

# 社会・産業基盤を支える 腐食科学・防食工学

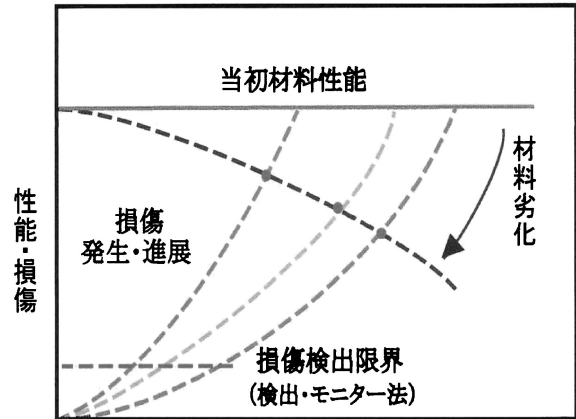
酒井潤一\*

## 1. はじめに

1960年代に始まった日本の高度成長は1990年にはその成長を止め、以来今日まで20年間に亘り GDP(国内総生産)、GNI(国民総所得)は500兆円の規模で推移している。この間、社会・産業資本の新規設置は限られたものであった。人材の観点からみると、高度成長期の技術者は経験を蓄えつつ新たな技術への挑戦を続けてきた。今日、高度成長期に設置された社会・産業資本の多くは当初計画した耐用年数を迎つつある。圧倒的な知識、経験を持つ団塊世代の技術者が定年退職を迎え始めた時期を「2007年問題」と呼び、技術の継続に係わる問題としてその対応が喚起されている。

今や時代は「大量生産・大量消費」から「資源保全・環境負荷低減」、「安心・安全」へと確実に変化しつつある。また、近年、経済成長の低下に伴い多くの産業事故が報告されており、その防止は社会的急務である。さらに、これらの事故の1/3は腐食に起因している。また、機械装置の故障の大多数は腐食、疲労、摩耗に起因するとも報告されている。事故防止という社会的要望に対し「環境材料学」分野からの可能な貢献のひとつは「社会基盤・産業基盤」の「信頼性向上・長寿命化」である。それを保障するためには、「材料の性能の経時変化」予測技術、材料の腐食や損傷の高精度な検査・モニタリング技術、欠陥評価技術、データベースの整備、余寿命予測技術、効率的なメンテナンス技術、およびそれらを有機的に結びつけ判断するエキスパートの知識が不可欠である。すなわち、損傷発生予測、損傷進展予測、破損発生予測が必要になる。その概念図を図1に示す。加えて、事故発生時の社会的損害評価や責任の所在の判断も重要になる。これらを包括した学術分野は「安全工学」、「信頼性工学」などをも含む「総合設備保全システム工学」などとも呼ばれるべきであり、「腐食科学・防食工学」あるいは「環境材料学」を進化させた学術体系として構築されるべき分野であると考えられる。

長い歴史を顧みると、生き残っている「種」は環境の変化



### 経年変化

- ・材料性能劣化度合
- ・損傷進展速度予測  
⇒ 損傷機構説明
- ・最小損傷検出技術
- ・環境変化 (腐食機構の経時変化)

図1 性能劣化と損傷の進展による装置の信頼性低下防止のための要素技術。

に柔軟に対応し、次々と湧き上がる社会的要請に応え、分野を拡充してきている。D. McLean<sup>(1)</sup>は弾性論に関する概念の発展プロセスが、① Concepts, ② Theory, ③ Testing, ④ Design, と推移したと指摘している。一般には、ある得られた法則に限られた対象に適用して理論が構築されてきている<sup>(2)</sup>。工学的材料はその特性を十分に引き出し、適切に機能化して、上手に使ってこそ価値あるものとなる。環境問題、資源保全が重要課題となっている今日、材料技術者に求められているのは材料(およびそれをを用いた機器、装置など)の創生からその寿命の全うに至るまでのLCA: (Life Cycle Assessment; ある製品の創製から廃棄までの間の環境への負荷を総合的に評価する手法)やLCC: (Life Cycle Costing; ある製品の創製から廃棄までの間の金額を総合的に評

\* 早稲田大学教授; 理工学術院(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

Corrosion Science and Engineering for Social and Industrial Infrastructures; Jun'ichi Sakai (Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo)

Keywords; risk based inspection/maintenance(RBI/RBM), Bayes statistics, maintenance technology, asset management

2011年3月16日受理

価する手法)的立場に立った体系化された総合的判断であろう。そのような観点から筆者は、上記の概念の発展プロセスとして、⑤ Performance, そして⑥ Maintenance が加えられるべきものとする。

本稿<sup>†</sup>では「腐食科学・防食工学」およびそれに携わる者がこのような時代の要請に応えるとともに、資源保護、環境保全の重要性にも配慮し、「社会基盤・産業基盤」の安全性、信頼性を高め、寿命の延長を図るべきであることに立脚し、そのための設備診断、モニタリング、Risk Based Inspection (RBI)/Risk Based Maintenance (RBM)の重要性などについて述べる。

## 2. 価値と寿命

社会資本・産業資本は固有の経済的・社会的価値がある。それらの価値は、原価償却、設計寿命、機能低下、社会ニーズ、損傷破壊などの各種の判断基準に基づきその寿命を終えることになる。腐食や環境脆化などの材料と環境の相互作用に基づく材料の機能低下は、適切な工学的アプローチを適用することによりその発現を遅延せしめられ、結果として材料の寿命を延長することが可能となる。すなわち、価値の低減に対し、補修費・保全費を投入することにより、その価値の維持が図れることになる。ここで、価値の低減とその維持のためのコストとのトレードオフが問題となる。よりよく管理された費用投入は材料損傷などの未来発現事象の抑制に関する先行投資といえる。この概念を図2に示す。

また、「システム」も時と共に劣化し、その価値を失っていくことも認識すべきである。

## 3. 腐食コストから RBI/RBM へ

経済活動における腐食コストに関する Uhlig 方式による調査が1974年度以来23年ぶりに1997年度を対象に行われた<sup>(3)</sup>。

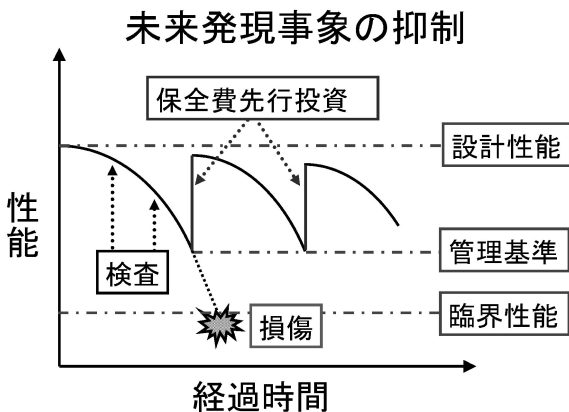


図2 未来発現現象の抑制を意図した保全概念。

<sup>†</sup> 本論文は腐食防食協会岡本剛記念講演(2006)に加筆したものである。

この調査から腐食コスト削減への腐食防食技術の役割のシナリオとして提言されたのは以下の通りである。

①社会基盤技術への展開②資源の有効活用、持続的発展と長寿命化による循環型社会の構築③腐食コスト最小化戦略のための指標設定④知識の啓蒙・教育、資格制度の充実⑤専門家の組織化と知識の活用：現場体験のデータベース化、など。

「材料と環境2003(JSCE)」においてシンポジウム「経年プラントの信頼性維持管理—我々は何をすべきか」が開催された<sup>(4)</sup>。そこでの下記①～④の指摘事項に対する筆者の考えを付記した。

①素材産業の成熟化と空洞化：「いかなる技術・経験」を「誰から誰に」伝承することがもっとも重要であることの明確化②「知」の構築：「どのような情報」を「誰と誰が共有」し、「いかに使いやすく」整理し、「知識化」していくかの仕組みづくり③材料技術と設備管理技術の融合：技術情報の「設計に反映可能な形での表現」(例：ネルソン曲線)および損傷発生確率の定量化と余寿命予測(材料劣化・環境変化と損傷進展予測)④対策：「総合力」による「継続的発展」のための「場」の設置。

ここで各種の技術開発が要請されているが、たとえば寿命評価の考え方についてみると、過去の故障データに基づくものはリスク評価の対象となるが、その評価は確率論的であり、その信頼度をどの程度であると判断するか？母集団の純度をどの程度のものとするかなどの問題がある。RBI/RBMではベイズ統計学(主観的統計学)を用いることによりこれらの点を克服し、信頼性の継続的向上を図っている。

## 4. リスク評価

例えば、化学プラントに特有でかつリスクの主因である損傷現象は、プラント設計時には配慮しきれない(しかし繰り返し発現している)各種腐食現象が圧倒的である。劣化損傷による被害の大きさに加え、さらにその発生確率もあわせて議論するというのがリスクベースの考え方である。リスクの程度を定量的に評価し、リスクが低い損傷を容認した保全の手法を整理・展開させる必要がある。スクラップ&ビルトの時代は終焉を告げ、寿命の延長・分散は廃棄物処分などの別の観点からも重要な課題となっている。

リスクの程度は、

$$\text{リスク} = (\text{リスク損傷発生確率}) \times (\text{被害の大きさ})$$

で定義される。リスク評価に当たってはリスクの程度の信頼性が重要である。(被害の大きさ)は装置の個別設置条件に強く依存する。(リスク損傷発生確率)を支配する個別損傷のメカニズムは共通的な現象として議論することが可能である。損傷発生の遅延を図るには図1に示すような各種要因を把握する必要がある。

各部位の懸念される損傷に対するリスクは図3<sup>(5)</sup>に例示するマトリックスに位置づけられ、リスクが査定されることになる。リスクが許容範囲を越えている機器、部位に対して、リスクが許容範囲に入るようにするための検査・計画が

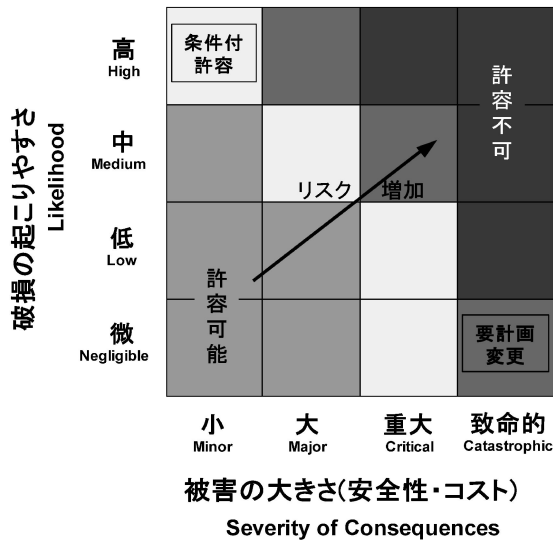


図3 リスクマトリックス。

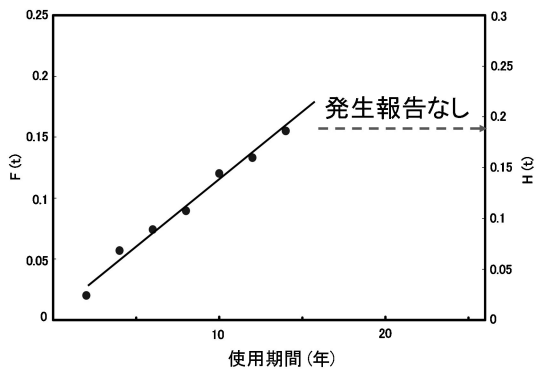


図4 ステンレス鋼製熱交換器のSCC発生の時間依存性。

RBIであり、検査に加えて、補修、改造、更新、などを含めればRBMによるメンテナンス計画となる。RBI/RBMの適用により低リスクの損傷は容認され、保全の効率化、最適コスト化が図られる。結果として、プラント全体のリスクが一定値以下となって、安全で効率的な運転を可能にすることになる<sup>(5)</sup>。また、リスクが始めから許容範囲内であれば、検査の省略が可能となり、コストの削減につながる。

## 5. データベースの確立

リスク評価における損傷発生確率の予測は確率論的になされるが、基となるデータベースの信頼性を高めることがRBI/RBMの汎用化には不可欠である。腐食損傷の発生そのものが確率論的であることが評価を困難にしている。例えば、SCC：(Stress Corrosion Cracking(応力腐食割れ)；ある材料に特定の環境下で引張り応力がかかっていると、き裂が発生、進展する現象)の発生は確率的であり、データベース的に予測することは困難である。しかし、図4に示したステンレス鋼製熱交換器のSCC発生確率の経年変化を見る

と、発生するものは13年以内に発生し、その後は発生事例の報告がない。また、一方で、発生する場合は3年以内に顕在化したとの報告もある<sup>(6)</sup>。いずれも一定期間経過の後にはSCCの発生はない、としている点に興味がある。このことは考えようによっては、SCC発生のための環境条件が満たされることが必要で、条件さえ満たされれば速やかに発生に至ることを意味するのかも知れない。即ち、潜伏期間とは環境条件を満たすために要する期間ということになる。SCC一つをとっても、例えば、潜伏期間の推定、潜伏期間の長さとき裂進展速度の相関、など工学的な信頼性を高めるためにまだまだ明らかにしていかなければならないことが数多く残されている。

## 6. 保全技術

従来の保全技術は、損傷による被害の大きさなどをあまり考慮することなく、全部が破損しないような損傷を容認しない形式で行われてきた。その時、損傷の起きやすさは熟練技術者の勘と経験(K：自己のデータベース)、さらには言い伝え(I：他人のデータベース)と度胸(D：確信度・責任感)(これをKIDと称す)に依存して行われてきた。これらの背景には永年に亘って培われてきた有形・無形のデータベースが存在するのは間違いのない事実である。しかし、この種の事柄は極めて個人的な情報として管理されてきたものと推察される。このことが、技術の伝承、情報のデータベース化・共有化の要請に繋がったものである。今日、保全の概念は「性能規定」「自主規制」「損傷容認」へと変化しつつあり、RBI/RBMが重要になってきている。

## 7. テロテクノロジー(TEROTECHNOLOGY)<sup>(7)</sup>

'70年代に提案されたテロテクノロジーの考え方は極めて先端的で、興味深いものがある。これは背景としての急激な工業化に伴う公害、災害、資源・エネルギー問題、あるいは生産量・品質・コスト・納期問題の抜本的な対策として登場したものである。さらに、テロテクノロジーは設備診断技術・設備稼働状態のモニタリング技術の開発と活用を焦眉の急の重要課題としてあげている。また、資源・エネルギー削減、環境保全、安全衛生・教育訓練などの諸問題も設備管理の新しい課題として取り組んでいる。情報のフィードバックに関しては業態を越えて行うことが提案されている。

これらの内容は今日的課題と酷似している。従って、この技術が日本に根付かなかった背景を明らかにすることが、今後の技術発展にとって有益であると考えられる。

## 8. 近年の産業事故をめぐって

21世紀に入り、産業界における事故の多発傾向が顕著になってきた。経済産業省が100件を対象とした事故解析は概ね前述のシンポジウム<sup>(4)</sup>の指摘と重複する。報告の特記すべ

