結果

結晶組織	SUS304	SUS304L
STEP 階段状組織	□ □ □ ○ ○ ○ △ △ △	□ □ □ ○ ○ ○ ○ <sup>0</sup> ○ <sup>0.1</sup> ○ <sup>0.2</sup> ○ <sup>1.1</sup> △ △ △ <sup>0.1</sup> △ <sup>0.1</sup> △ <sup>0.2</sup>
DUAL 混合組織	□ <sub>M</sub> <sup>0.1</sup> □ <sub>L</sub> <sup>0.2</sup> □ <sub>L</sub> <sup>3.7</sup> ● <sub>H</sub> ○ <sub>H</sub> <sup>1.6</sup> ▲ <sub>H</sub> <sup>0.2</sup>	○ <sub>L</sub>
DITCH みぞ状組織	■ 2.4 □ 18.5 ■ 50 ● 0.8 ● 2 ● 2.1 ● 3.5 ● 8.6 ○ 13.3 ◎ 16.5 ● 43 ▲ 4.6 ▲ 15 ▲ 21	■

### 3.5.3 鋭敏化域の補修

既設の塔・槽・熱交の鋭敏化域のみを溶接ライニングで覆う補修方法について報告する。既設機器の鋭敏化域に対する補修方法について研究された文献では、原子力発電所における冷却水管の SCC 防止を目的とした水冷再溶接法<sup>[175]</sup>が報告されており、この適用効果についても検証した。内面を水冷却し外面溶接除去後に再溶接することで、内面に圧縮応力を与え SCC 防止を図るものであるが、本論文ではその急冷効果による鋭敏化防止に着眼した。

#### 1) 評価の方法

溶接ライニングによる溶接補修の要領を以下の手順で実験評価を行い確定する。実験評価の方法として、JIS G0571 の腐食試験法を採用するが、JIS G0580 も参考に併用する。溶接による鋭敏化を許容限界と推定される混合組織の M 以下に抑え、IGC・IGSCC の発生を防止する条件を探索する。

- (1) 溶接施工法確認試験を行い鋭敏化させない溶接条件を選定する。
- (2) 鋭敏化域で IGC が発生している設備を使用し、実機における溶接施工法確認試験を行う。
- (3) 鋭敏化している実機で、実際に補修を行い検証する。

## 2) 溶接施工法確認試験

鋭敏化を少なくするためには溶接入熱を低くすることが重要で、ライニング材の厚み、溶接棒の径、溶接電流値、溶接姿勢、水冷式溶接等、溶接条件を設定して確認試験を行い、各々の鋭敏化度を評価する。ライニング材は母材 SUS304 に比較し、鋭敏化しにくい低炭素量の SUS304L とし、供試材には表 3.11 に示す化学成分 (mass%) の JIS G4304 の鋼板を使用する。溶接棒は低炭素含有量の JIS Z3221 の D308L、JIS Z3321 の Y308L を使用する。

表3.11 供試材の化学成分例 (mass%)

材質	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	8～ 10.5	18～ 20
SUS304L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	9～ 13.0	18～ 20

## 3) 試験要領

溶接施工法確認試験の考慮事項を表 3.12 に示す。溶接補修によく使用されている Arc と Tig の 2 種を採用し、母材外面の水冷有無で鋭敏化防止への効果を確認する。ライニング加工のし易さと溶接性の確認を目的に厚みの違うライニング材 2 種を適用し、溶接棒の径は溶接性を考慮し数種類を試験する。溶接姿勢は補修を考慮し横向き水平とし、入熱の低減と溶接性の確認を目的に電流値を一定にして溶接し、低位から高位の数種類を試験する。調査項目は、1 枚のライニング材に 1 溶接条件で溶接時間を測定し、溶接長さから運棒速度 cm/Min を算出するが同時に溶接の施工性についても調査する。溶接電流値 Amp、運棒速度 cm/Min を基に溶接入熱を算出、溶接後に JIS G0571、G0580 での腐食試験により鋭敏化の程度を確認する。ここで溶接入熱は、以下の式(3.11)で表される。

$$\text{入熱 [J/cm]} = 60 \times \text{電圧 [Volt]} \times \text{電流 [Amp]} \div \text{運棒速度 [cm/Min]} \quad (3.11)$$

表3.12 溶接施工法確認試験の要領

溶接法	Arc Welding 母材外側を 水冷実施, 水冷なしの2種	Tig Welding 母材外側を 水冷実施, 水冷なしの2種
母材	SUS304 厚み3.5mm	SUS304 厚み3.5mm
ライニング材	SUS304L 切板150mm <sup>□</sup> 厚み1.5, 3.0mmの2種	SUS304L 切板150mm <sup>□</sup> 厚み1.5, 3.0mmの2種
溶接棒	D308L 径1.6, 2.0mm for 1.5mmライニング材 径2.6mm for 3.0mmライニング材	Y308L 径1.0, 1.2, 1.6mm for 1.5mmライニング材 径2.4mm for 3.0mmライニング材
溶接条件	電圧 25Volt 電流 低電流から高電流を数種類	電圧 14Volt 電流 低電流から高電流を数種類
溶接姿勢	横向き水平	横向き水平

#### 4) 試験結果

母材 HAZ 部での鋭敏化範囲 mm、EPR 法測定値 (Ir/Ia) %も調査したが、鋭敏化範囲は 0~1.2mm の範囲、EPR 法測定値は母材 HAZ 部で最大 5%程度であった。鋭敏化範囲と EPR 法測定値では正の相関が確認できた。鋭敏化範囲が 1mm 程度と狭く、特定するためにはエッチングが必要なことから以下 JIS G0571 での腐食試験を評価に使用する。溶接施工法確認試験の結果を溶接入熱と電流値、溶接入熱と運棒速度の関係で整理した。図 3.39 に Arc 溶接の電流値と入熱の関係、図 3.40 に Tig 溶接の電流値と入熱の関係、図 3.41 に Arc 溶接の運棒速度と入熱の関係、図 3.42 に Tig 溶接の運棒速度と入熱の関係を示す。溶接入熱が組織に及ぼす影響は横軸を入熱、縦軸を腐食試験結果の段状組織、3 分類の混合組織、みぞ状組織として模式的に図 3.43 に示す。

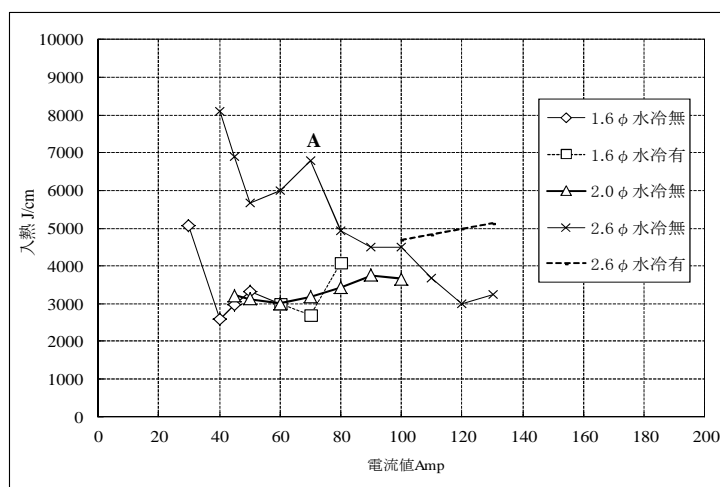


図3.39 Arc Welding 電流値/入熱の関係

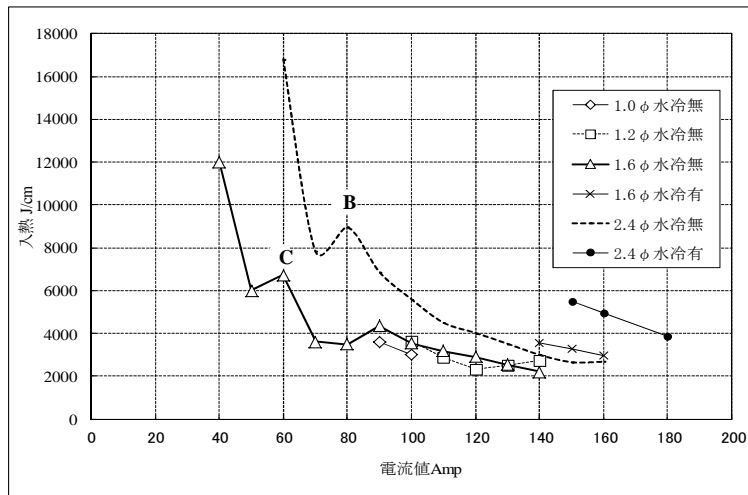


図3.40 Tig Welding 電流値/入熱の関係

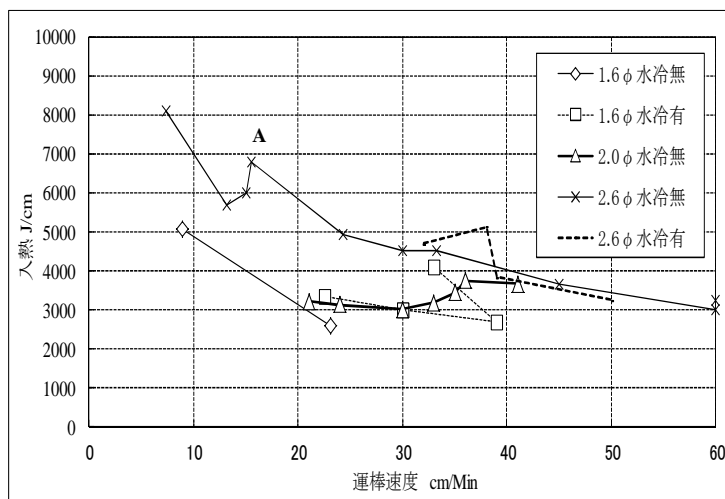


図3.41 Arc Welding 運棒速度/入熱の関係

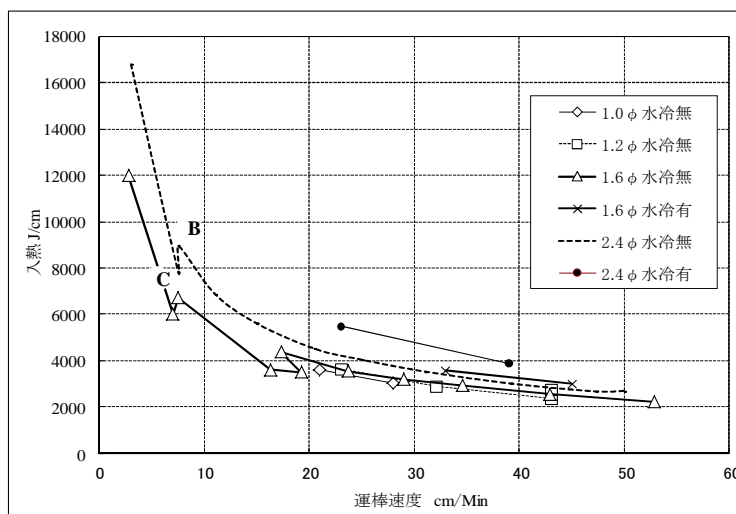


図3.42 Tig Welding 運棒速度/入熱の関係



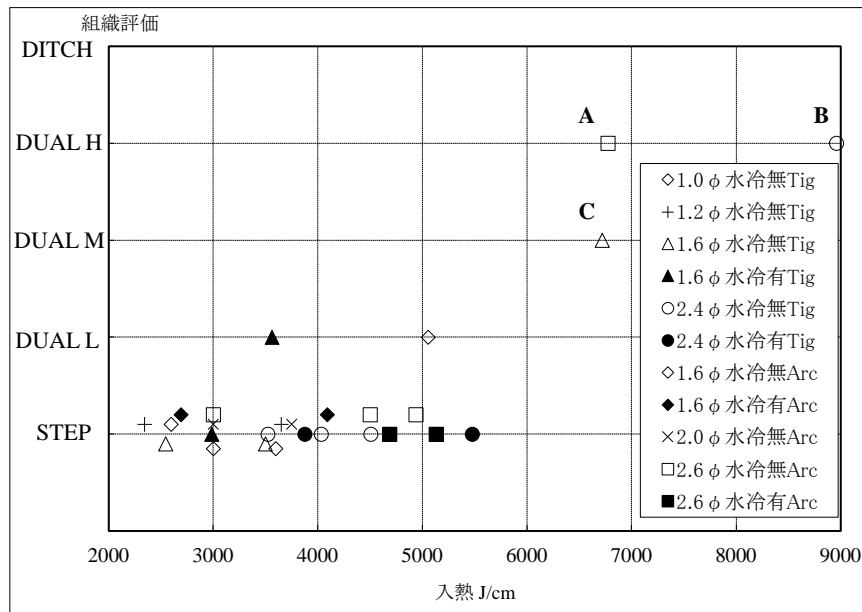


図3.43 溶接入熱と腐食試験結果

### 5) 溶接施工法確認試験のまとめ

薄板のライニング材の溶接で低入熱を目指した試験では、みぞ状組織となるような高入熱にはなりにくい。図 3.39～図 3.43 中の A、B、C、は、低電流域で良好な溶接施工性が得られず実機条件では採用できないが、高入熱の影響を調査するため腐食試験を行った例である。図 3.39～図 3.42 から電流値を高め設定し、運棒速度を速めた方が低入熱になる結果となったが、40cm/Min を超えると速過ぎて施工が困難になるとの溶接士の意見であった。ライニング材の厚みは薄い方が入熱を低くでき、溶接棒の径では明確な優位性が認められない。Arc と Tig において溶接施工性の良好範囲で入熱に差は無く、実際の補修では外観表面の仕上がりが良く欠陥検査の浸透試験が判断し易い Tig 溶接が優位である。水冷の実施は Arc と Tig のいずれにおいても良好な溶接施工性を得るために入熱を高めているが、鋭敏化は明らかに抑えられ優位である結果を示している。

図 3.43 の溶接入熱と腐食試験結果から混合組織 H を発生させない入熱の設定として 6,000J/cm を超えない目標とする。溶接施工性が確保できた範囲では、この入熱を越えていない。

### 3.5.4 実機の鋭敏化域の補修

#### 1) 実機の溶接施工法確認試験

補修要領は図 3.44 のように鏡と胴の溶接線 HAZ の鋭敏化域を SUS304L のライニング材で鉢巻き状に覆い、全周溶接は加工による影響を受けている鏡部を避け本体胴部にて行う。さらに、鏡のフランジ部 A、ナックル部 BC での溶接を避け、比較的加工の影響の小さいクラウン部 D で全周当て板溶接を行い、本体との全周溶接はこの 2ヶ所のみとする。次に、当て板間に短冊状のライニング材を加工溶接し完成する。なお、真空仕様への対応として強度計算による適当な間隔で栓溶接を施工する。本体への全周溶接部の溶接条件の妥当性

と溶接による鋭敏化の進行を JIS G0571 の腐食試験により評価する。溶接施工法確認試験は、鏡と胴の溶接線 HAZ が、みぞ状組織に鋭敏化している SUS304 製の実機を使用して行う。

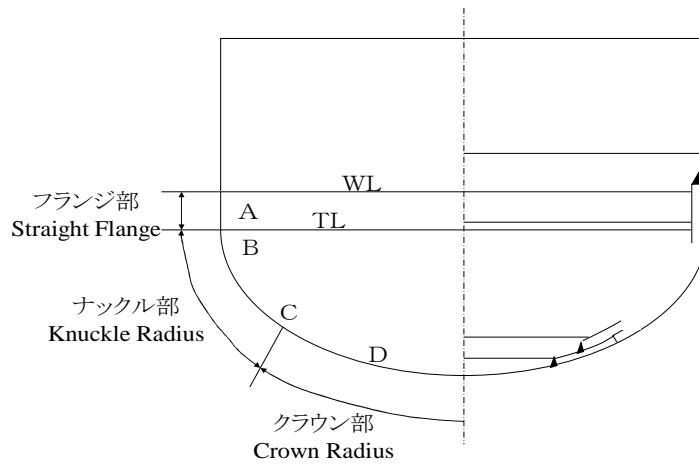


図3.44 補修要領のイメージと鏡部の名称

## 2) 実機の試験要領

実機の溶接施工法確認試験の要領を表 3.13 に示すが、考慮事項については前節と同様である。さらに、ここでは SUS304L の切板を実機の鏡の ABCD の半径方向に位置をずらして溶接を行い、溶接位置による優位の有無を確認する。評価は溶接線 HAZ の SUS304 母材と、SUS304L ライニング材の両方を JIS G0571 と JIS G0580 で行う。

表3.13 実機の溶接施工法確認試験の要領

溶接法	Arc Welding 母材外側を 水冷実施，水冷なしの2種	Tig Welding 母材外側を 水冷実施，水冷なしの2種
母材	SUS304 厚み4.0mm 撤去実機	SUS304 厚み4.0mm 撤去実機
ライニング材	SUS304L 切板150mm <sup>W</sup> ×80mm <sup>H</sup> 厚み1.5, 3.0mmの2種 半径方向にずらせて取付け	SUS304L 切板150mm <sup>W</sup> ×80mm <sup>H</sup> 厚み1.5, 3.0mmの2種 半径方向にずらせて取付け
溶接棒	D308L 径2.0mm for 1.5mmライニング材 径2.6mm for 3.0mmライニング材	Y308L 径1.6mm for 1.5mmライニング材 径2.4mm for 3.0mmライニング材
溶接条件	電圧 25Volt 電流 溶接性良好範囲で数種類	電圧 14Volt 電流 溶接性良好範囲で数種類
溶接姿勢	横向き水平	横向き水平

### 3) 実機の試験結果

図 3.45 に溶接入熱と運棒速度の関係を示すが、負の相関が認められ、電流値を上げ、運棒速度を上げると入熱は低減する。溶接入熱は、いずれも 5,000J/cm 程度以下であり、EPR 法測定値では本体胴部、鏡部の ABCD 部に大きな差異は無く 0~1.5%の範囲で鋭敏化範囲も最大 0.8mm であった。溶接入熱と JIS G0571 による腐食試験結果を図 3.46 に示すが、溶接入熱は 5,000J/cm 以下であり、みぞ状組織や混合組織 H は見られない。ライニング材の厚みは薄い方が低入熱となっている。

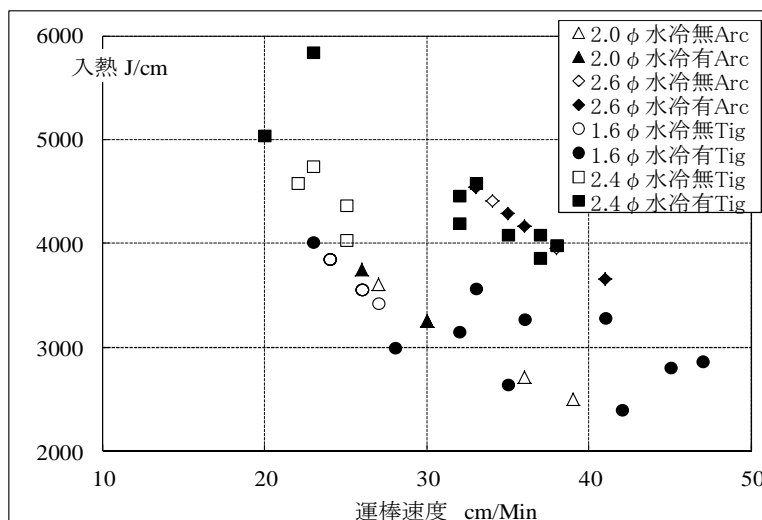


図3.45 運棒速度/入熱の関係

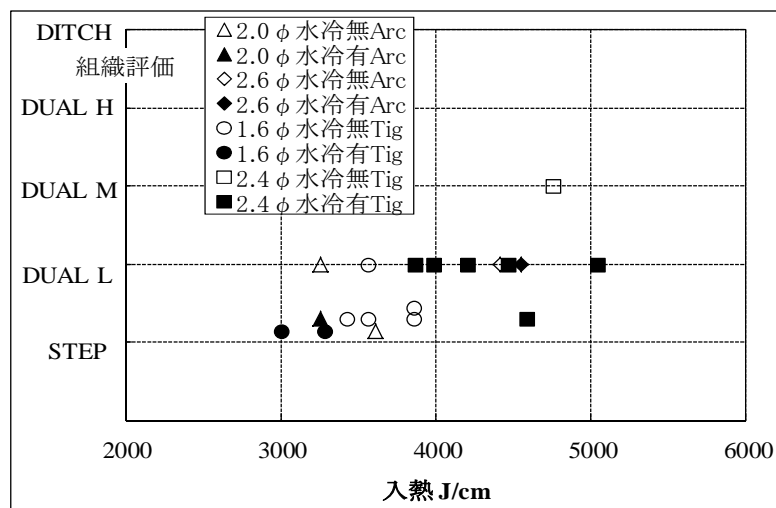


図3.46 溶接入熱と腐食試験結果

### 4) 実機の溶接施工法確認試験のまとめ

溶接施工性に問題の無い範囲で電流値を高く設定し、運棒速度を上げる方が溶接入熱は低く抑えられる。ただ、極度に速めると運棒のむらやライニング材と母材の隙間の不揃

い等で、運棒を手間取り過大な入熱を与える恐れがあるので採用する熟練溶接士に確実な施工を確保できる溶接施工法確認試験を事前に設定する。ライニング材の厚みは加工性を考慮し1.5~2.0mmが適当と思われ、薄板での溶接では5,000J/cm程度の入熱で抑えられ鋭敏化の問題は発生しないと考えられる。水冷法は鋭敏化温度の暴露時間を短縮することから非常に有効である結果と成った。

### 5) 実機の補修

設定した条件で実機の鏡と胴の溶接線 HAZ の鋭敏化域を溶接ライニングで補修し JIS G0571 にて評価して効果を確認する。本体とライニング材の溶接線はできるだけ少ない方が良く、かつ溶接線は一定した運棒速度が必要であり同じ状態、同じ姿勢での溶接条件とするため鉢巻き式のライニングとした。溶接入熱の管理は、本体胴と鉢巻きライニング、鏡のクラウン部と鉢巻きライニングの2箇所のみであり、その他の溶接は SUS304L ライニング材同士の溶接となる。実機補修においては水冷法を適用したが、鉢巻きの溶接線とライニング材取り付け溶接線が近いために熱影響を受けた部位があった。また鉢巻きライニング材の加工を確実に本体に密着させて溶接を施工しないと円滑な溶接性が得られず、運棒速度が低下し溶接入熱が高くなる恐れがある。ライニング材は2.0mmを使用したが無問題なく加工できた。ライニング溶接線の状況と腐食試験部位を図3.47にその番号部位の溶接入熱と腐食試験結果を図3.48に示す。腐食試験の結果、0.6~0.7mm幅の混合組織(DUAL M)が観察されたが許容内と評価できた。図3.38の実例(混合組織M)は、図3.47の②の部位の組織写真である。実際の補修状況を胴部で切断した内面の図3.49に示す。

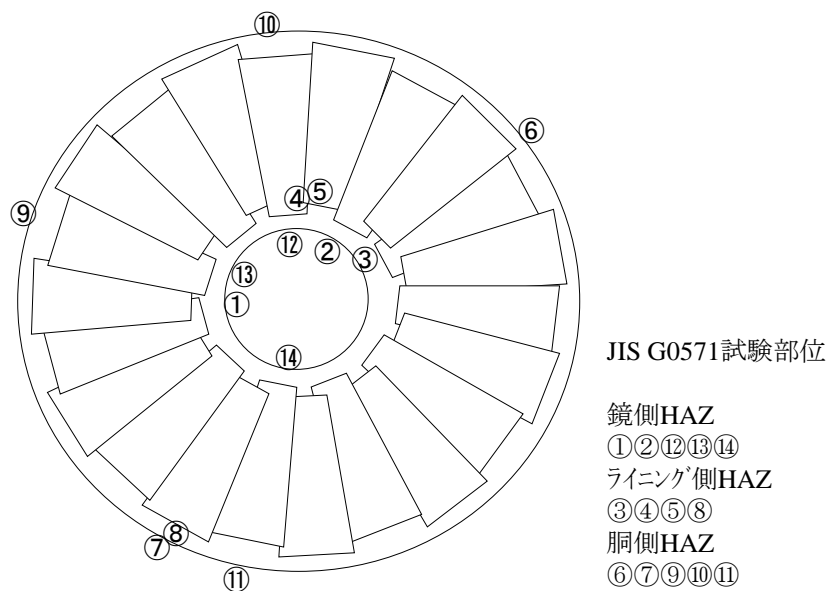


図3.47 ライニング補修要領と腐食試験部位

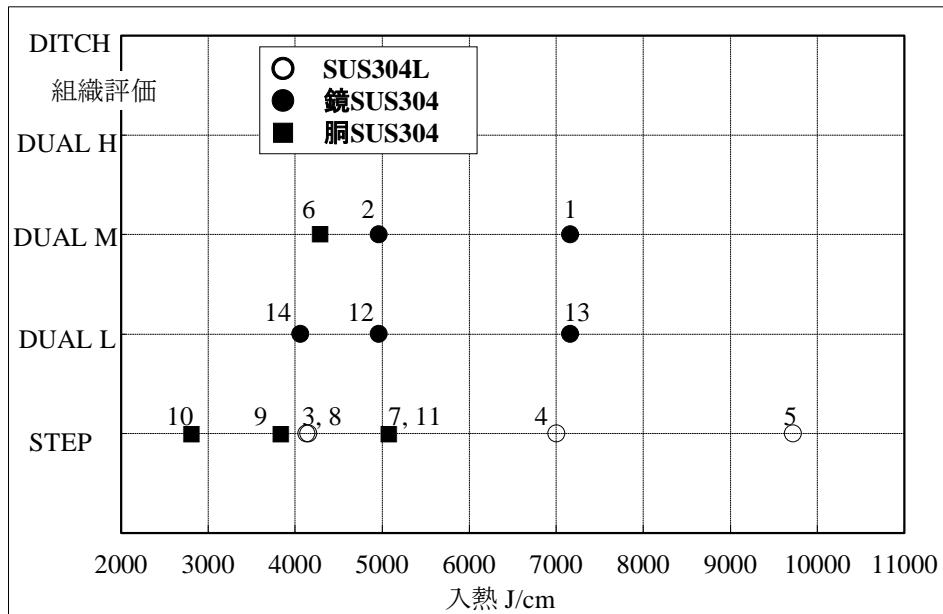


図3.48 実機補修後の溶接入熱と腐食試験結果

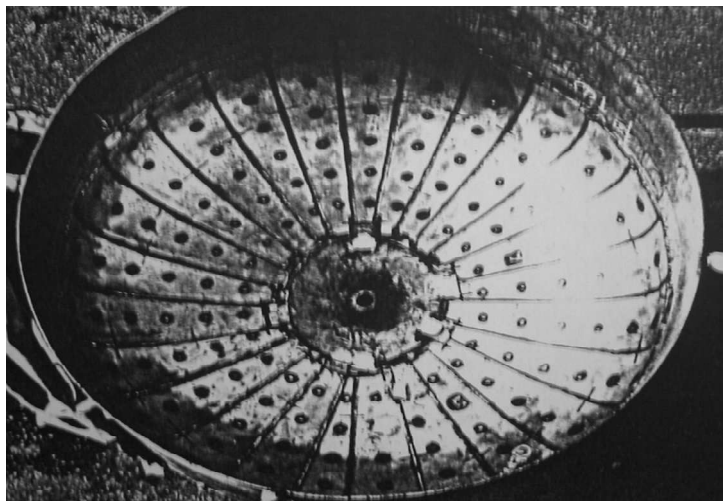


図3.49 実機ライニング補修の状況

### 3.5.5 ステンレス製機器の鋭敏化による劣化の管理の結言

本論文では、プラントで一般的に使用されている 18-8 ステンレス (SUS304) 製機器の損傷 IGC、IGSCC の要因として考えられる溶接による鋭敏化をその発生機構と実際に供されている設備の調査結果による検証から許容限界を定義し、鋭敏化域を回復する方法として、SUS304L 材を使った溶接ライニングによる回復法を提案した。SUS304 製機器の弱点である鋭敏化の評価とその復元による最適な設備管理のマネージメント技術を示せた。

(1) IGC や IGSCC に進展する可能性が生じる鋭敏化の許容限界は、混合組織からみぞ状組織に移行する組織状態であり腐食試験 JIS G0571 で評価できる。

- (2) 溶接入熱と腐食試験結果には相関があり、鋭敏化の抑制には入熱 6,000J/cm 以下を目標とし、熟練溶接士により溶接性を確保した薄板の SUS304L ライニング材と低炭素量の溶接棒を使用した溶接では、5,000J/cm 以下の低入熱で対応できた。
- (3) 溶接入熱を低く抑えるには電流値を上げて運棒速度を速めた溶接条件の選定が良く、採用する熟練溶接士に確実な施工を確保できる溶接施工法確認試験を事前に設定する。
- (4) 実機への適用では、SUS304L ライニング材 2mm で加工性に問題は無く、本体への溶接線を同姿勢で行えるよう鉢巻き方式を採用した。鋭敏化温度の暴露時間を短縮するため水冷法を適用し、外観仕上りと確実な検査面から Tig 溶接を採用した。

鋭敏化を起因とする IGC や IGSCC を懸念するケースでは、本論文での対応が可能となり、更新までの選択肢として寄与できる。特に下鏡部の取替えが必要なケースでは塔、槽をそのままの状態回復させることが可能で施工面やコスト面から有効である。

### 3.6 多変量解析を適用した工業用水熱交換器の設備管理の最適化<sup>[154]</sup>

現在 IoT (Internet of Things) で多量の生産データを収集し、Big data を統計解析し、AI (Artificial Intelligence : 人工知能) で機械学習させて、生産革新を図ろうとする動きが活発化している<sup>[38],[134],[176],[177]</sup>。運転監視や制御の技術の他、運転安定化の最適化を図り品質の悪化条件の回避や良品の取得、効率的なエネルギーの運転、異常の兆候を察知して故障前に対応する CBM (Condition Based Maintenance : 状態基準保全)化など、様々なアイデアが実現化し始めている。一方で、設備管理の PDCA (Plan、Do、Check、Action) マネージメントに多変量解析などの統計解析を用いて最適化する研究事例が見当たらない。多くは個別の診断技術や寿命予測評価などに Gumbel 分布や Weibull 分布を適用したり、多変量を含む統計解析を用いたりするに留まっている<sup>[178]</sup>。中原と庄子<sup>[162]</sup>は極値解析に基づく冷却水を用いた炭素鋼熱交換器の運転寿命推定に多変量解析を用いている。中には MT 法 (Mahalanobis-Taguchi Method) の利用により運転データから異常の兆候を察知する取り組みなどもある<sup>[179]-[184]</sup>。しかし設備管理の最適化したい現象を定量的に評価、改善すべき指標を設定して対応し、その効果をモニタリングで確認するという PDCA のマネージメントに多変量解析を取り入れたものとは言えないようである。それらは運転や設備の状態を評価したり、異常の兆候を検出したりするに過ぎず、改善や解決もしない。さらに Big data 解析では因果関係は分からずとも良結果を得る条件を特定できれば良く、1 つのミスが事故に繋がる石油化学プラントへの適用には気持ちの悪いものがある。

多変量解析は相互に関連する多数のデータを統計的に分析し、複雑なデータを簡潔に要約して、データの背後にある現象の構造を明らかにするための方法を総称するものである<sup>[156]</sup>。さまざまな分野で適用され開発もされており、分析手法も多様で設備管理の分野においても適用の可能性は大きい。本論文では、工業用水熱交換器の設備管理や水処理の日常業務で収集されたデータに基づいて、多変量解析を用いた最適条件を求める方法を提案する。水処理と熱交換器の管理に関する指標は複雑に絡み合っている。設備の信頼性を熱交換器の炭素鋼管の腐食速度、コストを設備管理コストや水処理コストとして、各々を目的変数にして最適条件を求めた。改善すべき指標を設定して対応し、その効果をモニタリ

ングで確認する PDCA のマネージメントも示す。この方法を 31 の既存プラントに適用し、それらのプラントの保全費と水処理費の合計コストの最適化とともに炭素鋼管の腐食速度を改善して長期連続運転の実現に寄与させた具体例と効果を示す。

### 3.6.1 工業用水熱交換器の課題

石油化学工業のような装置産業では、冷却水として工業用水を使用する多くの熱交換器がある。通常、水処理システムは環境負荷を最小限に抑えるために水をリサイクルする。工業用水の品質は、熱交換器の伝熱管の腐食速度や熱伝達係数の低下に大きく影響するため、定期的な熱交換器の掃除や腐食検査を行い不良伝熱管は補修や取替えする。また阻害要因の抑制のためコストをかけ薬剤を投入したり濾過器で清浄化したりする水処理を行っており、熱交換器の設備管理と工業用水の水処理との間の最適化が必要である。工業用水を冷媒とする熱交換器の設備管理の最適化は、石油化学プラントの設備管理において最も頭の痛い課題の一つである。その理由の第一は、この種の熱交換器の数が非常に多いことである。後に示す事例の工場においては、約 1,000 基、伝熱管数にして約 260,000 本を数える。第二の理由は、工業用水の水質が季節や天候、その他の影響を受けて大きく変動することである。このため、取水する工業用水の水質を把握するための検査と望ましい水質を実現するための処理が欠かせない。第三の理由は、非常に多数の因子が絡み合ってスケール、汚れ、腐食という三種類の劣化現象として発現し<sup>[185]-[187]</sup>、熱交換器の信頼性と水処理費用を含めた保全費に影響することである。このため、熱交換器の信頼性の向上および維持費の低減に最も効果のある因子を特定することが難しく、最適化が困難である。第四のそして最も深刻な理由は、この種の熱交換器が設備管理に多大な費用と労力を必要とすることである。対象が多く、掃除や検査、検査の結果による補修や取替え、水質管理のための薬剤の投入や流速、温度などの管理が費用と労力を必要とする。

### 3.6.2 多変量解析を使用した PDCA マネージメントによる最適化の手順

設備管理と水処理の関係は、要因が複雑に絡み合っている。多変量解析は、事象の各要因を指標化して整理し、影響度による施策で最適化するのに有効である。設備管理に多変量解析を適用する要領は、以下の通りである。図3.50 に工業用水熱交換器に多変量解析を適用する際の要領を示す。

#### 1) 設備管理における最適化したい事象の因果関係を整理した「特性要因図の作成」

解析のために事象の劣化メカニズムを解明する。劣化を発生させる要因と発生から故障に至るまでのメカニズムの仮説を立てる。対象が劣化でなければ事象を説明する要因を列挙する。特性要因図を使用して要因を整理することで、要因が抜けなく抽出でき事象が説明できる。

#### 2) 日常管理や設備管理のデータから要因として採取可能な「データ収集」

採取が可能なデータに変換して要因を代表するデータを収集する。例えば菌は採取可能

な菌のボリュームとした。濃縮度は電気伝導度をベースとした。水質や運転のデータは年間平均値とした。費用や保全のデータは年当たりとした。

### 3) 各変数の分散、偏相関係数などの要因の解析における評価で「有用データの選出」

解析の準備として採取データの条件や由来を明確化し検証する。採取したデータが要因を代表するデータとして問題が無いかを検証する。例えば平均値の採用は最悪時期と比較して妥当か、炭素鋼管の腐食速度の測定のと時期や方法は正しいかを確認する。要因解析で寄与率、偏相関等で代表項目を抽出し有用データに絞り込む。相関のあるデータはより寄与率の高い一方のデータを採用する。寄与率が有意で無いデータは除外する。多数の要因からの因子の絞り込みは、主要因分析（Principal Component Regression : PCR）や因子分析（Factor Analysis : FA）、最近ではPLS回帰（Partial Least Squares Regression）などの要因解析から寄与率・偏相関などで代表項目を抽出する<sup>[156],[157],[188],[189]</sup>。多くの水質データは濃縮度と相関が高い。濃縮度を採用してほとんどの水質データは棄却となった。

### 4) データの取扱いと管理面から多変量解析の数量化 I 類を適用し「改善すべき指標の設定」

収集された有用なデータを整理し、定量データ、質的データ、カテゴリデータに分類する。数量化 I 類は質的データを取り扱う多変量解析のひとつの分野である<sup>[156],[157]</sup>。各プラントの最適化はデータサイエンスの知識の無いスタッフが担当しなければならない。したがってデータの取扱いと目標管理が容易であるカテゴリ項目が選定された数量化 I 類を使用した。連続した数値データでも、温度や流速は、ある範囲ごとのカテゴリで整理した方がよい。範囲の閾値は、メカニズムにより適切に設定する。得られたデータは、目的変数と説明変数に分けられ、改善すべき指標を設定する。

### 5) 最適化したい事象の予測式による「効果の定量的評価」

多変量解析で損傷の予測式化を図り、防止効果を算定できるようにする。目的変数の説明式は予測式となりえる。予め施策の効果が分かれば、より効果のある施策に投資する根拠となる。最適な設備管理は設備の信頼性と保全コストの最適化である。本論文では、腐食速度と保全費の予測式化を図った。

### 6) 最適化の改善策の効果のモニタリングと評価による「PDCAマネジメントの実践」

最適な設備管理の方法を策定する。目的変数に影響の大きい要因を改善する施策を立案できる。



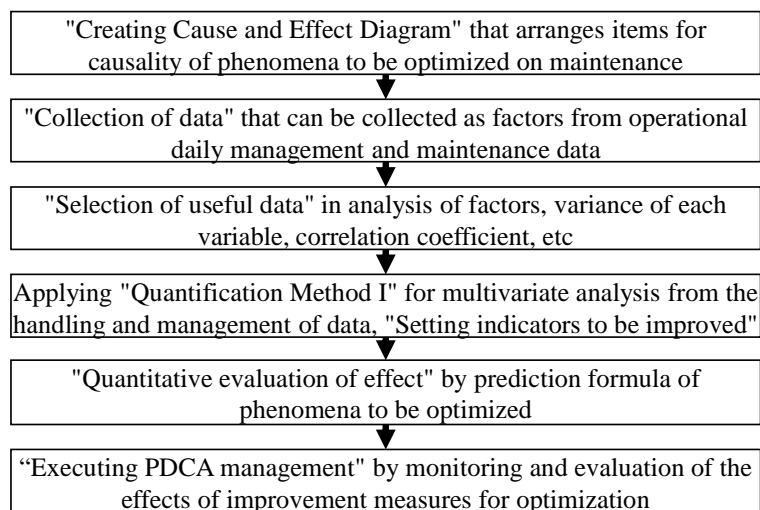


図3.50 PDCA management utilizing multivariate analysis to optimize phenomena on maintenance

### 3.6.3 工業用水熱交換器の阻害要因

石油化学のような装置産業で採用している工業用水の一般的なフローを図3.51に示す。冷水塔は大気開放で冷水塔ファンがある誘引式である。その循環系にさまざまな使用条件、仕様の熱交換器が配置されている。循環系は補給水を受け入れ冷水塔に薬剤を投入する。工業用水は熱交換器を通った後、冷却され再び循環する。循環水中の不純物は散水冷却の際に蒸発で濃縮される。そのため循環水の汚れ状況と濃縮度管理はブローを必要とする。循環水中の不純物は、補給水からの土砂、藻、菌、水中に溶解しているCa、Mg、Fe等の硬度成分、Cl等の腐食成分などである。これらは熱交換器内で堆積したり、スケールやスライム等の汚れによる性能低下を引き起こしたりする。またスケールや汚れの付着物の下では酸素濃淡電池の腐食が起こる。さらには微生物や腐食成分による腐食を発生させる。工業用水熱交換器における阻害要因は、スケール、汚れ、腐食である<sup>[185]-[187]</sup>。

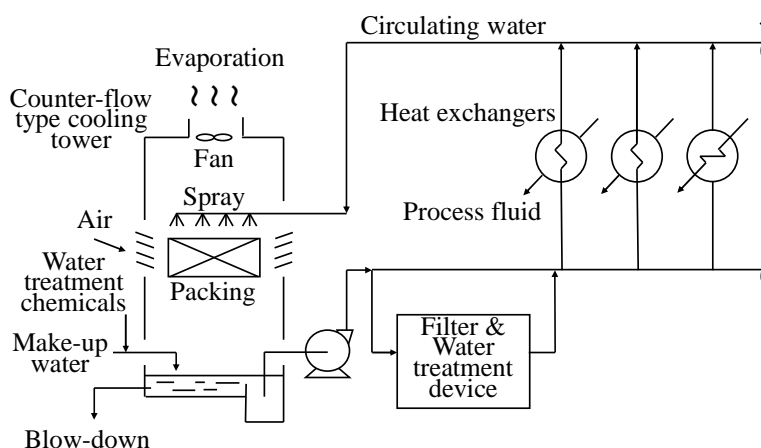


図3.51 Flow example of industrial water

### 3.6.4 工業用水の水質

補給水の水質は、同じ河川からの取水であっても工場内の各プラントで違いがある。不純物は貯水池や原水池を経由すれば沈降する。純水を作る目的で水処理する場合やプラントの回収水を混ぜる場合もある。さらには配管経路中の錆や砂、泥などの影響もある。循環水は冷却塔で蒸発と飛散の損失があり水中の不純物は濃縮する。濃縮度は損失と補給水量、ブロー量から計算し補給水と循環水の不純物の濃度を測定して管理する。その他の考慮事項として、冷却塔での塵芥や海浜近辺の設置では海塩粒子の巻き込みがある。使用される熱交換器の仕様を考慮して、スケール、汚れ、腐食の阻害要因を抑える水処理プログラムが適用される<sup>[185]-[187],[190]</sup>。事例工場での工業用水熱交換器の伝熱管の材質は1/2がステンレス鋼管で、1/3が炭素鋼管、残りが銅系管と他の特殊材料の管である。水質がスケール、汚れ、腐食にどのように影響しているかを事例工場の例で説明する。

#### 1) 濃縮度

濃縮度は補給水中の塩類濃度に対する循環水中の塩類濃度の比で表される。補給水や投入薬剤を少なくするには濃縮度を上げれば良いが、同時に水中の不純物濃度も上がりスケール、汚れ、腐食のリスクを増大させる。高濃縮運転では適正な薬剤を選定しなければならず、高価な薬剤の使用でかえってコストアップとなる場合もある。

#### 2) pH

低いと腐食傾向、高いとスケール傾向となり略 7~8 で管理される。濃縮度を上げると pH も上昇し、pH が高いと酸化性殺菌剤の効果が低下する。解析結果では各プラントとも問題の無いよう管理されていたので寄与率が低く代表項目にはならなかった。

#### 3) 塩化物

濃縮度を上げると補給水中の塩化物が濃縮され、また殺菌剤に含まれている塩化物の影響で塩化物濃度は上昇する。高濃度では腐食が懸念され、オーステナイト系ステンレスでは SCC が心配となる。塩化物濃度が低くてもスケールの発生部で塩化物の濃縮が起これば SCC の可能性もある。解析結果では寄与率が低く代表項目にはならなかった。障害を発生する濃度には至らなかつたと推測できる。

#### 4) Ca 硬度、濁度

濃縮度を上げると Ca 硬度、濁度も比例して大きくなり、Ca 硬度上昇はスケール傾向に濁度上昇は汚れ増加の方向となる。濁度はブロー、補給水により調整を行い、濃縮度 5 以上では濾過器を設置する。炭酸カルシウムは温度上昇とともに溶解度が低くなり、スケール析出傾向になる。スケール防止の水質管理は各プラントとも差が無く、Ca 硬度は代表項目にはならなかった。一方、濁度は寄与率が最も大きい代表項目となった。一年の平均が 5ppm 以下のプラントから 30ppm 程度のプラントまで管理にばらつきがあった。

## 5) 微生物

微生物の増殖量と温度、pHの関係のイメージを図3.52に示すが、温度上昇とともに増殖量は増え30~38°Cで最大、それ以上では低下する。pHとの関係では7~8が最も増殖量が大きくなり9以上では減少する。8以上では酸化性殺菌剤の次亜塩素酸は殺菌力が低下する。高pHでは良好な効果を発揮する高価な次亜臭素酸などを使用する。

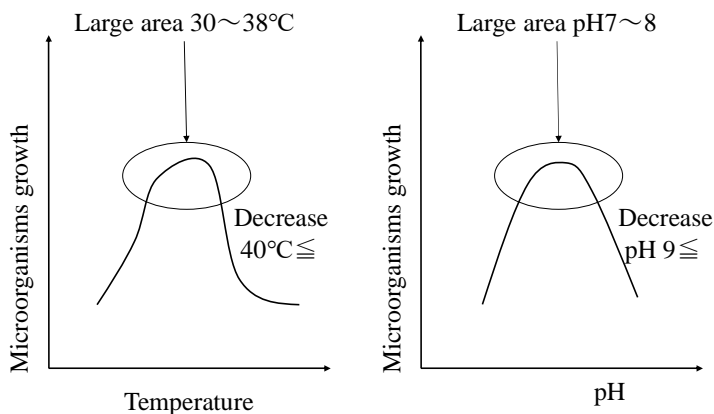


図3.52 Relation images between the growth of microorganisms and temperature / pH

### 3.6.5 阻害要因の管理

#### 1) スケール

熱交換器の性能低下を起こすスケールの種類には、炭酸カルシウム、シリカ、酸化鉄、スライム等があり、各々スケール防止剤、ブロー管理、防食剤、スライムコントロール剤が適用される。スケールの生成メカニズムは、水中のイオン化した過飽和成分が分子化して、結晶核と成り成長、凝集する過程である。従って pH、温度による未飽和、スケール防止剤による成長防止、分散剤による凝集防止が適用される<sup>[185],[187]</sup>。

#### 2) 汚れ

汚れの形態には、スライムとスラッジ等の汚濁物質による堆積がある。スライムの生成メカニズムは、細菌類と真菌類、藻類の微生物が付着し、粘着性物質を出し、無機懸濁物質が付着する過程と、フロック化した軟泥状物質が、低流速部で沈降し、堆積する過程がある<sup>[187]</sup>。堆積したスライムの下では、酸素消費による濃淡電池での腐食や硫酸塩還元バクテリア等の嫌気性バクテリアの繁殖による腐食の懸念がある<sup>[186]</sup>。細菌類・真菌類は、有機物質を栄養とし、藻類は、太陽エネルギーと無機物質を栄養とする。スライムコントロールは、栄養となる Chemical Oxygen Demand (COD) を 10ppm 以下、菌数を 1,000 個/ml 以下、スライムボリュームを 10ml/m<sup>3</sup> 以下に管理する<sup>[185],[187],[190]</sup>。以下に考慮事項をいくつか示す。

- (1) 塩素系薬剤は HOCl や OCl<sup>-</sup> による殺菌力に効果がある。ただし pH の適用範囲が狭く腐食性もあり藻類への効果が劣る。

- (2) 臭素系薬剤は pH の高い条件でもスライムの剥離効果が優れている。ただし耐性が付き易く高価である。
- (3) アミン系は懸濁物質付着防止に効果があり pH 範囲も広く腐食性も無く藻類にも効果がある。
- (4) アンモニウム塩は藻類に強い効果があるが発泡性がある。
- (5) 有機窒素硫黄系は広範囲の pH 条件に安定した効果があり、腐食性が無く速効性と残余効果もある。
- (6) 過酸化水素系は速効性剥離剤として利用される。
- (7) 物理的対策として熱交換器内流速を上げブローで懸濁物質を排出する。高濃縮系の循環水では部分濾過を実施する。その他、藻類には銅イオンと太陽光線の遮蔽が効果を示す。

### 3) 腐食

使用される防食剤には酸化皮膜を形成させる不動態皮膜型と管表面への沈殿皮膜型（水中イオン型）がある。酸化皮膜型はカルボキシル基を持つ高分子電解質のポリマーが利用される<sup>[162],[185],[187],[191]</sup>。高価であり低濃度では局部腐食を発生させ易い。沈殿皮膜型はカルシウムイオンの濃縮系で使用され、低濃縮系では亜鉛イオン等を併用する。重合リン酸塩、正リン酸塩、ホスホン酸塩、ポリマー等が使用されスケール化しないように濃縮管理が重要である。その他に腐食で考慮すべき事項を表3.14 に示す<sup>[146],[165],[192]</sup>。

表3.14 Water quality and corrosion tendency

		Carbon steel	Copper	Stainless steel
pH	Constant corrosion rate	4~10	7~9.5	—
	Large corrosion rate	4 >	9.5 <	—
Chloride ion		Corrosion	Corrosion	Corrosion
Ammonium ion		—	Corrosion	—
Electric conductivity		Corrosion failure (higher case)		

### 4) 運転面からの考慮事項

熱交換器の負荷の調整による工業用水の温度や流量の管理は、阻害要因のスケール、汚れ、腐食に大きな影響を与える。温度では溶解度や微生物の成長、流速では溶存酸素の供給と薬剤の拡散や沈降物の発生で関係は複雑である。一般的な関係を表 3.15 に示す<sup>[146],[165],[185],[187],[190],[192]</sup>。

表3.15 The relation between failure factors and temperature/flow rate

Failure factors	Temperature [°C]	Flow rate [m/sec]
Scaling	50 ≤ Increasing of deposition rate 60 ≤ Occurrence of a failure	0.3 ≤ Stability (Increasing flow rate reduces scaling)
Fouling (slime/sludge)	30~40 Occurrence of fouling 50 ≤ Low fouling	~0.3 Occurrence of fouling by sedimentation 0.5 ≤ Low fouling
Corrosion	~80 Corrosion rate increases with increasing temperature 80 ≤ Corrosion rate decreases with increasing temperature (Reduction of dissolved oxygen)	~0.3 Increasing of corrosion rate by oxygen supply 0.5 ≤ Decreasing of corrosion rate by formation of protective coating 3 ≤ Occurrence of erosion

### 3.6.6 多変量解析を使った最適化のステップ

説明した事例のようにスケール、汚れ、腐食の阻害要因は、影響する因子が多数あり、相互に複雑に絡み合っている。また水処理は、水質、使用材質、使用条件等により、個々のプラントごとに、水処理プログラムを検討し適用する。長期間の適用による各プラントの状況は、薬剤費や水の使用量等の水処理費用と、掃除、検査、補修、更新等の保全費用に、規模で整理のつかないバラツキが生じている。また工業用水熱交換器の伝熱管の寿命にも、かなりのバラツキがある。適用した水処理プログラムの費用と、熱交換器の掃除や検査の周期による保全費用の最適化を図るには、阻害要因による劣化を防止して、設備の信頼性を向上させることと、水処理費用や保全費用のコストダウンを図ることが必要である。本論文では、多変量解析を使った最適化へのステップを、工業用水熱交換器の管理方法に、実際に適用した事例を基に報告する。おのおのの事象の相関関係を評価し、着目すべき事項や阻害要因に寄与する事項を抽出して、管理の指標となる項目、管理ポイントを整理し、適用した施策の効果をモニタリングで評価している。

#### 1) 工業用水熱交換器の管理に関わる特性要因図

工業用水熱交換器の設備管理と水処理で、関係する因子について整理するために図 3.53 で示す特性要因図を作成した。解析データとして調査した約 150 の因子をできるだけ記述した。相関の重複や低い寄与率、水質管理に違いの無い因子を除外し、残った主要な因子をグレー色で示した。工業用水熱交換器の管理に関わる大項目は、スケール、汚れ、腐食、微生物、水質管理、総費用の 6 項目で整理された。スケール、汚れ、腐食は、工業用水熱交換器の阻害要因である。微生物は、スケール、汚れ、腐食に影響するスライムの要因である。水質管理は原因系、総費用は結果系の代表要因として大項目となった。工業用水熱交換器の管理に関わる項目の関係は、この特性要因図の作成により理解が深まる。要因図の項目である各プラントの熱交換器、水質、冷水塔などの運転データ、工業用水熱交換器の保全費用、腐食速度などの保全データを調査する。採取データから目的の指標となる変

数、それを説明する変数となる因子を抽出する。そして抽出因子を採取可能なデータに変換し、採取データの条件や由来を明確化し検証する。採用可能となったデータを要因解析して、管理の指標となりえる代表変数に絞り込む。

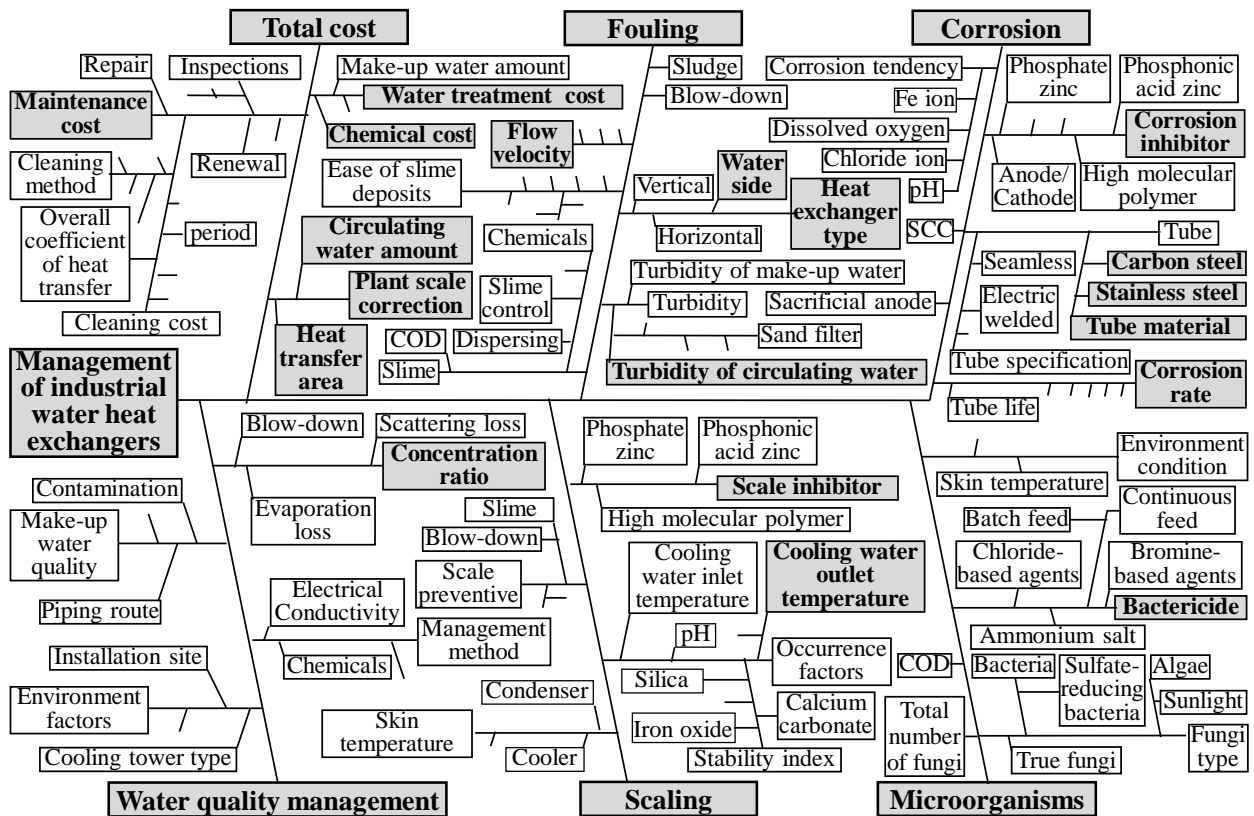


図3.53 Cause-and-effect diagrams related to the management of industrial water heat exchangers

### 2) 多変量解析の変数データ

信頼性の向上とコストダウンの最適化を図るための目的の指標には、熱交換器の炭素鋼管の腐食速度[mm/y]と、水処理費を除いた検査、掃除、補修、更新に関わる伝熱面積当たりの保全費[k¥/m<sup>2</sup>]を採用した。これら目的変数は、連続した数値変数である。説明変数となる項目は、熱交換器の型式や微生物の増殖と温度の関係のように、数値の直線関係で表すことができないあるカテゴリーごとに、整理するカテゴリーデータが適当であった。従って、目的変数と説明変数の多変量解析による予測式化には、数量化 I 類を採用した。予測式化により、あらかじめ改善する説明変数の変化から、施策の目的変数に与える効果の予想が可能と成る<sup>[156],[157],[188]</sup>。

### 3) 変数データの設定

特性要因図から運転データ、保全データを調査し、改善したい目的変数として腐食速度と保全費単価を設定した。説明変数は因子の相関関係、目的変数への寄与率等から有効なデータを絞り込み、熱交換器の型式、伝熱面積、伝熱管材質、工業用水出口温度、流速、

濃縮度、殺菌剤、防食剤、循環水濁度を選択した。データの特徴、傾向からC-1、C-2などのようにいくつかのカテゴリーに分類できるカテゴリー変数として設定した。選択した変数の一覧と変数の数値とカテゴリーの設定を表3.16 に示す。

表3.16 Setting of chosen variable data

Dependent variable (Quantitative data)	Corrosion rate : CR [mm/year]				
	Maintenance cost : MC [k¥/m <sup>2</sup> ]				
Explanatory variable (Categorical data)	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Heat exchanger type / Water side : A	Horizontal / Shell	Horizontal / Tube	Vertical / Shell	Vertical / Tube	/
Heat transfer area : B	25m <sup>2</sup> ≥	50m <sup>2</sup> ≥	150m <sup>2</sup> ≥	150m <sup>2</sup> <	/
Tube material : C	Carbon steel	Stainless, High grade material	/	/	/
Industrial water outlet temperature : D	28°C ≥	36°C ≥	44°C ≥	52°C ≥	52°C <
Flow velocity : E	0.3m/s ≥	0.5m/s ≥	0.8m/s ≥	1.2m/s ≥	1.2m/s <
Concentration ratio : F	2.0 >	3.0 >	4.0 >	4.0 ≤	/
Bactericide : G	Clorine- based	Ammonium salt	Organic nitro- gen bromide	Hypobro- mous acid	/
Corrosion inhibitor : H	High molecu- ler polymer	Phosphonic acid zinc	Phosphate zinc	Anode/ Cathode	No- thing
Turbidity of circulating water (year average): I	5 ≥	10 ≥	15 ≥	15 <	/

### 3.6.7 解析結果と改善策

#### 1) 熱交換器の炭素鋼管の腐食速度

多変量解析の数量化 I 類による解析の結果、熱交換器の炭素鋼管の CR [mm/year]の予測式は、式(3.12)で表される。

$$CR = 0.1495 + H_r + I_r + A_r + D_r + E_r + F_r \quad (3.12)$$

説明変数のデータから目的変数である腐食速度の予測ができる。各説明変数のカテゴリースコアの解析結果を図3.54に示す。H<sub>r</sub>、I<sub>r</sub>、A<sub>r</sub>、D<sub>r</sub>、E<sub>r</sub>、F<sub>r</sub> は、表3.16および図3.54に定義したカテゴリー変数のスコアである。ここで、図3.54 中の変数 (Variable) は、表3.16 で、設定したカテゴリーの数からなる説明変数 (Explanatory variable) である。各カテゴリーのスコアの変動幅 (レンジ) は、説明変数が目的変数 (Dependent variable) の予測値の増減に与える影響の程度を表す<sup>[156],[188]</sup>。

予測式からは0.15mm/y 程度であり、最も影響する因子は循環水濁度である。その影響は、-0.07mm/y~+0.12mm/y である。横型で胴側に通水し出口温度が45°C以上、流速0.8m/s 以下の熱交換器は腐食速度が悪化している。さらに塩素系の殺菌剤や濃縮度2以上ではうまく管理できていないという結果となった。

Category score table

Variable	Category		No.data	Score
$H_r$	C-1	Chlorine-based	28	0.0811
	C-2	Ammonium salt	4	0.0184
	C-3	Org. Nitro. Brom.	61	-0.0356
	C-4	Hypobrom. acid	16	-0.0109
$I_r$	C-1	5 $\geq$	21	-0.0664
	C-2	10 $\geq$	61	0.0112
	C-3	15 $\geq$	20	-0.0054
	C-4	15<	7	0.1170
$A_r$	C-1	Horizontal/Shell	8	0.0557
	C-2	Horizontal/Tube	75	-0.0041
	C-3	Vertical/Shell	9	-0.0068
	C-4	Vertical/Tube	17	-0.0047
$D_r$	C-1	28°C $\geq$	26	0.0061
	C-2	36°C $\geq$	62	-0.0123
	C-3	44°C $\geq$	18	0.0282
	C-4	52°C $\geq$	1	0.0909
	C-5	52°C<	2	0.0019
$E_r$	C-1	0.3m/s $\geq$	20	0.0280
	C-2	0.5m/s $\geq$	10	0.0280
	C-3	0.8m/s $\geq$	19	0.0428
	C-4	1.2m/s $\geq$	20	-0.0288
	C-5	1.2m/s<	40	-0.0269
$F_r$	C-1	2.0>	15	-0.0358
	C-2	3.0>	27	0.0272
	C-3	4.0>	42	-0.0136
	C-4	4.0 $\leq$	25	0.0150

Category score graph

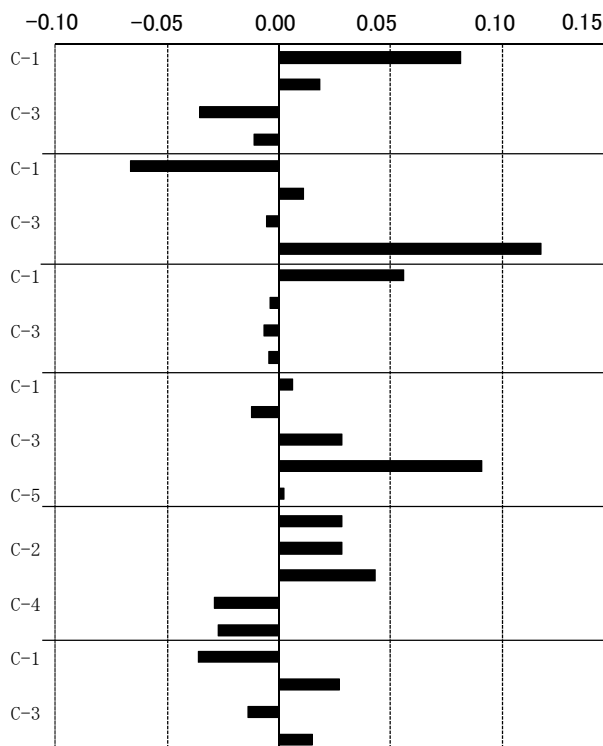


図3.54 Category score by quantification method I for corrosion rate

2) 保全費

保全費  $MC$  [k¥/m<sup>2</sup>] を目的変数とした予測式は、式(3.13)で表される。

$$MC=14.186+B_m+G_m+H_m+A_m+D_m+E_m+F_m+C_m \quad (3.13)$$

説明変数のデータから目的変数である保全費の予測ができる。各説明変数のカテゴリースコアの解析結果を 図3.55 に示す。 $B_m$ 、 $G_m$ 、 $H_m$ 、 $A_m$ 、 $D_m$ 、 $E_m$ 、 $F_m$ 、 $C_m$  は、表 3.16および 図3.55 に定義したカテゴリー変数のスコアである。ここで図3.55 中の変数 (Variable) は、表3.16で設定したカテゴリーの数からなる説明変数 (Explanatory variable) である。各カテゴリーのスコアの変動幅 (レンジ) は、説明変数が目的変数 (Dependent variable) の予測値の増減に与える影響の程度を表す。予測式から保全費は 14k¥/m<sup>2</sup> 程度であり、最も影響する因子は伝熱面積である。その影響は、-12k¥/m<sup>2</sup> ~ +17k¥/m<sup>2</sup> である。殺菌剤にアンモニウム塩を使用している熱交換器は保全費が良くない。防食剤の使用は保全費の低減に効果がある。横型で胴側に通水し出口温度が45°C以上、流速0.3m/s 以下の熱交換器は保全費が悪化している。熱交換器伝熱管の材質ではステンレスが炭素鋼に比較し保全費を低減している。さらに濃縮度 2以上では、3~4未満を除いてうまく管理できていないという結果となった。



Category score table

Variable	Category	No.data	Score
$B_m$	C-1 25m <sup>3</sup> ≥	35	17.1161
	C-2 50m <sup>3</sup> ≥	24	-2.1771
	C-3 150m <sup>3</sup> ≥	35	-7.4163
	C-4 150m <sup>3</sup> <	24	-11.9686
$G_m$	C-1 Chlorine-based	30	-1.9841
	C-2 Ammonium salt	4	10.4221
	C-3 Org. Nitro. Brom.	67	-0.7222
	C-4 Hypobrom. acid	17	3.8953
$H_m$	C-1 Hi. Molecu. polymer	40	-3.0062
	C-2 Phos. acid zinc	59	1.7225
	C-3 Phosphate zinc	4	-11.8772
	C-4 Anode/Cathode	7	-1.3787
	C-5 Nothing	8	9.4727
$A_m$	C-1 Horizontal/Shell	10	3.7368
	C-2 Horizontal/Tube	81	0.1724
	C-3 Vertical/Shell	9	2.2824
	C-4 Vertical/Tube	18	-3.9930
$D_m$	C-1 28°C≥	27	-4.9090
	C-2 36°C≥	63	1.2378
	C-3 44°C≥	21	0.9684
	C-4 52°C≥	2	6.0998
	C-5 52°C<	5	4.4045
$E_m$	C-1 0.3m/s≥	23	3.4725
	C-2 0.5m/s≥	13	1.1490
	C-3 0.8m/s≥	21	-5.0853
	C-4 1.2m/s≥	21	-1.3336
	C-5 1.2m/s<	40	0.9998
$F_m$	C-1 2.0>	16	-1.3979
	C-2 3.0>	33	3.8970
	C-3 4.0>	42	-5.2122
	C-4 4.0≤	27	4.1732
$C_m$	C-1 Carbon steel	109	0.7166
	C-2 Stainless	9	-8.6790

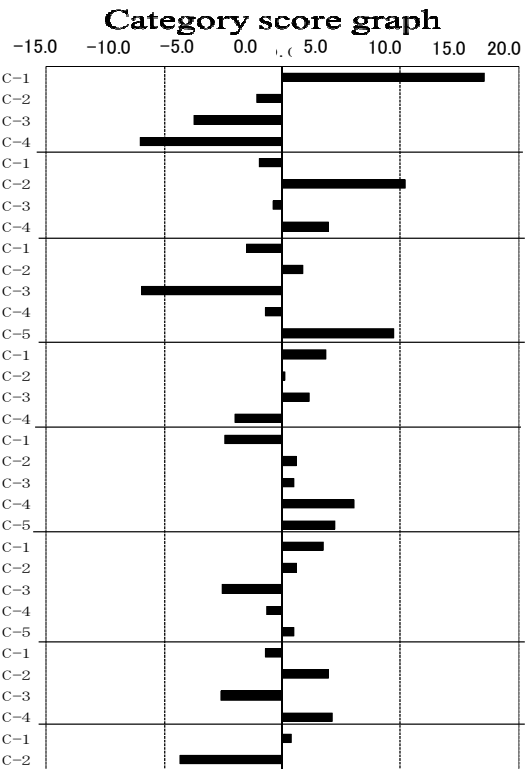


図3.55 Category score by quantification method I for maintenance cost

### 3) 改善策

解析結果は採用したデータの背景を反映したものである。水質や管理の条件が変われば結果も変化する。また解析結果の相関関係の適合度が良くても因果関係に論理性が無い場合も考えられる。したがって解析結果の妥当性の評価が必要である。

今回実施した解析の結果から腐食速度の改善策には循環水の濁度を5 $\geq$ にする事が上げられる。濁度を低減するために使用される濾過器の設置は腐食速度低減への有効性が予測できる。殺菌剤、防食剤、濃縮度等の水処理プログラムの改善と、流速や出口温度等の運転管理の向上も必要である。予測式は改善策の効果があらかじめ予想できるので、投資効果の算出や実施の判断材料に使用できる。水処理プログラムの変更や設備管理を検討する際に活用して、例えば腐食速度に著しい効果を示した循環水濁度を改善するための濾過器の設置の判断や、掃除周期、検査周期の見直しを行う。工業用水熱交換器を設備管理していく上で有用な管理すべきデータの整理ができ、腐食等の阻害要因に水処理、運転管理がどう影響するか、それらを変更した際にどう変化するか把握して臨める。ただ解析後に変更した内容は予測式には反映されないの、改善の変更が落ち着いた際に、改めて解析し評価することが必要である。

### 3.6.8 効果のモニタリングと評価

プラントごとに水処理費用と保全費用を加えた総費用で改善策の効果のモニタリングと評価を実施した。総費用は循環水量との相関で良い適合を得たのでプラントごとのバラツキを見るために、循環水量で規模の補正を行い評価した。年度ごとにプラントごとの効果の比較ができた。図3.56 に年度ごとにプラントの総費用を循環水量で整理した結果の例を示す。事例は解析が実施された年に収集されたデータと改善の2年後に収集されたデータをプロットして作成したものである。濾過器の設置の他、水処理プログラムの改善の効果は、各々の年の近似線が傾きと絶対値で低くなっており定量的に評価できる。2年のモニタリングで、A、B プラントのようにプラントごとでの効果の比較ができる。採用している水処理プログラムが、汚れや腐食から見て使用条件に合致しているか、コストから見ても適正なのかの判断等いろいろな観点が図3.56から読み取れる。またC、D プラントのように循環量の増減があったプラントについても、改善策の効果について評価が可能である。31の既存プラントに提案手法を適用し、総費用を約20%削減した事例を図3.56 に示した。

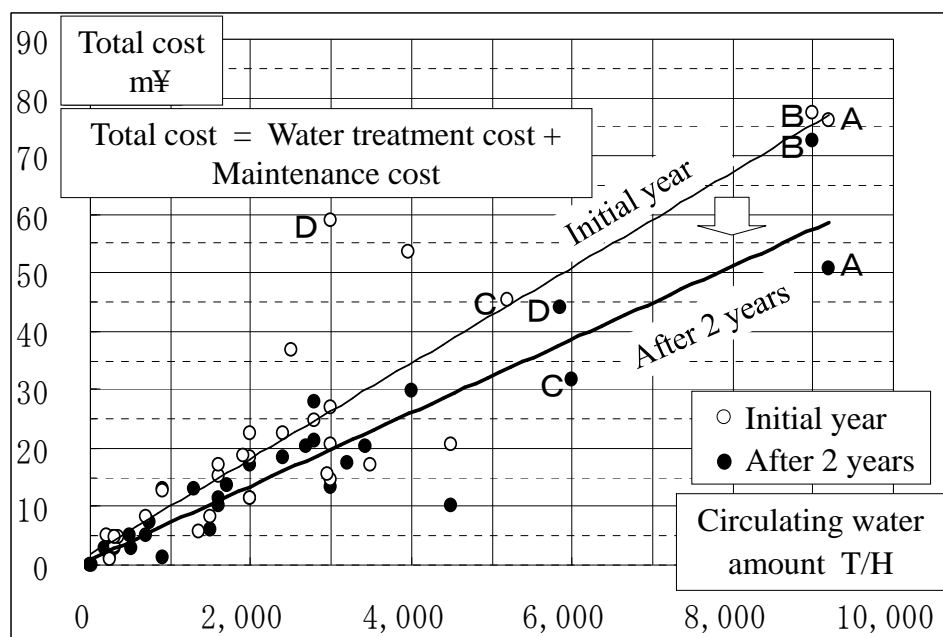


図3.56 Correlation between total cost and circulating water amount

### 3.6.9 多変量解析を適用した工業用水熱交換器の設備管理の最適化の結言

工業用水熱交換器の事例を用いて述べたように多変量解析は設備管理の最適化の方法として有効である。設備管理は設備の信頼性と保全コストの最適化を図ることである。本論文では、信頼性を代表する項目として炭素鋼管の腐食速度、コストを代表する項目として熱交換器に関わる保全費を工業用水熱交換器における最適化に採用した。多変量解析を利用したPDCAマネージメントによる最適化の本論文のまとめを以下に記述する。

- (1) 特性要因図を作成することにより設備管理と水処理のような要素が複雑に絡み合っている工業用水熱交換器の管理に関わる要因の整理が容易になる。解析を目的に採取したデータではなく、日常業務で収集された雑多なデータを基に最適化のための有用なデータを抽出する手順を示した。
- (2) 数値データの説明変数は、線形関係ではなく範囲を持ったカテゴリーで整理され、改善したい腐食速度のような数値データの目的変数の指標との相関が得られた。薬剤や伝熱管材質などの質的データのような他のカテゴリーデータと一緒に「数量化 I 類」を用いて予測式を作成した。
- (3) 事例の結果では、循環水濁度を5 $\geq$ にすることが炭素鋼管の腐食速度の改善に最も効果があり濾過器設置の投資根拠となった。予測式から出口温度の低下や流速アップの運転管理、防食剤や殺菌剤の水質管理、横型胴側通水の熱交換器の回避、伝熱管材質のステンレスなどの指標の寄与率（カテゴリースコア）が高かった。
- (4) 改善策の効果は、プラントごとに薬剤費などの水処理費と保全費を合わせた総コストをモニタリングして評価した。総コストは循環水量で規模の補正を行い約20%の低減が得られた。
- (5) 今回の解析では数値の当てはめ程度を示す決定係数 $R^2$ はいずれも0.6程度であった。ただ実際の適用に際しては、目的とするデータが少ない場合や由来が明確でないことが多く、データの選定には検証が必要である。また解析は過去のデータを基に行っており、前提条件が異なれば違った結果になるので改善後の条件で繰り返し指標を定めれば最適化が収束する。

今後の設備管理の最適化には、多変量解析が有効であり、本論文で示した手順によるデータ解析と評価が適用できる。

## Nomenclature

$A$	= category of "heat exchanger type and water side"	[-]
$A_m$	= category score of $A$ for maintenance cost ( $MC$ )	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$A_r$	= category score of $A$ for corrosion rate ( $CR$ )	[mm/year]
$B$	= category of "heat transfer area"	[-]
$B_m$	= category score of $B$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$C$	= category of "tube material"	[-]
$C_m$	= category score of $C$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$CR$	= corrosion rate	[mm/year]
$D$	= category of "industrial water outlet temperature"	[-]
$D_m$	= category score of $D$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$D_r$	= category score of $D$ for $CR$	[mm/year]
$E$	= category of "flow velocity"	[-]
$E_m$	= category score of $E$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$E_r$	= category score of $E$ for $CR$	[mm/year]
$F$	= category of "concentration ratio"	[-]

$F_m$	= category score of $F$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$F_r$	= category score of $F$ for $CR$	[mm/year]
$G$	= category of "bactericide"	[-]
$G_m$	= category score of $G$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$H$	= category of "corrosion inhibitor"	[-]
$H_m$	= category score of $H$ for $MC$	[k¥/m <sup>2</sup> ]
$H_r$	= category score of $H$ for $CR$	[mm/year]
$I$	= category of "turbidity of circulating water (year average)"	[-]
$I_r$	= category score of $I$ for $CR$	[mm/year]
$MC$	= maintenance cost	[k¥/m <sup>2</sup> ]

<Subscripts>

$m$  = for maintenance cost ( $MC$ )

$r$  = for corrosion rate ( $CR$ )

### 3.7 設備管理活動におけるパフォーマンス指標<sup>[193]</sup>

プラントにおける設備管理活動には、さまざまな遣り方があり、種々の制約条件の中でより良い遣り方を模索しながら最適化を目指している。本稿では設備管理活動の最適化に必須の設備管理のパフォーマンスに要求される定量的な指標の定義とその評価によるマネジメントシステムを提示する。適用した設備管理活動の妥当性や効果を指標により評価し、見直し修正を重ねて向上していくパフォーマンスの指標によるマネジメントシステムである。

本稿では石油化学プラントを対象に人が行う設備管理の活動に重点を置いた数値目標の設定が可能となるパフォーマンス指標を提案する。設備管理の活動における限られた資源の最適配分を主目的とし、事故・トラブルの起因となる弱点を見つけて強化する施策に効果を発揮する。適用した設備管理活動のパフォーマンス指標は、指標と成り得る項目を特性要因図で大中小の3階層で整理し、設備管理コスト、設備の信頼性、設備管理方針、設備管理組織、文書規定、企業風土の6大項目とした。さらに36個の中項目と74個の小項目に細分化した。小項目は、分数で数値化できる指標とし、分子は実施した数で、分母は対象となる数とした。プラントに適用した事例と結果についても述べる。

#### 3.7.1 設備管理活動における課題

設備管理は、建設し試運転を経て、実運転に入ってから本格的な業務活動が始まる。そして、その後のプラントの性能を最高の状態で、維持・向上するマネジメントである。また定期検査や改造・修理を行うSDMを起点とした復元や改善の繰り返しの業務活動でもある。それ故に設備管理のPDCAを回し、スパイラルアップしていく手法が、設備管理のレベル向上に最適と考えられる。PDCAによる業務活動は設備管理のインプットに当たる。従ってアウトプットである結果を保証するものではない。行っている設備管理が適正か否かは結果を評価せねばならない。そして評価するには指標となるものが必要である。

求めるアウトプットのレベルに比較して、過剰な結果となっている場合もある。結果のパフォーマンスを指標により評価して、最適な設備管理を目指す技術が要求される所以である。設備管理のための管理指標の開発は、比較評価や定量化が可能になる。そして目標設定が容易く成り最適化を目指す活動に寄与できる。設備管理の戦略は、現状を具体的な指標により解析する。求める結果の姿を新たに指標で表し、目標となる数値を設定して、各指標の数値を達成する戦術を企て、常に適正化に向け補正しながら活動していくことで達成する。すなわち目的を達成するための戦略は、指標による現状の解析から目標値を設定し、指標の値に基づき改善しながら行動することにある。

設備管理の活動の課題は、円滑な遂行に重きが置かれ曖昧な定性的方針は定められるが、定量的な数値の指標に基づく活動が疎かになっていることである。経営指標のKPI\* (Key Performance Indicator) に関する成書は多く刊行され、生産管理ではICTによる生産データ収集やERP\* (Enterprise Resource Planning) との結合などでパフォーマンスの状況を監視するシステムが各メーカーから発売されている。多くは生産性を向上する設備管理に重点があり、測定可能な時間やコストに関連する設備の稼働率や信頼性、停止時間、TBM時間基準保全やCBM状態基準保全の保全区分などの項目が指標に設定される<sup>[194]</sup> <sup>[202]</sup>。事故防止が必須の石油化学プラントの保安面の手薄感や職能給の日本と職務給の欧米との制度の違いから海外ソフトの導入は難しい。国内の設備管理の分野では日本プラントメンテナンス協会が「保全水準評価」プログラムで現状の診断を基に改善策を導く手法を提案している<sup>[203]</sup>。ただ具体的な数値指標による管理ができるまでには至っていない。

本稿では石油化学プラントを対象に人が行う設備管理の活動に重点を置いた数値目標の設定が可能となるパフォーマンス指標を提案する。筆者自身が考案し実践してきた設備管理のKPIとなる指標項目の創案、指標に基づく活動の実施、パフォーマンスの算定による解析、定量化した数値目標の設定によるレベルの向上のパフォーマンス評価の技術について診断事例を交えて説明する。特に設備管理の活動における限られた資源の最適配分を主目的とし、事故・トラブルの起因となる弱点を見つけて強化する傾注策に効果を発揮する。

### 3.7.2 パフォーマンス指標の設定

設備管理の活動は、多くの実施している作業や仕事のインプットとなる行動の結果が、アウトプットのパフォーマンスとして効果や成果に現れる。顕在化した弱点や潜在している懸念事項を修復・改善するインプットとなる行動を設定して、設備管理のパフォーマンスを向上させる活動を行う。しかしそもそもインプットとして何をやった結果が、弱点の発現や懸念事項となっているのか、因果関係を解析しなければ目的とする良いアウトプットは得られない。結果としてアウトプットが向上しても、どのようなインプットでそれが向上したのか良く分からない。さらに何がどの程度向上したのかも分からないし、同じインプットの活動を展開しようとしても同様のアウトプットが得られないという課題がある。要因として遣り方に多くのケースが存在することが上げられる。そこでインプットから活動を設定して、場合によっては活動すること自体が目的となっていた従来のやり方を変えて、アウトプットの指標から戦略を決め、戦術となる活動を設定するやり方にした。

欲しい設備管理のアウトプットとは何であるかを検討し、体系化し各々の項目を指標化した。これらを図示したのが図3.57である<sup>[1]</sup>。

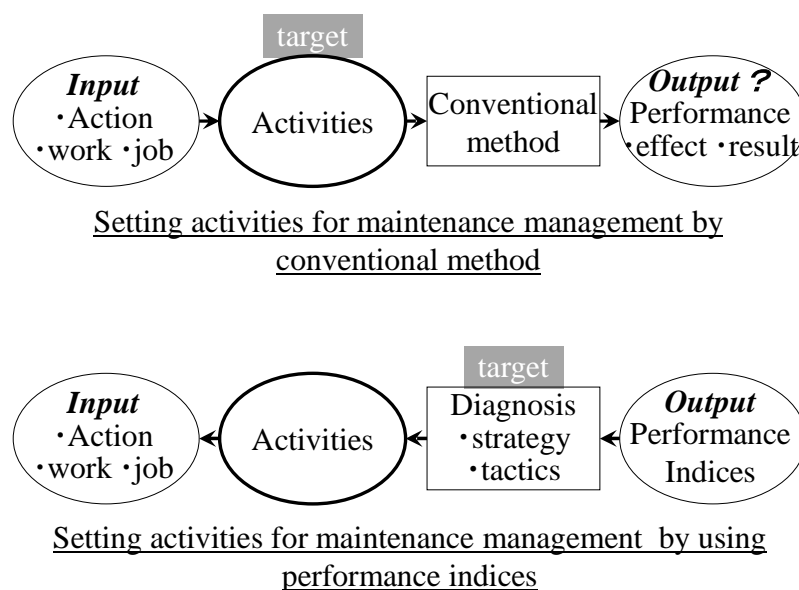


図 3.57 設備管理活動の設定方法

### 3.7.3 指標の構成

設備管理は計画して実行したことのパフォーマンスの評価をしなければ、良かったのか悪かったのか、設定したレベルが適切であったか否かが分からない。設備管理のパフォーマンスは、その時代の世の中の要求により変化し不変のものでは無いが、指標となる解析評価の項目を設定する必要がある。設備管理のパフォーマンスを知ることが、現在やっていることの妥当性を見極めるための手段と成り、その評価の結果から次への段階へ進む向上策を立てることができるのでパフォーマンスの指標は重要である。

パフォーマンスとなる要因を大中小の項目で系統化し、中項目まで記載した設備管理のパフォーマンスの特性要因図を図3.58に示す<sup>[1]-[3], [31], [32], [35], [37]</sup>。パフォーマンスの指標は74の小項目で構成され、さらに36個の中項目と6つの大項目に整理された。具体的なパフォーマンスの指標となる小項目は、分母と分子の分数で数値化できる指標とし、目標の設定や比較、判断が可能な具体的な数値指標である。分子を成果である実施した数とし、分母はプラントの対象の数として保全要員数や設備再評価額、機器数など規模の補正の基準となり共通的に適用できる分類項目に絞り込み109の調査対象とした。6つの大項目とその定義の概要を以下に記述する。

#### (1) 設備管理コスト

設備管理コストの低減は競争力の観点から重要であるが信頼性の向上施策とトレードオフの関係にある。

#### (2) 設備の信頼性

信頼性を維持・向上させる施策にはある程度の設備管理コストが必要である。

(3) 設備管理組織

設備管理を実行するのは人であり役割や責任を担った基盤となる組織と体制が必要である。

(4) 設備管理方針

組織や多くの人々が円滑に活動するには行動規範となる方針が必要である。

(5) 文書規定

設備管理のルールやマニュアル、技術の伝承、他部署との連携などに必要な文書化とその管理が重要である。

(6) 企業風土

ルール順守や技術の伝承、人材の育成、リスク対応など将来にわたって担保する最も重要で醸成には困難を極める。

構成される大項目の下部構造では、文書規定が比較的単純な構造となっており、決めて、発信して、見直しをする3つの中項目と8つの小項目から構成される。一方企業風土では非常に複雑な構造となっており、10の中項目と26の小項目から構成される。モラルや法令遵守、意欲などからなる内部環境、指示命令の系統や徹底の統制活動、自浄活動に繋がる内部監査や監視活動、風通しの良さや良いものを受け入れる柔軟さに繋がる外部交流や発表への施策、自部門内外の情報の扱いや共有、横通しや展開の伝達、教育への取り組みなどの情報と伝達、社内外の組織を構成する部門の透明性やパートナーシップ、気配り、思いやりなどが複雑に入り組んでいる。以下、方針が7つの中項目と13の小項目、組織が6つの中項目と9小項目、信頼性が5つの中項目と11小項目、コストが5つの中項目と7小項目となっている。複雑な構造ほど取り組みが困難であると予想できる。

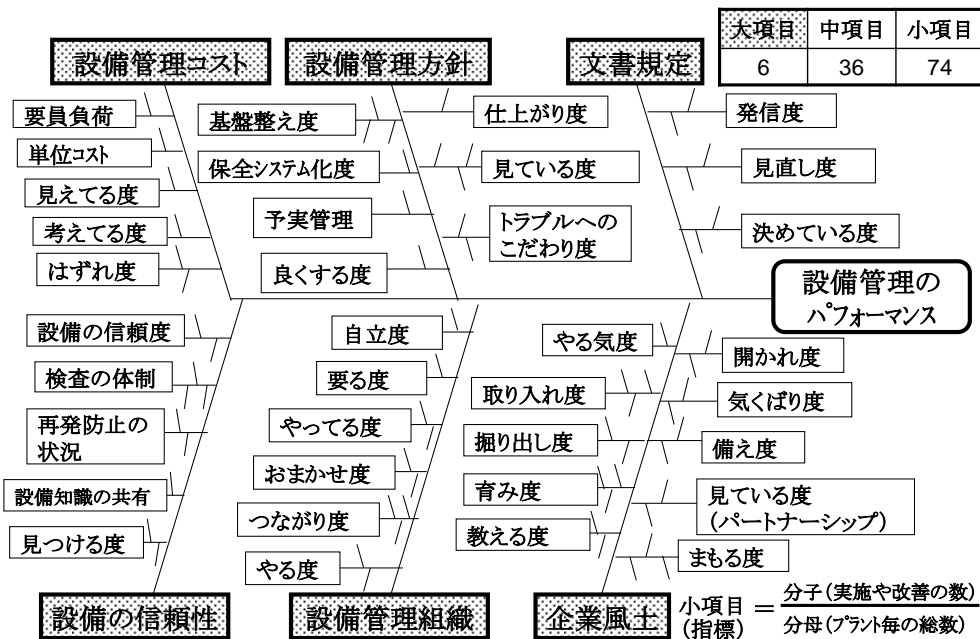


図3.58 設備管理のパフォーマンスの特性要因図

### 3.7.4 指標の定義

設備管理のパフォーマンスを向上させる戦略は、指標に基づき解析して現状把握することから始める。立てた戦略のパフォーマンスを表す成果指標には、目標の達成状況を評価する結果指標と目標達成のための手段の成行き状況を評価する先行指標がある。年度ごとのトラブル件数や損失額などの結果を見て評価するのが結果指標であり、トラブル削減のために充実に図った工事仕様書の見直し枚数や、トラブルの早期発見のためのパトロール時間などの結果の達成を先導する要因が先行指標である。その他に要求事項に応じて変わり得る組織要員数や修繕費に占める外注費用などの状態指標を設定している。このパフォーマンス指標を数値化し、指標に対して同一の判断基準で定量的な評価をすることで、現状の取り組みが向上に繋がっているかどうか、弱点がどこにあるかを把握することが可能となる。指標は、数値化され定量化されているが、数値そのもので評価判断して弱点項目を抽出するのは難しい。指標の範囲を5段階に分け、経験に基づき目安となる平均的な指標の範囲を3ポイントとし、1～5ポイントの閾値を設定した。レベルを比較できるよう明解にすることが、解析作業を容易にする。目安の閾値ではあるが、低い評価となった指標の定義や目的から判断して、設備管理上の弱点と考えられる項目を抽出して向上策を検討する。向上の到達レベルは、最適化の要求に応じた設定として、過度な数値目標の設定は避ける。数値化により到達レベルと効果の見える化が図られ、類似プラントや事業所の中での比較で現状のポジションが判断できる。指標の目標値は、指標の目的に沿えば、会社やプラントのその時点での方針に応じた値に変更して良い。例えば安全性の確保の観点から工事仕様書を充実にさせる方針であれば、設備管理方針の仕上がり度を工事仕様書の見直し枚数に設定すれば良い。設備管理活動の大項目からの抜粋で、企業風土と文書規定のパフォーマンス指標の定義と平均目安の一覧表<sup>[32],[35],[37]</sup>を表3.17に示す。

表3.17 パフォーマンス指標の定義と平均目安の抜粋

大項目	中項目	小項目	指標の定義	平均目安
企業風土 設備管理 の最適化 に最も 影響する と考え られる 企業風土 に関わる 事項	まもる度 (内部環境)	モラル	交通事故・違反件数 ／プラント保全担当者数	0 or 1
		(統制活動)	徹底度	規則・基準教育総時間 ／管理しなければならないルール の総数
	(監視活動)	ライン度	課長押印会議記録数 ／ 全会議記録数	0.4~0.6
		内部監査 度	確認すべきグループの 確認件数 ／官庁申請や届の 案件数	0.8~0.9
		変更管理	変更管理の適用件数 ／ 工事件数	0.03~0.04
	教える度 (内部環境)	コンプライア ンス周知	コンプライアンス教育時間 ／プラント保全担当者の 定時労働総時間	0.0013 ~0.0018
		(情報と 伝達)	法令教育	法令教育時間 ／プラント保全担当者の 定時労働総時間



	やる気度 (内部環境)	目標達成 意欲	ヒヤリ・ハットの処置件数 ／ヒヤリ・ハットの全件数	0.8~0.9
	取り入れ度 (情報と 伝達)	他トラブル 展開	他事例の教訓教育件数 ／自プラントが対象の水平展開案件	0.8~0.9
		他社交流	他社と交流実施回数／プラント保全担当者数	2~3
		外部団体 参画度	発表・参加回数 ／プラント保全担当者数	2~3
	開かれ度 (透明性)	子会社 管理	子会社社員数 / プラント保全担当者数	0.25~0.3
	気くばり度 (作業) (社内) (協力会社)	作業・工 事のSR*	検査・工事仕様書作成数 / 工事件数	0.4~0.5
		重要事項 組織連携	3部門(保安・運転・設備管理)会議 の開催数 / 管理すべき機器数	0.03~0.04
		事故拡散 防止度	SDM*の自プラント総入場人員 ／SDMの事業所総入場人員	0.15~0.25
	備え度 (工事管理)	SA*システム	SA 実施件数 / 工事件数	0.01~0.05
		DRシステム	DR 実施件数 / 工事件数	0.01~0.05
	見ている度 (パートナー シップ)	チェック リスト 活用度	検収チェックリスト適用件数 ／工事件数	0.8~0.9
		工事安全 衛生協力 会*活動度	SDMで発生したヒヤリ・ハット以上の 件数 / SDMの自プラント総入場人員	0.00005 ~0.0001
		作業安全 確保度	安全指示書の事前手交枚数(2週間前) ／発行予定枚数	0.8~0.9
	掘出し度	リスクマネ ジメント 体制	リスクマネジメントにかけた時間 ／プラント保全担当者の定時労働総時間	0.003 ~0.005
	育み度 (情報と 伝達)	技術 取り組 み 度	社内の報告会で発表した件数 ／技術検討・改良保全実施件数	0.3~0.4
			技術検討・改良保全実施件数 ／プラント保全担当者数	2~3
		技術伝承 体制	(レビューの実施時間×出席人数)の延 べ時間 / プラント保全担当者数	10~15
		生産革新 活動度	管理している不具合件数 / 機械機器数	1~1.2
		資格取得 意欲度	保全技能士数 / (プラント保全担当者数+運転窓口人数)	0.4~0.5
	文書規定	発信度	定例発信	月報作成件数 / 12
記録度			記録作成登録件数／残すべき記録の件数	0.8~0.9
最適な設	見直し度	予備品	予備品リストのある機器数	0.8~0.9

備管理の ための 文書 に関わる 事項		リスト	／管理すべき機器数	
		図面	図面登録している機器数／管理すべき機器数	0.8~0.9
		機器 リスト	リスト見直しをした機器数 ／仕様変更のあった機器数	0.94~0.98
		フローシート (EFD,P&ID)	最新版管理されている数／管理している数	0.94~0.98
	決めてい る度	開放周期 表	実際に管理している機器数 ／実績計画を管理すべき機器数	0.8~0.9
		プラント 個別基準	管理している個別基準のタイトル数 ／個別基準として管理すべきタイトル数	0.8~0.9

### 3.7.5. 診断事例<sup>137)</sup>

設備管理のレベルを継続的に向上させる仕組みとして、設備管理の状況を把握するためのパフォーマンス指標による診断を実施する。事故・トラブルは弱点の綻びから発生するので、弱点の強化を第一義の目的とする。指標に基づいて弱点を把握し、次年度の活動方針を検討し、生産部門と保全部門で数値目標を設定する。同じ指標を用いることで、プラント間の比較による共通の弱点の抽出や、逆のBest Practicesの選択もできる。また、生産を担当する生産部門の他、事業を担当する事業部門との間で目指すべきパフォーマンスの要求レベルも協議できる。ここでは4事業所13プラントの事例を基にして説明する。そのうち3プラントは2年後にも診断している。

#### 1) データの収集と解析

収集するデータの定義を指標の目的に応じたものとして、合せて出所由来を明確にする。指標の平均目安を参考に、あらかじめ設定した閾値を用いて、プラントの担当者による自己診断を基本とする。データから算出した評価を基に、弱点と思われる指標を抽出する。指標の評価には、閾値だけでなく、母数の絶対数や分子の完成度、本来の指標の目的の達成度なども考慮する。弱みや強みの判断を容易くするために大項目・中項目のレーダーチャートを準備した。中項目の点数評価は小項目の平均値とし、大項目の点数評価は中項目の平均値としてレーダーチャートにプロットする。例えば大項目「文書規定」の中項目の決めている度は「設備管理必携の文書」で、その小項目は設備の開放周期表の管理機器数÷管理すべき機器数、プラント個別基準の管理タイトル数÷管理すべきタイトル数で構成され、それらの指標値の平均値が決めている度の点数となる。

#### 2) 弱点の討議

解析結果から、弱点となる指標を考察し、改善すべき指標を抽出する。各々の指標のレベルや指標間の関与、発生したトラブルの原因との関係から問題となる弱点を抽出する。設備管理の仕事のやり方や行動、徹底度、改善度、意識、計画性、質などの現状のパフォーマンスのレベルを協議する。次年度の活動方針を協議し、数値による目標を設定する。

必ずしも高い点数が良いのではなく、様々な制約の中で最適化を目指す。最適化の観点からも問題の無い指標はさらに向上することを考えなくて良い。点数評価による比較では項目ごとでプラント間にばらつきがあり、かつ優劣も認められ、経験から定めた閾値の妥当性が確認できた。弱点と考えられる指標は3点未満を抽出することで確認できた。

小項目の関連性を解析するとプラントの設備管理に関わる特徴が見えてくる。例えば、工事管理に関する設備管理部門と運転管理部門のコミュニケーションが悪いという仮説を立て、備え度、見ている度（パートナーシップ）、気づき度、やる度などの関連する指標を見ていけば検証ができる。また、経年劣化に不安を持っていれば、はずれ度、単位コスト、トラブルへのこだわり度、見ている度、掘り出し度、備え度、基盤整え度、見えてる度などの指標を見て状況把握から向上策を討議する。

### 3) 対策結果の検討

実施した施策の結果を分析結果と比較し、指標の推移や進捗状況から活動の効果を確認する。妥当性を評価し、次年度の目標値を設定して実行するための施策を検討する。大項目と中項目のレーダーチャート診断の例を図3.59<sup>[1],[2],[31],[32],[35],[37]</sup>に示す。試行年とその2年後の状況が示されており、取った施策の効果として大項目の範囲が全体的に広がっていることが分かる。形が広がってバランスが良ければ良いパフォーマンスを出していると言える。また中項目では出入りがあり新たな弱点を示していることが分かる。

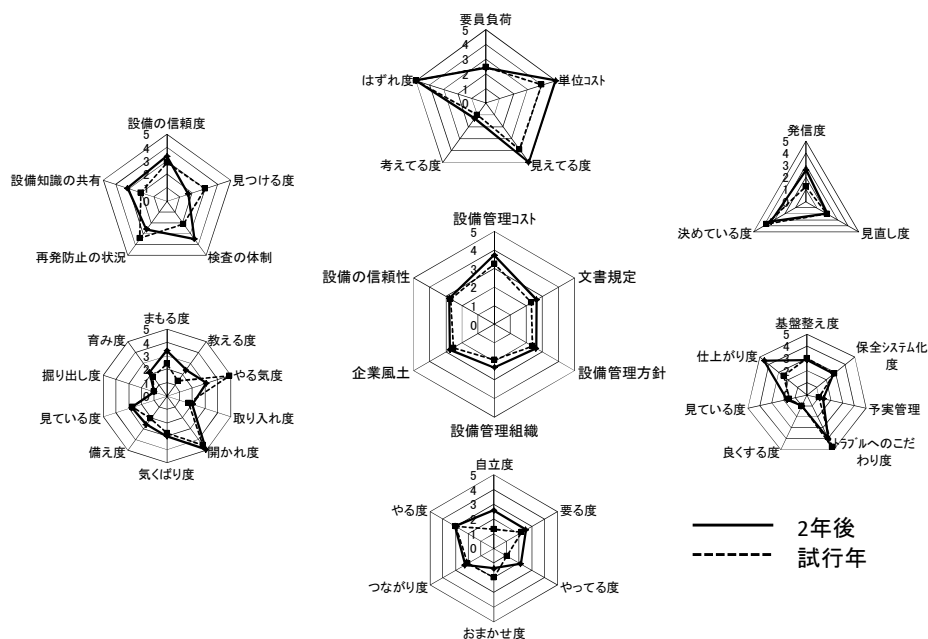


図3.59 パフォーマンス指標のレーダーチャートの事例

### 4) 結果の展開

事業所内や類似プラント間での活動結果を比較し、良い活動の紹介や共通の弱点を洗い出し、次年度の方針を検討します。図3.60<sup>[1]-[3],[31],[32],[35],[37]</sup>のパフォーマンス指標の比較の事例（大項目）に4プラントの比較を示すが、バランスが異なっており各々の特徴が出ている。主要なパフォーマンス指標の比較の例です。4つの工場の形状が異なるため、それ

ぞれの特徴を示しています。A、Bプラントでは、文書規定が弱く、DプラントをBest Practicesとして展開の可能性のあることが伺える。

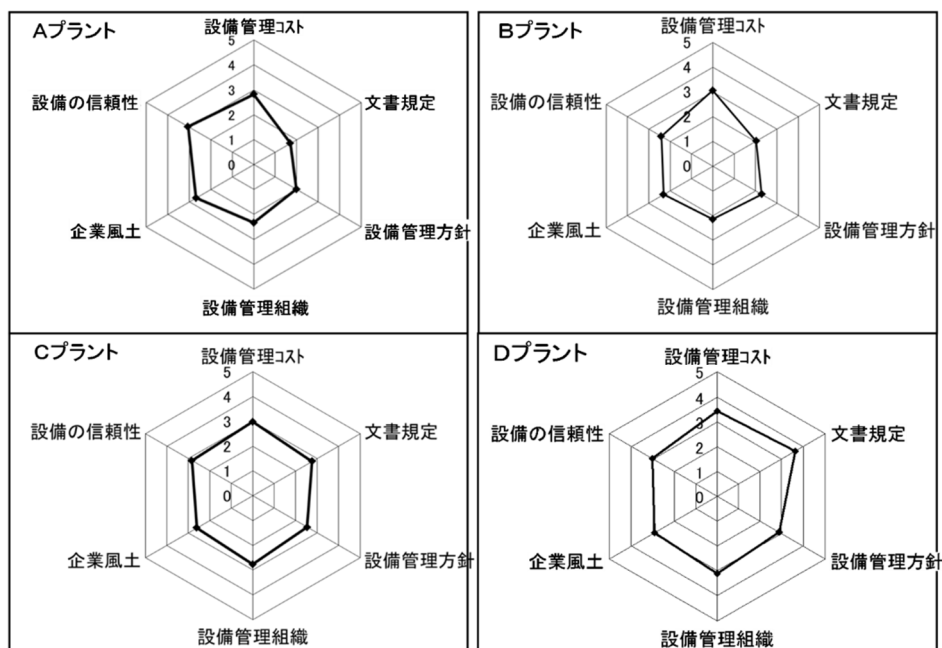


図3.60 パフォーマンス指標の比較の事例(大項目)

### 5) 指標の見直し

設備管理のパフォーマンスとして世の中の要求に適合する指標を要件としているが、企業、または事業所の活動方針に合致した指標であることも考慮しなければならない。診断により指標そのものを見直し、項目や閾値の再設定を行うことで向上が図れる。目的を達成し指標として継続監視が必要で無い場合もあり、指標の削減も考慮する。

### 3.7.6 設備管理活動におけるパフォーマンス指標の結言

最適な設備管理に必須の設備管理のパフォーマンスに要求される定量的な指標の定義とその評価による改善の標準を示した。設備管理活動の妥当性や効果を指標により評価し、見直し修正を重ねて向上していくパフォーマンス指標によるマネジメントを提示した。その時々々の要求事項を指標化して成功の目標を定め、求める目標達成のための指標を策定して追いつけることで成果を得ることができる。成果を以下に記述する。

(1) 設備管理のパフォーマンスを客観的に評価する手法ができた。

改善のモチベーションの向上につながり、仕事の意義も理解でき、納得感を持って遂行できる。生産部門も定量的な根拠に基づいて設備管理への理解が深まる。

(2) 指標と成り得る項目を特性要因図で大中小の3階層で整理し、設備管理コスト、設備の信頼性、設備管理方針、設備管理組織、文書規定、企業風土の6大項目を得た。

(3) 項目は分子分母の数値となるよう定義し、点数評価が可能ないように経験に基づく平均目安の数値を示した。本稿では平均目安の範囲を3点とし1～5点の閾値を設けて大

項目と中項目を構成している指標（小項目）の平均値でレーダーチャートに示した。

(4) 目標となる指標の策定や指標に基づくマネジメントの実行、成果の解析と評価から改善向上に繋げる具体的なパフォーマンス指標による診断マネジメントの有効性を提示した。診断の観点として、自らを知る、相互に比較する、推移や進捗を見るの以下の3項がある。

- ・プラントの設備管理のパフォーマンスのレベルや位置づけを指標により知ることによって向上すべき弱点を知る。
- ・類似プラント間や事業所内での比較により、当該プラントの位置づけや事業所の中での弱点、類似プラント間や事業所として向上すべき共通の弱点を知る。
- ・時間経過の比較により、その推移や進捗から向上すべき弱点を知る。また取った施策の効果や妥当性の評価を行い、以降の活動に活かす。

抽出された向上すべき弱点を基に、目指すべきパフォーマンスの要求レベルを関係者で協議して、その後の設備管理の方針を指標の数値で設定する。今後は診断件数を増やして指標の削減や入れ替えを含む正規化と効率化が課題である。



## 第4章 結論

設備管理はその時々の中での要求に応じて最適化を目指すマネジメントであり、取り扱う課題は多岐に及び、対象である設備も変化する。設備管理の最適化も各専門分野で個別の技術として取り上げられることはあっても、管理工学的に論理的に体系化した技術として整理されていない。本研究では、大規模石油化学プラントにおける最適な設備管理を多目的最適化問題として捉え定式化した解法とその適用で標準化した技術を示した。最適な設備管理の対象は、ハードであるプラントの設備であるが、設備管理を実行するソフトの組織や体制の人のパフォーマンスを維持・向上させる技術もある。結果に影響する制御変数と考え、設備管理活動のパフォーマンスを指標により測定し制御する技術を提示し、その他は今後の研究課題とした。成立する解法に2項のアプローチ法を定式化し、実際に適用され成果を上げた標準化した技術を提示した。標準化した技術は、設備管理の標準として事例企業で展開が図られ、他企業でも活用が可能となっている。

第1章では、産業インフラが50年を迎え社会的にも事故防止のマネジメントシステムが要求され、限りあるリソースを有効活用して設備の信頼性の向上と設備管理コスト低減の最適化を目指す設備管理が必須となっている旨を述べた。また設備管理は人系の自動化が難しい分野で、かつ世の中の要求も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背景を説明した。それ故にプラントの最適な設備管理を目指す技術を多目的最適化問題として、その解法に2項のアプローチ法を提案、解法の定式化と標準化した技術の検証で成果と課題を明らかにする本研究は設備管理の必然である。アプローチ法は次の2項である。

(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

(1)の妥協点の探索は、リスクアセスメントを基にした優先度設定の標準化と定量化を図って論理的な最適化の技術を目指す。行政の事故報告ではリスクアセスメントや人材育成・技術伝承、風化防止が課題と指摘しており、その対応策にもなる。(2)の長期連続運転の実現は、信頼性向上で規制緩和を享受する権利を得て収益の最大化(最適化)を達成する解法である。2項ともに筆者が実践してきた論理的に体系化した標準化した技術で示す旨を述べた。

第2章においては、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法を論理的、体系的に定式化して示した。ただ人系のソフト面を今後の研究課題としており、設備管理活動を行う人のパフォーマンスを維持向上させる技術が求められる。

設備の信頼性と設備管理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設備管理の優先度設定と適用した事例を提示し、トレードオフの関係にある設備の信頼性向上と設備管理コストの最適化を標準化した技術で示せた。リスク評価による優先度設定を基にすれば合理的な解が得られ、多数の関係者による合理的な意思決定手段としても評価できた。

設備管理の使命には、現状把握の解析から起り得る損失のミニマム化を図ることがあり、リスクを中心にした設備管理が適切である。リスク評価による設備管理の優先度設定はリスクアセスメントであり、筆者が考案し実践してきたリスク評価による修繕費の優先度設定の技術を提示した。今後はリスクの根拠となる金額換算された影響度と故障率の収集に

よる信頼度などの定量化を可能とする取り組みが課題である。

プラントの長期連続運転の実現では、筆者が実践してきた以下の5ステップの設備管理で設備の信頼性を向上する施策の体系化と標準化した技術を示せた。

- (1) 業務分掌による役割分担から知識や経験の維持と向上を図る体制の構築
- (2) 異常兆候の早期発見による安定運転の確保で設備の寿命を発揮させる
- (3) 顕在化した故障の結果系から取り組むトラブルの再発防止による信頼性の向上
- (4) 腐食、磨耗などの阻害要因の原因系から取り組む安定連続運転への対応
- (5) 網羅的な劣化モードの抽出で寿命予測を基にした長期安全安定操業への施策

法的制約から審査による規制緩和の享受で長期連続運転を実現し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する施策を示した。

(1)では、設備管理の方針策定、基準の体系の構築、業務分掌の設定など設備の寿命を発揮させるための役割分担と知識や経験の維持と向上を図る取り組みを提示した。(2)では、異常の早期発見のための検査の体制をOSIとSDIで示し、設備を操作する運転部門の日常点検の強化策を提示した。(3)では、顕在化した故障の結果系から進める再発防止型の設備管理のマネジメントの要領を示した。(4)では、原因系からの取り組みで腐食、汚れ、閉塞、摩耗、疲労などの阻害要因の把握と措置の取り組み、その実績の評価による供用期間に応じた設備管理の技術を示した。(5)では、網羅的な劣化要因の抽出から運転管理と設備管理の妥当性を提案シートで検証し長期安全安定操業の担保とする技術を示した。前提となる検査手法や寿命予測の体系化から運転管理シートや設備管理シートによる網羅的な検証で長期安全安定操業を可能とする施策である。劣化要因の抽出は管理の対象部位ごとの形状や材質と阻害要因となりえる接触流体の微量成分までの組合せで劣化を発現させる可能性を抜けなく検討し、劣化メカニズムに応じた検査や寿命予測とその評価による設備管理の措置で供用期間の運転に問題の無いことを検証する。シートによる検証は設備管理の計画の根拠であり技術伝承にも適用できる。最後に日常生活を知らなければ適切な設備管理は困難であり、そのための運転管理と設備管理の部門が一体となったコミュニケーションが重要な旨を補足した。

プラント設備を基点とし長期安全安定操業を目的とした最適化を目指すには、劣化させない運転管理と寿命予測を基にした設備管理の2本柱で取り進める。運転が長期化するのに伴い設備の寿命律速を明確にする必要が生じ、管理部位ごとの寿命予測に基づく設備管理を実施することが必要と成る。信頼性の高い精度の良い検査技術が不可欠で、適切な検査手法、寿命予測を適用できるよう提示した体系化が必要であった。設備の劣化を的確に把握する技術、採取された検査データを基に寿命を予測する技術の的確な適用で、誤差やばらつきの精度を向上させることが可能と成る。さらに運転条件で寿命予測にばらつきを生じるので、日常の生活がどのように営まれているかの運転管理が重要となる。部品ごと、劣化要因ごとに設備管理手法を設定しなければならず、運転管理と設備管理の融合一体化が必要で、お互いの管理を網羅的、体系的、かつ論理的に検証を行う技術として、設備管理シートを提案した。筆者考案の設備管理シートは現在では装置産業における設備管理の技術として浸透している。

今後は新検査技術や評価技術などの取入れの他、ICT活用で技術伝承など業務フローのPDCAに組み込み、日常で向上を機能させることが課題である。設備管理シートのデータベース化による設備管理に関わる知識データベースとしての利用がある。管理部位ごとの



管理により多量のデータを扱うので、確実な遂行のためにはコンピュータによるシステム化が必要と成る。検証された設備管理手法の事例を他の同様の運転条件設備に展開することも容易くなる。運転管理における運転管理シートと設備管理の設備管理シートが相互に融合一体化して情報の共有や反映を進めることで、設備管理のレベルを向上させ長期安全安定操業の担保と成る。

第3章では、第2章で述べた2項の定式化したアプローチ法を適用した最適な設備管理の標準化した技術を示した。設備管理の大きな課題となっているプラントの設備の劣化の管理を取り上げ、トレードオフの関係にある設備の信頼性向上と設備管理コスト低減の最適化にリスクアセスメントを基にした優先度設定の標準化した技術を示したが、いずれも同時に長期連続運転の実現のための信頼性向上の施策も織り込み活動している。

経年劣化は設備管理の大きな課題であり、劣化を基点とした工場設備の経年劣化を管理する標準化した技術を示した。リスクアセスメントを基にした優先度設定の技術で、検査や診断技術のコストと設備の信頼性確保を最適化する対応計画の策定の仕組みはできたが、まだまだ未然防止の領域に到達していない。劣化管理基準の策定、見直しなど今後も継続して向上することが必要である。

工場設備の劣化管理には個別の寿命予測でなく、まとまった範囲を管理の対象とする集合体で行う劣化管理がある。工場設備の塗装管理を最適化する標準化した技術を示し、集合体で行う合理的な劣化の評価による優先度設定の管理技術を示した。事例事業所への適用事例で維持費3億円が1/3になる有効性も示した。実績のデータを蓄積して、最適化の改善に繋げることが今後の課題である。

配管管理は近年の事故統計の結果から管理が行き届いておらず、管理下に置く施策も途上で早急に解決すべき課題である。配管は部位・部品で管理する必要があり、長期連続運転を実現する信頼性向上の結果系の漏洩事故やトラブルからの取り組みとして論理的、体系的なPDCAを意識した業務フローと具体的な管理の要領を示した。事例企業で適用した結果24件/年の生産に影響を与えた配管トラブル推移が3年目に5件に激減し、全トラブルに占める割合も半減している。

外面腐食の劣化管理の技術として、リスクを基にした外面腐食検査の優先度評価の管理システムによる方法を示した。経年劣化の代表とも言える外面腐食は発生する場所が散在し、足場や検査のための前処理が必要で、特に断熱材下外面腐食の検査には多額のコストを必要とする。そこで高リスクの案件を優先的に検査する技術で信頼性を確保しつつ、コストとの最適化を図るリスクアセスメントによる優先度の設定を示した。事例事業所に適用した結果、設備では3年目に、配管では5年目に補修に至った件数がゼロになった。さらに精度向上で多変量解析を利用し腐食速度の予測式を策定し信頼性の向上が図れた。今後は、根拠に基づくリスク許容と費用の確保による計画の策定、検査の実行、検査結果による根拠の検証から精度向上のPDCAを回すことが必須事項である。

ステンレス鋼の外面腐食では割れが発生する。特にSUS304製では溶接による鋭敏化という弱点があり、その評価と復元の技術を示した。鋭敏化の発生機構と実設備の調査結果から溶接入熱6,000 J/cm以下の許容限界を定義して、SUS304L材の溶接ライニングによる回復法を提案したことで、更新費用が数千万円/基の延命が可能となった。SUS304製機器の弱点である鋭敏化の評価とその復元による信頼性向上で最適な設備管理を目指す技術を示せた。

多変量解析は設備管理の最適化を目指す方法として有効であり、プラントで多数使用されている工業用水熱交換器の日常管理の雑多なデータや維持管理のために行っている設備管理のデータを用いて、多変量解析で設備管理と水処理の最適条件を求め PDCA で最適化を目指す技術を提案した。設備管理は設備の信頼性と保全コストの最適化を図ることとも言え、信頼性を代表する項目として炭素鋼管の腐食速度、コストを代表する項目として熱交換器に関わる保全費を採用し、決定係数 0.6 程度ながら得られた結果を基に設備管理と水処理を PDCA で実践し事例事業所の 31 のプラントの総コスト 7 億円の 20% 以下の低減が得られた。

パフォーマンスの維持・向上を図るソフト面があり、測定し制御する技術として、設備管理のパフォーマンスに要求される定量的な指標の定義とその評価によるマネジメントシステムを提示した。指標は大中小の 3 階層で整理し、最適化の主要項目の設備管理コストと設備の信頼性、人や組織を動かすための設備管理方針、設備管理組織、文書規定、将来にわたる担保となる企業風土の 6 大項目を得た。小項目は数値化で評価や目標設定が可能な分数の指標とし、分子は実施した数で、分母は対象となる数とした。4 事業所 13 プラントでの適用効果も確認できた。

第 4 章では、筆者自身が考案し実践してきた標準化した技術を基にした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の成果をまとめ今後の課題や展開を説明した。

装置型産業の石油化学プラントの最適な設備管理は、多目的最適化問題の解の探索として捉えられ、解法として 2 項のアプローチ法を定式化して示した。ただし結果に影響を与える設備管理を実行する人系のパフォーマンスを維持・向上させるソフト面、例えば設備管理活動の組織や人の PDCA の具体論などの技術は、今後の研究課題としている。制御変数となるソフト面に求められる測定と制御を可能とする技術として、設備管理のパフォーマンス指標によるマネジメントシステムを提示し適用した効果を示した。今後は適用数を増やし PDCA により指標の絞り込みや修正を通じて正規化していくことが課題である。

第 1 章の序論、第 2 章の最適な設備管理の定式化、第 3 章の設備管理の標準化した技術を通して、提示した技術で今後に再現性のあるマネジメントの適用が可能となった。当然ながら各々の技術は、個別の適用が可能であるよう構成されている。ただ現在の社会の要求に応じた最適な設備管理であり、今後の時の移り変わりで要求も変化するので精度を向上させるには必要部分の修正を行っていかねばならない。例えば、昨今の IoT を含む ICT の発展により設備管理の最適化の技術が様変わりする可能性は否めない。従来はリスク評価により重要度の高い設備にセンサーを設置して OLM で常時モニタリングを行っていたが、安価なセンサーが開発されており有効な設備に設置する考え方ができるようになっている。現在 IoT (Internet of Things) で多量の生産データを収集し、Big data を統計解析し、AI (Artificial Intelligence : 人工知能) で機械学習させて、生産革新を図ろうとする動きが活発化している。運転監視や制御の技術の他、運転安定化の最適化を図り品質の悪化条件の回避や良品質の取得、効率的なエネルギーの運転、異常の兆候を察知して故障前に対応する CBM 化など、様々なアイデアが具現化し始めている。しかしそれらの技術は、最適な設備管理を目指すマネジメント技術の個別の技術である。設備管理は多数の個別の技術を駆使して、時の社会の要求に応じた最適化を目指すマネジメントである。PDCA による改善・向上を継続することで、変化する時代と世の中の要求に臨機応変に柔軟な対応ができる。設備管理の最適化を目指す技術として、論理性のある体系化された技術で本論文を構成できたと考えているが、その妥当性の検討は今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、筆者が三菱ケミカル株式会社と三菱ケミカルエンジニアリング株式会社、および早稲田大学大学院情報生産システム研究科において実施したものです。本研究をまとめるに当たり、多くの方々のご理解とご協力、ご指導を賜りました。

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わる研究の業務を遂行するにあたり、研究を始めるきっかけを与えて戴いたことを始め、研究の道程において終始暖かいご指導と激励、また社会人学生であることに対するお心遣いなども含めてご指導頂いた、指導教官である松山久義元教授（九州大学名誉教授）、および早稲田大学大学院 情報生産システム研究科生産システム分野 立野繁之教授に対して心からお礼申し上げます。また論文をご精読戴きました本学情報アーキテクチャ分野 吉江修教授、生産システム分野 犬島浩教授には有益なご助言を戴き深謝申し上げます。さらに本学生産システム分野、李義頡教授、三宅丈雄教授、大貝 晴俊教授、田中英一郎教授、巽宏平教授、犬石昌秀教授、清水孝一教授および高橋淳子教授には貴重な助言を戴きましたことに深く感謝いたします。

このような研究を実施できたのは筆者個人の力ではなく、以下の方々の強力なご援助の賜物であります。お名前を書き記し、改めて感謝の意を表します。

三菱ケミカル社におきましては、岡山・茨城の事業所を中心に筆者の研究遂行のために多大の理解とご指導を戴きました同僚の皆さま、特に設備技術部の関係者に感謝致します。

三菱ケミカルエンジニアリング社におきましては、直接の上司としてご指導、ご助言頂きました深尾隆久氏、荒井保和氏、水摩堅一氏をはじめ、多くの同僚の皆さまに感謝致します。

最後にこれまでの長きに亘る筆者の研究と会社業務を支えてくれた家族に感謝します。



## 用語の説明

### ・業務分掌

企業内で構成される組織単位ごとに役割と業務内容を定め、各部門の担当する業務範囲を明確化するとともに責任の所在を文書化して明らかにしたもの。

### ・経費コスト

コストは利益を除いた製造に掛かる費用の総計で、原材料費や加工費の稼動に関係した変動費と稼動に関係せず必要となる労務費や設備の維持に必要な修繕費、設備の償却費などの固定費から成るが、材料費と労務費以外の必要な費用を経費と言い、一般に利益確保のために削減対象となるコストの内の経費を言う。

### ・経費的投資

修繕費は製造に掛かる費用のコストとして会計上単年度で処理されるが、設備の延命や性能の改善を図る場合には、設備投資として資産に計上し税を納めるとともに資産価値を償却費で減じていく修繕費とは異なる処置を取る。ここでは単純に修繕するのではなく、資産価値を高める改善投資を実施していく旨を表現している。

### ・決定係数

回帰分析による回帰式の当てはまり具合を表す指標を決定係数といい、回帰式によって説明できる割合を表し、寄与率とも呼ばれる。決定係数は、 $-1\sim 1$ の変数間の相関を表す相関係数  $R$  の2乗に等しく、 $R^2$  と表現する。この場合、マイナスの相関係数は、Graph の右辺で下向きとなる負の相関、右辺で上向きは、正の相関があるという。

### ・検収

納入品が要求仕様に合っているか種類や数量、破損の有無、機器の動作確認などを行って引き取ることを言い、大規模な設備では一定期間の試験運転を経て、不具合の修正を完了させて検収となる。ここではトラブルの要因となる施工時に生じる不具合を防止するため、検査や工事の各段階において注文した仕様を満足しているか確認することを言う。

### ・工事安全衛生協力会

事業所単位で、常駐する協力会社を会員とする工事に伴う保安安全と工事品質を確保することを目的とした協力会の組織を言う。会員の安全衛生教育や指導、災害の原因究明と対策の樹立、災害防止に係わる諸規則や監督官庁からの指示事項の遵守などに関わる自主的な活動を推進する。

### ・5S

製造業の現場で、職場環境を改善する合言葉として掲げられている活動で、整理（不要なものを捨てる）、整頓（使いやすい場所にきちんと置く）、清掃（きれいに掃除しあわせて点検）、清潔（きれいな状態を維持）、しつけ（ルールを定め習慣づけ）の頭文字の **S** をとったもの。徹底して行い **PDCA** を回すことで、無駄の排除や効率化など経営マネジメントとしても採用される。

## ・故障率

信頼性工学では、信頼度  $R$  は、時間  $t$  の関数で、 $R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$  の式で表される。 $R(t)$  は、0~1の実数を取り、 $e$  は、自然対数の底 (exponent) で、定数 2.718282828459045...の値をとる。ここで、 $\lambda$  が、故障率で、故障と故障の間の時間である MTBF (Mean Time Between Failures : 平均故障間隔 Hrs) の逆数で、 $\lambda = 1 / |MTBF|$  で表される。すなわち故障間隔時間のデータを収集さえすれば、信頼度の算出に必要な故障率を求めることができ、信頼性に対する定量的な評価が可能となる。

## ・サービスクラス

ここでは、流体・圧力・温度のサービス (供用条件) で、カテゴリ分けしたクラスごとに、使用する材質・肉厚・接続形状などの仕様を定義したプラント設計の基礎となる標準を言う。配管では、配管サービスクラスとも言う。

## ・自主保安

プラントの安定安全で効率的な操業に設備管理は不可欠な要素であり、自ら確実に責任を持って遂行できるよう必要な人材は自社に確保して、将来を担保する技術伝承や人材育成の取り組みを行うべきであるという自主保安の考え方がある。また自主保安とは、法の許す限りにおいて自ら新しい施策を取り込み保安の確保を図るとの考え方もある。自主保安は、施設や設備が達成すべき性能または目標のみを概念的に規定し、具体的には規定しない性能規定により育まれるものである。要求する条件を満足するならその施設や設備を認めるという柔軟性があることで自由な発想が生まれ自主保安が可能となる。法の求めるところが仕様規定で決められていては、保安の確保のための自由な新しい発想が生まれにくい。自主保安を活性化するには、仕様規定による法から性能規定に移行することが必要である。

## ・重回帰

多変量解析の一つで、量的要因に基づいて、量的に与えられた外的基準を説明するための手法。回帰分析で、独立変数が2次元以上で、2つ以上持つもの重回帰分析といい、1つのものを単回帰分析という。最小二乗法による線形モデルの重回帰の利用など、適切な変数を複数選択することで、計算しやすく誤差の少ない予測式の作成ができる。

## ・スプリングハンガー

配管は熱膨張や収縮により熱応力を発生するが、常温と運転温度の差が大きい場合に破損を防止するため熱応力を吸収する目的で、配管に取り付けられる部品で鋼製のスプリングをいう。

## ・スプール図

配管設計の際の図面では弁や継ぎ手、計装設備など配管材料を図示する必要があるが、実寸法の縮尺で製図するには効率が悪く、込み入った配管経路では、製図も困難である。そこで、配管は線で、配管材料も簡略的な記号で表し配管図を作成する。さらに X-Y 軸の平面図に Z 軸を加えて3次元の立体的に配管を描いた図をアイソメトリック図の略でアイソメ図と言い、これをスプール図とも言う。

#### ・設備管理シート

管理の対象部位ごとの形状や材質と阻害要因となりえる接触流体の微量成分までの組み合わせで、発生する可能性のある劣化モードを抜けなく抽出して設備管理手法を設定するシートで、現在では装置産業における設備管理のツールとして浸透している。劣化メカニズムを明確にして適切な検査や寿命予測の採用とその評価で措置を含め供用期間の運転に問題の無いことを検証する。設備管理の計画の根拠となり技術伝承のツールにも適用できるので、戦後の経済発展とともに成長した団塊の世代の引退に伴う課題の対応策でもある。

#### ・設備管理レビュー

運転部門、設備管理部門を中心に関係者一同で、取られた措置に対する妥当性の確認を行い、次回の検査や展開事項に抜けが無いかを見直し討議することにより設備管理のやり方の適正化を図る会議体を言う。運転・設備管理の情報の共有や技術伝承のほか、第三者も含めた多くの目と多重の検証の場で抜け無く項目を土俵に上げる仕組みとしても機能する。

#### ・多変量解析

種々の現象が複数の要因の変量によって決まる時、その変量間の相関関係を統計的に解析し、これらの変量の総合化をいくつかの視点から行い、多元的に考察する解析手法の総称。入学試験における総合得点や合否などの予測あるいは、判別すべき測定対象のもつ性質を外的基準、または目的変数といい、それを説明する要因を説明変数といい、何点といった量的データと優とか良、合格とか不合格といった質的データがある。外的基準が無く、説明因子の解釈に重きをおき、現象の背後にある事実を明らかにする方法の因子分析法や多くの変量をまとめ現象を要約する主成分分析法など、種々の分析、分類の方法がある。経済学や心理学など、あらゆる分野で利用されている。

#### ・団塊の世代

第2次世界大戦直後の日本において、1947～1949年の間に生まれた第一次ベビーブームの世代を言い、総務省統計局の2009年10月1日付人口推計では、664万4千人となっている。作家の堺屋太一の小説「団塊の世代」(1976)で、突出した人口構成から日本の文化・思想・経済に多大な影響を与えた世代をあらわす言葉として、鉱物の塊(nodule)の訳語「団塊」が用いられた。

#### ・デザインレビュー

設計ミスによるトラブルを防止する施策として、設計時に行う見直しの機会を**Design Review (DR)**と言い、採用した式の間違いや設計上の決定事項の評価の見直しを実施する。

#### ・手戻りロス

製造業における発生ロスの最も大きなものとして認識されているロスである。ある作業工程の途中で大きな問題が発見され、前の段階に戻ってやり直すこと。その工程内では、解消が難しいような問題があり、1つあるいは深刻な場合は、いくつか前の工程から改めて作業をやり直すことを指す。やり直しに伴い発生するコストや効率の面でのロスをいう。防止には、各段階での**DR**や**FMEA**による確認が有効である。

#### ・統括安全管理組織

複数の協力会社が、同一場所において工事を行うことによって生じる労働災害を防止するため、労働安全衛生法第 30 条に基づき設置される組織を言う。従事する作業員数により、工事期間中、安全衛生協議会の設定やその会の業務の統括を行う統括安全衛生責任者を選任して組織運営する。

#### ・トラニオン

ここでは、配管に取り付けられた支持のための円筒形の突起をトラニオン (trunnion) という。突起で支持され配管重量を支え、熱膨張の支点ともなる。

#### ・トラブル

故障・事故・問題・障害・面倒・もめ事・悶着・紛争など、さまざまな場面でトラブル (trouble) という言葉が使われているが、本論文では、設備に発生する機能の低下や喪失を故障とし、予期できずに発生した故障をトラブルと呼ぶこととする。社会的に影響のあったものは事故として分けて扱い、損失・ダメージの大きさにより、予め定めた閾値を超えたものを重トラブル、閾値以下でも挽回不可能なものは軽トラブル、挽回可能なものは微トラブルと重軽微の 3 段階に分類している場合が多い。その他に故障に至る途上にあるものを不具合として管理している場合もある。公共機関の発表事例などの引用で、異なった適用となっている場合もある。

#### ・トラブルロス

予期せぬ故障による損失ロスを言い、故障による停止に伴う挽回不可の生産ロスや修理に伴う補修ロス、補修のための液抜き・洗浄によるプロセス流体のロスや用役ロスの他、生産停止による販売機会の損失ロスも含めて、その合計をトラブルロスとして算出する。

#### ・認定事業者制度

高圧ガス保安法により、年 1 回の施設を停止しての保安検査による健全性の確認が規定されている。審査により高い技術力と体制を所持していると経済産業大臣に認可を受けた事業所については、運転中の検査を行うことにより代替できる制度。連続運転が可能となり、停止に伴う生産性の向上や検査費用の低減に大きなメリットがある。

#### ・ノン石綿

石綿 (アスベスト) の発がん性により、2004 年以降は石綿を含むガスケットの製造は中止され、その代替品の石綿を含まないガスケットをノン石綿ガスケットと称している。

#### ・配管管理シート

長期安全安定操業の担保となる劣化の網羅的検証ツールが設備管理シートで、2.6.6 設備管理シート で説明した。同様に配管に適用したシートが配管管理シートである。配管は、広範囲で複雑、かつ部品や管理すべき部位が膨大なため管理が難しい。そこでプロセス流体の工程ごとの腐食ループで整理して管理要領を示した。

#### ・バッチ運転

化学工業の運転形態のひとつであり、途中で原料・製品の出し入れをせずに化学反応や処理を行う釜仕込みの間欠運転となる生産方式を Batch operation (回分操作) と言う。切り替えの無駄により生産性は落ちるが、少量多品種生産や汚染 (Contamination)



の怖いプロセスで影響範囲を限定できる Merit がある。対して処理が終われば製品を出し、それを補う原料を投入する連続生産方式を Flow、中間形態を Semi Batch（半連続、半回分）と言う。大規模工場の流れ作業の生産方式は Flow である。

・特性要因図

1956年に石川馨が考案した問題の要因を自由な発想で出来るだけ多く提示し、特性との関係を系統的に線で結んで表した図を特性要因図と言う。魚の骨図（フィッシュボーン・チャート、fishbone diagram）、Ishikawa diagram とも呼ばれる。

・プラント

石油精製から石油化学のコンビナートを形成する各々の製品を製造する生産設備を有する大規模プラントの工場を言い、生産ラインを主とするファクトリーと呼ばれる自動車組み立て工場や印刷工場、食品工場などの工場とは区別している。

・プラント設備

プラントでは大量に各種の化学物質を取り扱い、混合・反応・蒸留などの単位操作を行って、製品となる目的の化学物質を得るが、そのために必要な熱交換器・攪拌機・反応器・蒸留塔などさまざまな機能を持った設備や設備を繋ぐ配管、自動制御のシステムなどのプラントを構成する生産設備一式を言う。

・フローシート（EFD、P&ID）

プロセスの各単位工程（反応・重合・分離・蒸留など）を流れに沿って図解した系統図。ここでは、高圧ガス、危険物など官庁申請の際に使用する簡易なフローシートを始め、設計建設に使用する EFD（Engineering Flow Diagram：技術事項流れ図）、PFD

（Process Flow Diagram：プロセスフロー図）、PID（Piping and instruments diagram：化学プラントの配管計装図）、P&I（Piping and Instrumentation：配管と計装）、P&ID（Piping and Instrumentation Diagram：基本系統図、詳細プロセスフロー図）のいずれも対象としている。

・プロセスコンピュータ

製造プロセスを監視、または制御するプロセス入出力装置（Process Interface System）を持ち、リアルタイム・マルチタスク、割り込み処理などプロセス固有の処理が可能で、製造プロセスにおける機器制御や操作員への情報支援の役割を担っている 1959年に開発されたプロセス制御用計算機をプロセスコンピュータ（process computer system）、略してプロコンと言う。対象とする製造ラインの計画・製造・実績管理の一連の生産活動を統括的に支援し、製造ラインの効率化に貢献するための計算機システム。

・保全カレンダー

保全対象となる設備や装置、または構成する部位や部品の保全すべき項目と実施時期を点検箇所・点検方法・点検周期・判断基準などを定めた基準に従い、点検・補修・部品交換・給油などの保全作業をタイムライン上にカレンダー形式で可視化したものやリストや台帳で明確にしたものを言う。

・保全方式

設備管理を実行する組織体制における運転管理部門に直下した分散保全や設備管理部門として独立した集中保全、その中間的な折衷保全や分駐保全等も保全方式であるが、

ここでは、保全のやり方である時間基準保全（TBM：Time Based Maintenance）、状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）、事後保全（BM：Breakdown Maintenance）などを保全方式と言う。

・ユーティリティ設備

製品を製造するのに必要な動力源や空調などプラントで使用する電気（受電・変電・発電）、水（用水・冷水）、空気（圧縮空気）、燃料、蒸気、窒素を用役（ユーティリティー）と言い、それらを供給する設備と空調、排水処理などの主設備の補助をする付帯設備を言う。

・4M 変更管理

製造業の品質管理で必須の **Man**（人のヒューマンファクタ）、**Machine**（設備等のハード的因子）、**Method**（製造方法や作業のやり方）、**Material**（原材料など取り扱い物質）の 4M を事故や災害を防止する上で管理すべき対象とし、変更する際に所定の手順で安全性の確認をすることを言う。

・リスクアセスメント

リスクアセスメント（Risk assessment）は、産業活動のリスク（危険性）を発見して特定し、その大きさを事前に評価し、許容できる程度に低減するための対策を検討するリスクを管理する一連のプロセスを言う。リスクの特定、分析、評価をリスクアセスメントとして、その後のリスク対応を分ける場合もある。

・六重苦

日本の企業が他国に比較し厳しい経営環境に置かれている様子を表す言葉として用いる。①超円高、②高い法人税率、③自由貿易協定への対応の遅れ、④製造業の派遣禁止などの労働規制の厳しさ、⑤温暖化規制に伴う環境規制の厳しさ、の五項目に東北大地震以降の原子力発電所の再稼働の困難さに伴う電力不足と価格高騰で、⑥電力不足と価格問題、を追加して六重苦という。さらに、⑦資源高で原料コストの上昇、または、尖閣諸島問題からのチャイナリスクや少子高齢化のいずれかの項目を追加して七重苦という場合もある。

・ロックやマーキングの規則

作業・工事の安全対策として、作業対象域を含むある範囲を縁切りして、孤立ブロックさせ、作業対象域外からの流体を含む干渉を避ける処置が取られる。縁切りには、仕切り板の挿入や配管取り外し、弁のダブルブロックとブリーダーの組合せなどが用いられ、誤操作の無いように弁への施錠や対応部位に表示を行う。また回転機に対しては、電源断が取られるが、元電源の遮断と施錠や表示で誤って投入されることの無いように処置する。これらの処置は、台帳などで管理が義務付けられ、安全措置の解除・変更には権限が定められている。処置の方法や表示の要領などとともに作業者の安全を確保するために規則化したものをロック規則と言う。またマーキングの規則は、誤った作業の防止を目的に、運転管理・設備管理部門、協力会社の3者立会の確認で、撤去配管や切込み位置、締結部の開放部などを赤色ペイントやリボン、色札などでマーキングする方法を定めたものである。

## ・DCS

工場の生産システムに使われる制御システムのひとつで、制御装置が脳のように中心に1つあるのではなく、システムを構成する各機器に制御装置があり、機能的にも物理的にも分散配置されたデジタルコントローラ群から構成され、ネットワークで接続され、相互に通信し監視し合う分散制御システムを DCS (Distributed (Digital) Control System) と言う。1975年に日本の各メーカーが一斉に発表した。監視、フィードバック制御、シーケンス制御などの機能を持つデジタル計装制御システムで、それぞれのコントローラは最大でも256個程度の制御ループを実行する。

## ・ERP

起業の経営資源の有効活用を目的に統合的に管理し経営の効率化を図る手法・概念の事を ERP (Enterprise Resource Planning : 企業資源計画) といい、通常それを実現するためのソフトウェアによる業務横断型の統合基幹業務システムを指す。

## ・Hazard

事故、損傷を誘発する可能性がある危険要因、事象であり、存在している基本的な危険である爆発性、燃焼性、毒性などが存在していることで人命や資産、環境に損害を及ぼす可能性のある化学的または物理的状态をいう。工学においては、人的・物的・または環境被害を引き起こす可能性を有する潜在的な要因と定義され、構造的な要因による構造的ハザードと人的な要因による人的ハザードがある。物理的危険事情 (physical hazard) や人為的な道徳的危険事情 (moral hazard)、心理的危険事情 (morale hazard) の3つの危険事情をいう場合もある。化学プラントには、可燃物や劇毒物が高温・高圧でハザードとして存在している。

## ・ICT

ICT (Information and Communication Technology : 情報通信技術) とは、パソコンやスマホなど様々な形態のコンピュータを使ったインターネットなどの重要性を意識した技術、産業、設備、サービスなどの情報処理や通信技術の総称である。同義で IT (Information Technology : 情報技術) が良く使われていたが、最近は Communication (通信、伝達、連携) の要素を加えた ICT が使われる。

## ・IoT

従来のインターネットはコンピュータ同士をネットワーク間で繋げる技術であった。対して、安価なセンサーの普及や円滑なネットワーク通信を可能とする技術やインフラの進展を背景にあらゆるモノをネットワークで繋げる技術を IoT (Internet of Things : モノのインターネット) という。モノに設置したセンサーで情報収集し、データを集めて、解析する技術からなっている。

## ・KPI

企業活動の現状を示す多様な指標の中から目標達成の進捗を示すのに最も適していると思われる重要業績評価指標を KPI (Key Performance Indicator) と言う。達成すべき目標を KPI で定義し、継続的に測定し、進捗を監視し、日々活動の改善に繋げる。

#### ・LCC

設備や構造物などの設計、調達、建設、供用、保全、廃棄の全段階の合計費用で、該当物の全期間（生涯）に要する費用を LCC（Life Cycle Cost）と言う。初期のイニシャルコストのみでなく、その後のランニングコストを含めた総合的な費用の把握で経営意思決定する考え方。

#### ・MP 情報

過去の保全活動の情報、特にトラブルなどの弱点を整理し蓄積しておき、設計時に反映して故障しない、保全のし易い、安全安定な設備とする。または保全活動に活かして信頼性を高めていくための保全不要を究極の目標とした Maintenance Prevention（保全予防）の情報、その仕組み、活動を含めて MP 情報という。

#### ・MSDS

化学物質等の物質名や性状、人体や環境への有害性や危険性、応急時の措置、取り扱いに関する情報については、製造や輸入、取引使用、輸送、保管など取り扱いが必要になった際に不可欠である。情報が確実に伝えられるようにすることを目的にしたものが Material Safety Data Sheet（化学物質等安全性データシート）である。

#### ・NDI

Non Destructive Inspection の略、非破壊検査の総称、部材や構造物などの対象を物理的に破壊することなく、内部や表面の状態の把握や有害なきず（欠陥）を検出する検査手法。主な NDI の手法には、VT（Visual Testing：目視検査）を始め、X 線やγ線の放射線を用いた RT（Radiographic Testing：放射線透過試験）、超音波を使用する UT（Ultrasonic Testing：超音波探傷試験）、表面近くへ電流や磁束を流して表面きずを検出する ET（Eddy current Testing：渦流探傷試験）や MT（Magnetic particle Testing：磁粉探傷試験）、表面の開口きずに浸透液を浸透し、表面に吸い出して拡大させ検出する PT（Penetrant Testing：浸透探傷試験）などがある。

#### ・NPV

投資の判断のための指標で、投資期間中の投資対象が産み出すキャッシュフローから投資対象の正味現在価値（Net Present Value：NPV）で投資を決定する。投資により得られる各期の純現金収益を資本コストや必要な収益率の割引率で割り引いたものの合計から投資金額を引いて算出する。

#### ・PDCA

PDCA cycle と呼ばれる事業活動などのマネージメントを円滑に進める手法の一つ。Plan（計画）→Do（実行）→Check（評価）→Action（改善）の 4step を繰り返して、継続的に改善向上するが、螺旋を描くように 1 周ごとに cycle を向上（スパイラルアップ、spiral up）させていく。ISO 9001、14001 や労働安全衛生マネージメントシステム（OHSAS）にも取入れられている。

#### ・Plant Inspection Patrol

ここでは、専門家が目視、および簡易な検査装置を使って、トラブル防止を目的に、プラントの予め定めたエリアの全面を計画的に外観し、外面腐食やその他の変形など不具合を抽出する検査パトロールを言う。

#### ・PRA

原子力発電所で炉心損傷などの過酷な事故を対象に、設備故障などが重なった場合に発生しうる事故の発生頻度と影響のリスクを定量的に算出する手法を PRA

(Probabilistic Risk Assessment : 確率論的リスク評価) という。事故のきっかけとなる起因事象の発生頻度と各種安全装置が故障などで機能しない確率を掛け合わせて事故の頻度を評価する。航空分野や海洋分野などでも活用されている。

#### ・ROI

投資の判断のための指標で、投資した資本に対して得られる利益の割合を投資収益率 (Return On Investment : ROI) として表す。投資に見合う利益が得られるかどうかを対象から得られた利益を投資額で割った指標で判断する。3 年程度で投資回収が図れる 30% 程度を基準にしている。

#### ・SA

Safety Assessment (安全性評価) の略。ここでの SA は、設備、運転条件、原材料、要員などの 4M 変更管理に伴う、トラブル、事故、災害を未然に防止することを目的に、発生する恐れのある保安、安全、衛生、環境、品質面の潜在的な危険性を、関係者や第三者で複合的な見方で、事前に評価し、必要な対策を実施する変更事前評価の場・仕組みを言う。

#### ・SDM

法規や生産の都合で、プラントが定期的に停止して行う検査や改造・修理の保全を Shut Down Maintenance : SDM と言う。

#### ・SWRI

米国の (Southwest Research Institute) が、1970 年代に出した往復動圧縮機や往復動ポンプの配管系の振動の評価基準で、石油精製や石油化学プラントの配管系の振動を評価する際に一般的に用いられている。両振幅値の縦軸と周波数の横軸で、Design (設計)・Marginal (限界)・Correction (修正)・Danger (危険) の 4 領域に整理されている。

#### ・TPM 活動

社団法人日本プラントメンテナンス協会が日本における品質管理のデミング賞にあたる TPM 賞を設け、会社・事業所の経営層を含めた全員参加の改善活動による生産手法「全員参加の生産保全」を展開しており、その手法による活動を TPM (Total Productive Maintenance) 活動と称している。1971 年に提唱され生産部門を始め、開発・営業・管理などのあらゆる部門にわたってトップから第一線従業員に至るまで全員が参加し、重複小集団活動により、災害・不良・故障など、あらゆるロスのゼロを達成することを目的としている。



## 参考文献

### 第1章 序論

- [1] 林和弘, “化学プラントにおける設備管理の最適化”, 化学工学会 (SCE・net) 講演資料, 化学工学会, 2013年5月
- [2] 林和弘, “化学プラントにおける設備管理の最適化”, 保守検査シンポジウム講演資料, 日本非破壊検査協会, 2013年7月
- [3] 林和弘, “化学工業における設備管理の最適化”, JSNDI 九州支部技術サロン講演資料, 2013年11月
- [4] 渡邊真也, “遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化に関する研究”, 同志社大学大学院工学研究科 知識工学専攻 博士論文, 2003
- [5] 長尾一洋, “会社を強くするアウトソーシングの進め方”, 実務教育出版, 1998
- [6] A.W. Labib, "World class maintenance using a computerised maintenance management system", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 4 No.1, pp. 66- 75, 1998
- [7] Wenjian Li and An hoang Pham, “An Inspection-Maintenance Model for Systems with Multiple Competing Processes”, *IEEE Transactions on Reliability*, 54(2), pp.318–327, 2005
- [8] Garg, A. and Deshmukh, S.G., “Maintenance management: literature review and directions”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 3, pp. 205-238, 2006
- [9] A. Crespo Márquez, P. Moreu de León, J.F. Gómez Fernández, C. Parra Márquez and M. López Campos, “The maintenance management framework: A practical view to maintenance management”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol 15 No2, pp. 167-178, 2009
- [10] Khac Tuan Huynh, Anne Barros and Christophe Bérenguer, “Maintenance Decision-Making for Systems Operating Under Indirect Condition Monitoring”, *IEEE Transactions on Reliability*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 61 (2), pp. 410-425, 2012
- [11] Jun Ni, Xiaoning Jin, “Decision support systems for effective maintenance operations”, *CIRP Annals*, Vol 61, Issue 1, pp. 411-414, 2012
- [12] Khac Tuan Huynh, Inma Castro, Anne Barros and Christophe Berenguer, ”On the construction of mean residual life for maintenance decision-making”, 8th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes, Mexico City, pp.654-659, 2012
- [13] International Organization for Standardization (ISO), “Asset Management – Management Systems – Requirments”, ISO 55001:2014, 2014
- [14] 益田昭彦, 高久清, “実務家のための信頼性テキスト”, 日科技連出版社, 1989
- [15] U. Dinesh Kumar, J. Knezevic and J. Crocker, “Maintenance free operating period – an alternative measure to MTBF and failure rate for specifying reliability?”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol 64, Issue 1, pp. 127-131, 1999,
- [16] F. Stanley Nowlan, Haward F. Heap, “RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE (AD-A066-579)”, United Airline, 1978
- [17] Moubrav, John, “Reliability-Centred Maintenance: RCM II . 2nd Edition”, Butterworth-Heinemann, 1999

- [18] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), “Risk Based Inspection Development of Guidelines”, Vol.1 General Document, CRTD-Vol.20-1, 1991
- [19] American Petroleum Institute (API), "Base Resource Document on Risk-Based Inspection, Preliminary draft, API Publication 581, 1996
- [20] 中島清一, “改訂 設備保全の進め方”, 日本能率協会, 1961
- [21] 日比宗平, “設備保全の実際”, (株) テクノ, 1979
- [22] 日本プラントメンテナンス協会編, “メンテナンス便覧”, 日本プラントメンテナンス協会, 1992
- [23] 大島榮次, 師岡孝次, “設備管理工学入門”, 日本規格協会, 1992
- [24] 堺屋太一, “団塊の世代”, 講談社, 1976
- [25] 林 和弘, “優れたソリューション技術で 2007 年問題を解決する”, プラントエンジニア, 日本プラントメンテナンス協会, Vol38 No2, pp.7-12, 2006 年 2 月
- [26] 林和弘, “今後の設備管理への取り組み”, 日本メンテナンス工業会会報, 日本メンテナンス工業会 (JAMSEC), Vol 17 No2, pp.18-23, 2006 年 7 月

## 第 2 章 最適な設備管理の定式化

- [27] 林和弘, “運転管理と一体の寿命予測を基にした設備管理”, 化学工学会, INCHEM TOKYO2001 技術会議 (化学プラント技術セミナー), 東京有明ビッグサイト, pp.B5-3-1-9, 2001 年 11 月
- [28] 林和弘, “設備管理・運転管理とソリューション技術”, 化学工学, 化学工学会(SCEJ), Vol.68 No.5, pp.253-256, 2004 年 5 月
- [29] 林和弘, “長期連続運転における設備管理の最適化”, JSNDI 保守検査特別研究委員会, 日本非破壊検査協会 (JSNDI), シンポジウム講演論文集, pp.99-104, 2004 年 12 月
- [30] 林和弘, “設備管理はどうあるべきか～これからの日本産業の状況をにらみながらの一考察～”, ENE-WAY 2005, 名古屋市中小企業振興会館 吹上ホール, 中部電力, 2005 年 8 月
- [31] 林和弘, “RBM を適用した設備管理”, ISPE 日本本部, 第 6 回ヤングプロフェッショナルのためのセミナー資料, 2014 年 6 月
- [32] 林和弘, “三菱化学 (株) における設備管理”, 茨城県消防安全課産業保安室, 平成 26 年度茨城県高圧ガス保安講習会資料, 2014 年 10 月
- [33] 林和弘, “第 7 章 業界別実例 第 4 節 化学”, pp.817-830, 設備管理技術事典, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, 2003 年
- [34] 林和弘, “プラント設備における保守検査”, 非破壊検査協会シンポジウム講演資料, 日本非破壊検査協会, 2013 年 9 月
- [35] 林和弘, “「設備管理の PDCA」によるレベル向上”, 日揮情報システム, PLANTIA ユーザーの集い 2014 (第 10 回記念) in 東京講演資料, 2014 年 10 月
- [36] 林和弘, “設備管理の体制における取り組み”, 化学工学会関東支部, 化学プラントにおける設備保全, 2014 年鹿島コンビナート講習会資料, 2014 年 11 月
- [37] 林和弘, “海外生産シフト拠点における保全経営”, 日本プラントメンテナンス協会, 第 54 回設備管理全国大会～ TPM 技術カンファレンス ～A セッション変化に対応する『保



全経営』講演資料, 2014年12月

- [38] 林和弘, “保安安全のための設備管理”, 産業安全塾 (三重県, 岡山県, 石油化学工業協会), 第3講資料, 2016年6月, 11月, 2017年6月, 8月, 2018年8月, 10月, 2019年9月
- [39] 林和弘, “プラント工場の運転設備管理技術と今後”, 情報機構セミナー, セミナー資料, 2004年7月
- [40] 林和弘, 左近祐之, “プラント工場の運転・設備管理技術”, PHARMSTAGE, 技術情報協会, vol.4 No.11, pp67-74, 2005年2月
- [41] 長谷川和俊, “危険物のリスク管理ー現状と今後ー”, 危険物と保安, 一般財団法人全国危険物安全協会, 増刊号, 危険物施設安全推進講演会基調講演, pp.20-29, 2014
- [42] 長谷川和俊, “リスク管理における本質安全技術ー福島原発事故を検証するー”, 第4回装置産業のリスク管理ミニシンポジウム, 講演梗概集, pp.39-50, 2015
- [43] 長谷川和俊, “近年の化学産業における重大事故に関わる根幹的問題点”, 化学生物総合管理, 第11巻 第1号, pp.4-19, 2015
- [44] 木原重光, 富士彰夫, “RBI/RBM 入門”, 日本プラントメンテナンス協会, 2002
- [45] 酒井信介, “技術分野におけるリスクアセスメント”, 森北出版, 2003
- [46] 小林英男, “リスクベース工学の基礎”, 内田老鶴圃, 2011
- [47] 高圧ガス保安協会, “リスクアセスメント・ガイドライン(Ver.1)”, 高圧ガス保安協会, pp.1-42, 2015
- [48] 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術”, 検査技術, Vol.4 No.11, pp.20-27, 1999年11月
- [49] 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術”, 保安月報, 通商産業省環境立地局保安課, 第420号, pp.12-19, 2000年1月
- [50] 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術について”, 高圧ガス保安協会, 第11回設備管理研究会, 虎の門パストラル, pp.1-7, 2001年2月
- [51] 豊田利夫, “最近の設備診断技術 (CDT) と予知保全 (CBM) ”, 日本鉄鋼協会計測制御システム部会シンポジウム, 鉄鋼業における信頼性と設備診断技術, pp.17-21, 1998
- [52] 豊田利夫, “設備管理技術事典 第1章 設備管理”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.74-83, 2003
- [53] 原子力安全・保安院保安課, “認定完成検査実施者及び認定保安検査実施者の認定に係る事業所の体制の基準を定める告示に関する質疑応答集”, 原子力安全・保安院保安課, 2005
- [54] 独立行政法人日本学術振興会, “リスクベース保全に関するアンケート調査結果”, 「化学プラントのリスクベース保全技術」に関する先導的研究開発委員会, pp.1-8, 2006
- [55] 経済産業省, “リスクアセスメント・ハンドブック実務編 RISK ASSESSMENT HANDBOOK”, 2011
- [56] 田村昌三, “化学プラントの安全化を考える An Idea for Chemical Plant Safety”, 日本非破壊検査協会, 保守検査部門ミニシンポジウム講演資料, NDI 資料 MI-00030 2014.7.4, pp.7-35, 2014
- [57] 経済産業省, “産業事故調査結果の中間取りまとめ平成15年12月16日”, pp.1-15, 2003
- [58] 内閣官房, 総務省消防庁, 厚生労働省, 経済産業省, “石油コンビナート等における災害防止対策検討関係省庁連絡会議報告書”, 2014

- [59] 福田隆文, “機械安全設計の基礎とその考え方から見た原子力安全”, 第 3 回 装置産業のリスク管理ミニシンポジウム講演梗概集, pp.68-83, 2014
- [60] 経済産業省, “原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ”, 参考資料 諸外国の PRA 活用状況, 第 3 回会合配布資料, 2013
- [61] 林和弘, “社会インフラと生産設備の安全に役立つ設備診断・保全技術”, 日刊工業新聞, pp.15, 2013 年 11 月 29 日
- [62] 警察庁交通局 HP, 2003
- [63] 社団法人日本機械工業連合会 (株)日鉄技術情報センター, “平成 20 年度設備管理技術の新展開に関する調査報告書”, 日機連 20 高度化-12, 2009
- [64] American Petroleum Institute (API), “Risk-Based Inspection Base Resource Document 1<sup>ST</sup> Edition”, API Publication 581, 2000
- [65] 木原重光, 富士彰夫, “特集 設備管理の新技术 RBI・RBM を知ろう”, プラントエンジニア, 日本プラントメンテナンス協会, Vol.32 No.10, pp9-24, 2000
- [66] 石丸裕, “化学工業におけるリスク評価”, 日本金属学会誌, 特集「リスクベースの材料工学・材料技術」, 第 66 巻 第 12 号, pp.1206-1214, 2002
- [67] American Petroleum Institute (API), “API Recommended Practice 581 3<sup>rd</sup> Edition”, 2003
- [68] 木原重光, “RBI・RBM を用いたメンテナンス手法”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会, Vol.40 No.5, pp.20-23, 2003
- [69] 柴崎敏和, “RBI 規格の動向とその適用”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会, Vol.40 No.5, pp.14-19, 2003
- [70] 柴崎敏和, “設備管理技術事典 第 1 章 設備管理”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.65-73, 2003
- [71] 石丸裕, 政友弘明, “諸外国のリスクベース関連規格 特集・連載「リスクベース工学の基礎から応用まで」第 3 回, 圧力技術, 日本高圧力技術協会 (JHPI), Vol.44 No.4, pp.205-216, 2006
- [72] 田村兼吉, “リスクベースインスペクション(RBI)とリスクベースメンテナンス(RBM)”, 特集号 (平成 20 年度) 小論文, 海上技術安全研究所報告, 海上技術安全研究所, Vol 8 No 4, pp.111-115 (pp.415-419), 2008
- [73] 柴崎敏和, “解説 リスクを基にした検査: RBI と配管のリスク評価トピックスの紹介”, 配管技術, 日本工業出版, Vol 53 No 7, pp40-49, 2011
- [74] American Petroleum Institute (API), “Risk-Based Inspection, API Recommended Practice 580 1<sup>st</sup>. Edition”, 2002
- [75] M. Bevilacqua, F.E. Ciarapica, G. Giacchetta and M. Bertolini, “Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, Issue 2, pp 244-253, 2009
- [76] 牧修一, “製造業への RBM 導入の手順とそのポイント”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会, Vol.40 No.5, pp.24-30, 2003
- [77] Faisal I. Khan and Mahmoud Haddara, “Risk-based maintenance (RBM): A new approach for process plant inspection and maintenance”, Process safety progress, AIChE, Vol. 23, issue 4, pp. 252-265, 2004

- [78] R. Ratnayake and K. Antosz, "Risk-based maintenance assessment in the manufacturing industry: minimisation of suboptimal prioritization", *Management and Production Engineering Review*, Vol. 8, pp. 38-45, 2017
- [79] W.J. Moore and A.G. Starr, "An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities", *Computers in Industry*, Vol. 57 No. 6, pp. 595-606, 2006
- [80] Lin Li, Jun Ni, "Short-term decision support system for maintenance task prioritization", *International Journal of Production Economics*, *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, Issue 1, pp. 195-202, 2009
- [81] R. M. Chandima Ratnayake, D. Stadnicka and K. Antosz, "Deriving an empirical model for machinery prioritization: Mechanical systems maintenance", 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1442-1447, 2013
- [82] D. Stadnicka, K. Antosz and R. Ratnayake, "Development of an empirical formula for machine classification: Prioritization of maintenance tasks", *Safety Science*, Vol. 63, pp.34-41, 2014
- [83] K. Antosz and R.C. Ratnayake, "Machinery classification and prioritization: empirical models and AHP based approach for effective preventive maintenance", 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1380-1386, 2016
- [84] Abdel M. Mohamed and Sameh M. Saad, "Development of risk assessment model for equipment within the petroleum industry", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, Issue 28, pp.37-42, 2016
- [85] M. Gopalakrishnan and A. Skoogh, "Machine criticality based maintenance prioritization: identifying productivity improvement potential", *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 67 No. 4, pp. 654-672, 2018
- [86] 林和弘, "石化プラントの維持管理技術", 土木学会講演資料, 2013年4月
- [87] 生田浩一, "抜けのない抽出に基づいた設備管理", 検査技術, 日本工業出版, pp.51-58, 2011
- [88] 高田祥三, "ライフサイクル・メンテナンス", JIPM ソリューション, 2006
- [89] 牧修市, "振動法による設備診断の実際", 日本プラントメンテナンス協会, 1983
- [90] 豊田利夫, "現場で役立つ設備診断の進め方", 日本プラントメンテナンス協会, 1987
- [91] 豊田利夫, "回転機械診断の進め方", 日本プラントメンテナンス協会, 1991
- [92] 林和弘, "検査技術としての五感", 検査技術, Vol.10 No.2, pp.9, 2005年2月
- [93] 荒井保一, "経営から現場まで プラント安全構築マニュアル", 化学工業日報社, 2014
- [94] 大島榮次, "設備管理技術事典 第1章 設備管理", 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.40, pp.56-64, pp.84-91, 2003
- [95] 大島榮次, "決定版・計画保全の進め方 -12- 機能展開と部品管理", *プラントエンジニア*, Vol.30 No.3, pp.61-66, 1998
- [96] 大島榮次, "長期連続運転と設備管理", *配管技術*, 日本工業出版, Vol.42 No.12, (561), pp.1-7, 2000
- [97] 大島榮次, "設備管理と故障物理", *化学工学*, 化学工学会(SCEJ), Vol.68 No.5, pp.248-252, 2004
- [98] 遠藤功, "現場論", 東洋経済新報社, 2014
- [99] 経済産業省, "特定認定事業者及び自主保安高度化事業者の認定について", 2018

- [100] John Moubray, “Reliability-Centered Maintenance Second Edition”, Industrial Press Inc., 1997
- [101] Timothy M. Allen, “U. S. Navy Analysis Submarine Maintenance Data and the Development of Age and Reliability Profiles”, U. S. Navy (SUBMEPP: Submarine Maintenance Engineering, Planning and Procurement), 2005
- [102] U. S. Navy, “U. S. Navy Reliability-Centered Maintenance (RCM) Handbook S9081-AB-GIB-010 revision 1”, U. S. Navy, 2007
- [103] 酒井正明, 中田守, 林和弘, “超音波センサ及び探傷検査装置”, 実用新案, 登録第 3066748 号(U3066748), 1999
- [104] 林和弘, 松下道雄, “外面腐食管理の要点”, 高压ガス, 高压ガス保安協会, Vol.42 No.10, pp.811-816, 2005 年 10 月
- [105] 渡辺知寛, “プラントライフサイクルの管理<長期安定連続運転を実現する設備管理手法>”, 配管技術, 日本工業出版, pp.56-62, 2004
- [106] 渡邊智弘, “プラントはいつまで使えるか?”, プラントエンジニア, 日本プラントメンテナンス協会, Vol.43 No.3, pp.2-7, 2011
- [107] 渡辺知寛, “圧力設備の供用適正評価 (FFS: Fitness-For-Service) について”, 非破壊検査, 日本非破壊検査協会(JSNDI), Vol.62 No.9, pp.451-455, 2013
- [108] 田中孝, “設備管理技術事典 第 1 章 設備管理”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.50-55, 2003
- [109] 菊池務, “設備管理技術事典 第 6 章 技術分野別事例”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.679-682, 2003
- [110] 藤井哲雄, “設備管理技術事典 第 2 章 劣化現象の原因と対策”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.191-201, 2003
- [111] 宮沢正純, 林和弘, “設備の経年劣化対策への取り組み”, 化学装置, Vol.38 No.12, pp.59-65, 1996
- [112] 石丸裕, “設備管理技術事典 第 2 章 劣化現象の原因と対策”, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, pp.123-134, 2003
- [113] 大津亘, “設計技術者のための品質管理”, 日科技連出版社, 1989
- [114] 奥川光太郎, “数理統計学概説”, 学術図書出版社, 1972

### 第 3 章 設備管理の標準化した技術

- [115] 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “集合体基準の劣化管理による塗装の管理手法”, 日本設備管理学会誌, Vol.28 No.3, pp.110-118, 2016 年 10 月
- [116] 日本プラントメンテナンス協会 (JIPM) 設備ユーザーのための外面腐食研究会, “外面腐食対策ガイド”, 日本プラントメンテナンス協会, 2010
- [117] (株)関西ペイント, “KHD システムガイドブック (プラント塗装)”
- [118] 吉田豊彦, “塗膜の寿命 (I)”, 色材, Vol.65 No.5, pp.308-316, 1992
- [119] 社団法人日本道路協会, “鋼道路橋塗装・防食便覧”, 2005
- [120] American Society for Testing and Materials (ASTM), “Standard Method of Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surface. D-615-95 (Steel Structures Paint Council. SSPC-Vis-2), 1995
- [121] 中道敏彦, 石塚末豊, “塗装ハンドブック”, 朝倉書店, pp.214-236, 1996

- [122] 社団法人日本鋼構造協会, “鋼橋塗膜の評価技術 (その 2.塗膜劣化の継時変化モデルと寿命予測の検討)”, JSSC テクニカルレポート, No.45, 1998
- [123] 小崎正光, “インターユニバーシティ 高電圧・絶縁工学”, オーム社, 1997
- [124] 松田哲夫, 藤原博, 佐久間智, “鋼橋塗装の実態調査”, 鋼橋塗装, Vol.18 No.4, pp.27-37, 1990
- [125] 松田哲夫, 藤原博, “鋼橋塗装の実態調査 (第二報) (上)”, 鋼橋塗装, Vol.20 No.1, pp.36-40, 1992
- [126] 松田哲夫, 藤原博, “鋼橋塗装の実態調査 (第二報) (下)”, 鋼橋塗装, Vol.20 No.3, pp.38-45, 1992
- [127] 藤原博, “鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究”, 東京大学 工学系研究科, 東京大学博士論文, 2000
- [128] 細井章浩, 伊藤義人, 金子恵介, 杉浦友樹, “鋼橋塗装の部分劣化対策に関するライフサイクルアナリシス”, 構造工学論文集, Vol.57A, 土木学会, pp.669-680, 2011
- [129] 藤原博, 三宅将, “鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究”, 土木学会, 土木学会論文集 No.696, I -58, pp. 111-123, 2002
- [130] 社団法人日本鋼構造協会, “鋼橋塗膜調査マニュアル JSSIV 03-1993”, 1993
- [131] 社団法人日本鋼構造協会, “鋼橋塗替え塗装の品質向上のために”, JSSC テクニカルレポート No.61, 2004
- [132] 林和弘, 木原昌宏, “外面腐食対応を主体とした配管管理の充実”, アロマティックス, 日本芳香族工業会, 67 (秋季), pp.231-238, 2015 年 11 月
- [133] 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “配管の劣化管理の業務フローと外面腐食検査の優先度設定に適用できる外面腐食速度の予測”, 日本設備管理学会誌, Vol.30 No.4, pp.115-122, 2019 年 2 月
- [134] 林和弘, “設備管理の人材”, 保守検査ミニシンポジウム講演資料, 日本非破壊検査協会, pp37-43, 2015 年 11 月
- [135] 総務省消防庁, “平成 24-28 年版 消防白書”, 2012-2017
- [136] 高圧ガス保安協会, “平成 26-28 年度経済産業省委託 高圧ガス関係事故年報”, 2015-2017
- [137] 高圧ガス保安協会, “高圧ガス関係事故集計 (平成 29 年 1 月末現在)”, 2017
- [138] P.K. Dey, "A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 7 No. 1, pp. 25-43, 2001
- [139] Ming-Kuen Chang, Ren-Rong Chang, Chi-Min Shu and Kung-Nan Lin, “Application of risk based inspection in refinery and processing piping”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 18, Issues 4-6, pp. 397-402, 2005
- [140] Shiaw-Wen Tien , Wen-Tsung Hwang and Chih-Hung Tsai, “Research on Risk-Based Piping Inspection Guideline System in the Petrochemical Industry”, Asian Journal on Quality, Vol. 7 No. 2, pp. 97-124, 2006
- [141] Chi-Hui Chien and Chun-Hung Chen, “Applying statistical methodology to monitor the piping conditions in petroleum process, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 21, Issue 4, pp. 450-460, 2008

- [142] Alex Dawotola, Theodore Trafalis, Zahiraniza Mustaffa, P.H.A.J.M. Gelder and J. Vrijling, “Risk-Based Maintenance of a Cross-Country Petroleum Pipeline System, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, Vol. 4, No. 3, pp. 141-148, 2012
- [143] American Petroleum Institute (API), “Piping Inspection Code 570 2nd Edition”, API 570, 1998
- [144] 石油学会 (JPI) , “配管維持規格 JPI-8S-1-2007”, 石油学会規格, Japan Petroleum Institute, 2007
- [145] 高圧ガス保安協会, 石油連盟, 石油化学工業協会, “高圧ガス設備の供用適正評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準”, KHK/PAJ/JPCA S 0851, 高圧ガス保安協会, 2009/2014
- [146] 腐食防食協会 (JSCE) , “腐食防食ハンドブック”, 丸善, 腐食防食協会 (Japan Society of Corrosion Engineering) , pp.500-501, 2000
- [147] 高圧ガス保安協会, “高圧ガスの配管に関する基準”, KHKS 0801(2004), 2004
- [148] 大島榮次, “実践配管管理の進め方ー観測から評価までー”, 日本プラントメンテナンス協会, 1993
- [149] National Association of Corrosion Engineers (NACE), “Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing Materials-A System Approach”, Standard Practice 0198-2010, Item No. 21084, 2010
- [150] エンジニアリング協会 被覆材下配管腐食診断技術調査委員会, “石油精製業及び石油化学工業における保温材下配管外面腐食 (CUI) に関する維持管理ガイドライン”, エンジニアリング協会, 2012
- [151] 高圧ガス保安協会, “外面腐食対策に関する報告書 平成 1 年”, 高圧ガス保安協会, 1989
- [152] 須永寿夫, “ステンレス鋼の損傷とその防止ー事例を中心としてー”, 日刊工業新聞社, 1977
- [153] 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “18-8 ステンレス製機器の鋭敏化域の被覆ライニングによる溶接法”, 日本設備管理学会誌, Vol.23 No.2, pp.43-49, 2011 年 8 月
- [154] Kazuhiro Hayashi, Shigeyuki Tateno, Hisayoshi Matsuyama, “Optimization of Maintenance Management of Industrial Water Heat Exchangers and Water Treatment”, Journal of Chemical Engineering of Japan (JCEJ), Vol.52 No.1, pp.121-129, 2019
- [155] (株)エスミ, “Excel 数量化理論 Ver2.0”, 1997
- [156] 菅民郎, “初心者がらくらく読める多変量解析の実践下 第 2 版”, 現代数学社, 1993/2004
- [157] 本多正久, “インフォメーション・アナリストのための多変量解析の実際”, 産能大学出版部, 1993
- [158] 松山久義, 武田和宏, 大島榮次, “保温保冷配管の外面腐食による減肉量の予測について”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会, Vol.42 No.10, pp.805-810, 2005
- [159] International Organization for Standardization (ISO ), “Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification 1992, ISO 9223, 1992
- [160] 外川靖人, “大気腐食性の分類システム (試案) – JWTC 金属系分科会報告 –, pp.65-

85, 2000

- [161] 防錆・防食技術総覧編集委員会, “「防錆・防食技術総覧」第1編 基礎編 第3章 環境の腐食性 1節 大気腐食, 第2編 応用編 第4章 化学工業 2. 外面腐食事例とその対策, 産業技術サービスセンター, pp.99-111, pp.706-710, 2000
- [162] 中原正大, 庄子哲雄, “極値解析データを基にした冷却水環境における炭素鋼製熱交換器の寿命予測”, 材料と環境, Vol.43 No.11, pp.624-634, 1994
- [163] 栗原朋之, 三宅隆介, 大島義生, 中原正大, “化学プラントにおける断熱材下の外面腐食の実機検査結果の解析と発生可能性推定方法の検討”, 材料と環境, Vol.59 No.8, pp.291-297, 2010
- [164] 小林英男, 柳田省三, “圧力設備の腐食損傷事例と腐食速度の解析”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会, Vol.35 No.3, pp.203-214, 1998
- [165] 小若正倫, “金属の腐食損傷と防食技術”, アグネ承風社, pp.19-25, pp.77, 1983
- [166] 浜田晋作, “異種金属溶接のかんどころ 第4版”, 産報出版, 溶接シリーズ編集委員会, 1981
- [167] Raghuvir Singh, “Influence of cold rolling on sensitization and intergranular stress corrosion cracking of AISI 304 aged at 500°C”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 206, Issues 1-3, pp. 286-293, 2008
- [168] 明石正恒, “ステンレス鋼便覧—第3版— 4.3 腐食試験法, 4.3.1 粒界腐食, ステンレス協会, 日刊工業新聞社, pp.465-466, 1995
- [169] 梅村文夫, 花井康夫, 川本輝明, “自動鋭敏化度測定装置の開発と応用”, 石川島播磨技報, Vol.22 No.5, 石川島播磨, pp.303-308, 1982
- [170] H.-E. Bühler, L. Gerlach, O. Greven and W. Bleck, “The electrochemical reactivation test (ERT) to detect the susceptibility to intergranular corrosion”, Corrosion Science, Vol. 45, Issue 10, pp. 2325-2336, 2003
- [171] G.H. Aydođdu and M.K. Aydinol, “Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel”, Corrosion Science, Vol. 48, Issue 11, pp. 3565-3583, 2006
- [172] 中村寿和, 山本勝美, 賀川直彦, “海塩粒子を含む大気によるオーステナイトステンレス鋼の外面応力腐食割れ”, 防食技術, Vol.34, pp. 346-354, 1985
- [173] 川本輝明, “オーステナイト系ステンレス鋼の外面応力腐食割れに関する実態調査”, 防食技術, Vol.37, pp. 30-33, 1988
- [174] 梅村文夫, 松倉 伸二, 中村 英之, 川本 輝明, “ステンレス鋼の常温大気中応力腐食割れに関する暴露試験結果と実験室的検討”, 防食技術, Vol.36, pp. 571-577, 1987
- [175] (社)火力原子力発電技術協会, “6003 水冷溶接法に関する指針”, TNS-G2803-1985, 1985
- [176] 林和弘, “巻頭言「保守検査の最前線～現場に適用される新検査技術～」特集号刊行にあたって”, 非破壊検査, 日本非破壊検査協会, pp.1, 2017年10月
- [177] 林和弘, “メンテナンス現場における新検査技術”, pp.15, 日刊工業新聞, 2017年11月28日
- [178] Shibata, T.; “Application of Extreme Value Statistics to Corrosion,” J. Res. Natl. Inst. Stand.

Technol., **99**, 327–336, 1994

- [179] Arai, K. and Ueda, T, “Data Analysis for Stabilizing Product Quality and the Mahalanobis Taguchi (MT) Method”, Yokogawa Technical Report English Edition, **59**, 15–20, 2016
- [180] Cudney, E. A., J. Hong, R. Jugulum, K. Paryani, K. Ragsdell and G. Taguchi; “An Evaluation of Mahalanobis-Taguchi System and Neural Network for Multivariate Pattern Recognition,” Journal of Industrial and Systems Engineering (JISE), **1**, 139–150, 2007
- [181] Cudney, E. A., D. Drain, K. Paryani and N. Sharma; “A Comparison of the Mahalanobis–Taguchi System to A Standard Statistical Method for Defect Detection,” Journal of Industrial and Systems Engineering, **2**, 250–258, 2009
- [182] Jin, X., E. W. M. Ma, L. L. Chen and M. Pecht; “Health Monitoring of Cooling Fans Based on Mahalanobis Distance with mRMR Feature Selection,” IEEE Trans. Instrum. Meas., **61**, 2222–2229, 2012
- [183] Jin, X. and T. W. S. Chow; “Anomaly Detection of Cooling Fan and Fault Classification of Induction Motor Using Mahalanobis–Taguchi System,” Expert Syst. Appl., **40**, 5787–5795, 2013
- [184] Soylemezolu, A., S. Jannathan and C. Sayin; “Mahalanobis–Taguchi System as a Multi-Sensor Based Decision Making Prognostics Tool for Centrifugal Pump Failures,” IEEE Trans. Reliab., **60**, 864–878, 2011
- [185] Flynn, D.; The Nalco Water Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill Companies, Inc., New York, U.S.A., 2009
- [186] 石井康正, “冷却水処理管理での水質分析”, 検査技術, pp.68-73, 2011
- [187] Kurita Water Industries Ltd.; Kurita Handbook of Water Treatment, 2nd English ed., Editorial Committee of the Second English Edition, Kurita Water Industries Ltd., Tokyo, Japan, 1999
- [188] 田中豊, 垂水共之, 脇本和昌, “パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編”, 共立出版(株), 1991
- [189] 田中豊, 橋本淳樹, “PLS 回帰におけるモデル選択”, アカデミア・数理情報編, 南山大学, pp.1-11, 2010
- [190] 化学工学会 (SCEJ) 化学装置材料分科会, “冷却水環境における軟鋼製熱交換器の使用実績データ集”, 化学工学会, 1990
- [191] 和気敏治, 堀池誠, “冷却水系の腐食抑制剤”, 材料と環境, Vol.50, pp.3-7, 2001 年
- [192] Herbert H. Uhlig, RW レヴィー (松島巖, 松田精吾訳), “腐食反応とその制御 第3版”, 産業図書, pp.270-271, 1989
- [193] Kazuhiro Hayashi, Shigeyuki Tateno, Hisayoshi Matsuyama, “A Proposal of the Performance Indices on Maintenance Management Activities”, 60<sup>th</sup> Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE, pp. 428-433, 2021
- [194] Al Weber and Ron Thomas, “KEY PERFORMANCE INDICATORS Measuring and Managing the Maintenance Function”, IVARA CORPORATION, Canada, Nov, 2005
- [195] Terry Wireman, “Developing Performance Indicators for Managing Maintenance Second Edition”, Industrial Press, Inc, New York, Feb, 2005
- [196] Jeff O’Brien, “Advanced CMMS metrics”, Rockwell Automation Company, Canada, Jan, 2015



- [197] Örjan Ljungberg, “Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol 18 No 5, pp. 495-507, 1998
- [198] Martorell S., Sanchez A., Muñoz A., Pitarch J.L., Serradell V. and Roldan J., “The use of maintenance indicators to evaluate the effects of maintenance programs on NPP (Nuclear Power Plants) performance and safety, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 65, Issue 2, pp. 85–94, 1999
- [199] Tsang Albert H.C., Jardine Andrew K.S. and Kolodny Harvey, “Measuring maintenance performance: a holistic approach”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol 19, issue 7, pp. 691-715, 1999.
- [200] Hans L, “Measuring maintenance performance-in search for a maintenance productivity index, *International Journal of Production Economics*, Vol. 63, pp. 47-58, 2000
- [201] Muchiri, P., Pintelon L., Gelders L., Martin H., “Development of Maintenance Function Performance Measurement Framework and Indicators”, *International journal of production economics*, Vol 131, Issue 1, pp. 295-302, 2011
- [202] Uday Kumar, Diego Galar, Aditya Parida, Christer Stenström and Luis Berges, “Maintenance performance metrics: A state-of-the-art review”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol 19 Issue 3, pp. 233-277, 2013
- [203] 日本プラントメンテナンス協会（JIPM）, “「保全水準評価」プログラム”, 日本プラントメンテナンス協会, 2015



## 研究業績

### 1) 学術誌原著論文

- 1 Kazuhiro Hayashi, Shigeyuki Tateno, Hisayoshi Matsuyama, “Optimization of Maintenance Management of Industrial Water Heat Exchangers and Water Treatment”, Journal of Chemical Engineering of Japan (JCEJ), Vol.52 No.1, pp.121-129, 2019
- 2 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “配管の劣化管理の業務フローと外面腐食検査の優先度設定に適用できる外面腐食速度の予測”, 日本設備管理学会誌, Vol.30 No.4, pp.115-122, 2019年2月
- 3 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “集合体基準の劣化管理による塗装の管理手法”, 日本設備管理学会誌, Vol.28 No.3, pp.110-118, 2016年10月
- 4 林和弘, 立野繁之, 松山久義, “18-8 ステンレス製機器の鋭敏化域の被覆ライニングによる溶接法”, 日本設備管理学会誌, Vol.23 No.2, pp.43-49, 2011年8月

### 2) 査読のある国際会議論文

- 1 Kazuhiro Hayashi, Shigeyuki Tateno, Hisayoshi Matsuyama, “A Proposal of the Performance Indices on Maintenance Management Activities”, 60<sup>th</sup> Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, SICE, pp. 428-433, 2021

### 3) 著書（分担執筆）

- 1 林和弘, “第7章 業界別実例 第4節 化学”, pp.817-830, 設備管理技術事典, 設備管理技術事典編集委員会, 産業技術サービスセンター, 2003年

### 4) 査読のない学会発表論文

- 1 林和弘, “長期連続運転における設備管理の最適化”, 保守検査シンポジウム, 日本非破壊検査協会, シンポジウム講演論文集, pp.99-104, 2004年12月
- 2 林和弘, “設備管理・運転管理とソリューション技術”, 化学工学, 化学工学会(SCEJ), Vol.68 No.5, pp.253-256, 2004年5月
- 3 林和弘, “運転管理と一体の寿命予測を基にした設備管理”, INCHEM TOKYO2001 技術会議(化学プラント技術セミナー), 東京有明ビッグサイト, 化学工学会, pp.B5-3 -1-9, 2001年11月

### 5) その他（講演）

- 1 林和弘, “保安安全のための設備管理”, 岡山県産業安全塾, 第6講資料, 2019年9月, 2018年10月, 第3講資料, 2017年8月, 2016年6月
- 2 林和弘, “保安安全のための設備管理”, 三重県産業安全塾, 第8講資料, 2018年8月, 第3講資料, 2017年6月, 2016年6月
- 3 林和弘, “設備管理の人材”, 保守検査ミニシンポジウム講演資料, 日本非破壊検査協会, pp.37-43, 2015年11月
- 4 林和弘, “海外生産シフト拠点における保全経営”, 第54回設備管理全国大会～TPM技

術カンファレンス～A セッション変化に対応する『保全経営』講演資料, 日本プラントメンテナンス協会, 2014年12月

- 5 林和弘, “設備管理の体制における取組み”, 化学プラントにおける設備保全, 化学工学会関東支部, 2014年鹿島コンビナート講習会資料, 2014年11月
- 6 林和弘, “三菱化学(株)における設備管理”, 平成26年度茨城県高圧ガス保安講習会, 茨城県消防安全課産業保安室, 講演資料, 2014年10月
- 7 林和弘, “「設備管理のPDCA」によるレベル向上”, PLANTIA ユーザーの集い2014(第10回記念) in 東京, 日揮情報システム, 講演資料, 2014年10月
- 8 林和弘, “RBMを適用した設備管理”, 第6回ヤングプロフェッショナルのためのセミナー, ISPE日本本部, 講演資料, 2014年6月
- 9 林和弘, “化学工業における設備管理の最適化”, JSNDI九州支部技術サロン, 講演資料, 2013年11月
- 10 林和弘, “プラント設備における保守検査”, 非破壊検査協会シンポジウム, 日本非破壊検査協会, 講演資料, 2013年9月
- 11 林和弘, “化学プラントにおける設備管理の最適化”, 保守検査シンポジウム, 日本非破壊検査協会, 講演資料, 2013年7月
- 12 林和弘, “化学プラントにおける設備管理の最適化”, 化学工学会(SCE・net), 化学工学会, 講演資料, 2013年5月
- 13 林和弘, “石化プラントの維持管理技術”, 土木学会, 講演資料, 2013年4月
- 14 林和弘, “設備管理はどうあるべきか～これからの日本産業の状況をにらみながらの一考察～”, ENE-WAY 2005, 名古屋市中小企業振興会館 吹上ホール, 中部電力, 2005年8月
- 15 林和弘, “プラント工場の運転設備管理技術と今後”, 情報機構セミナー, セミナー資料, 2004年7月
- 16 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術について”, 第11回設備管理研究会, 虎の門パストラル, 高圧ガス保安協会, pp1-7, 2001年2月

#### 6) その他(業界誌)

- 1 林和弘, “メンテナンス現場における新検査技術”, 日刊工業新聞, pp.15, 2017年11月28日
- 2 林和弘, “保守検査の最前線～現場に適用される新検査技術～”, 非破壊検査, pp.1, 2017年10月
- 3 林和弘, 木原昌宏, “外面腐食対応を主体とした配管管理の充実”, アロマティックス, 日本芳香族工業会, 67(秋季), pp.231-238, 2015年11月
- 4 林和弘, “社会インフラと生産設備の安全に役立つ設備診断・保全技術”, 日刊工業新聞, pp.15, 2013年11月29日
- 5 林和弘, “今後の設備管理への取組み”, 日本メンテナンス工業会会報, 日本メンテナンス工業会(JAMSEC), Vol.17 No.2, pp.18-23, 2006年7月
- 6 林和弘, “優れたソリューション技術で2007年問題を解決する”, プラントエンジニア, 日本プラントメンテナンス協会(JIPM), Vol.38 No.2, pp.7-12, 2006年2月

- 7 林和弘, 松下道雄, “外面腐食管理の要点”, 高圧ガス, 高圧ガス保安協会 (KHK), Vol.42 No.10, pp.811-816, 2005 年 10 月
- 8 林和弘, “検査技術としての五感”, 検査技術, Vol.10 No.2, pp.9, 2005 年 2 月
- 9 林和弘, 左近祐之, “プラント工場の運転・設備管理技術”, PHARMSTAGE, 技術情報協会, vol.4 No.11, pp.67-74, 2005 年 2 月
- 10 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術”, 保安月報, 通商産業省環境立地局保安課, 第 420 号, pp12-19, 2000 年 1 月
- 11 林和弘, “長期安定連続運転と検査技術”, 検査技術, Vol.4 No.11, pp20-27, 1999 年 11 月
- 12 宮沢正純, 林和弘, “設備の経年劣化対策への取り組み”, 化学装置, Vol.38 No.12, pp.59-65, 1996 年 12 月

7) その他 (実用新案)

- 1 酒井正明, 中田守, 林和弘, “超音波センサ及び探傷検査装置”, 実用新案, 登録第 3066748 号(U3066748), 1999 年 12 月

