

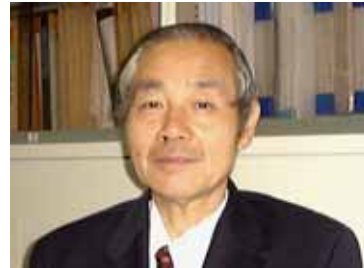
材料の劣化と予知保全技術

横浜国立大学 特任・名誉教授

朝倉 祝治

講師紹介：朝倉祝治

昭和 14 年 12 月 東京都生まれ
昭和 43 年 3 月 東京大学大学院工学系研究科博士課程
修了・工学博士
昭和 43 年 10 月 カリフォルニア大学ロサンゼルス校
博士研究員
昭和 47 年 5 月 横浜国立大学 赴任
昭和 60 年 8 月 モントリオール大学 客員教授
昭和 61 年 3 月 北米科学者協会正会員に推挙
昭和 63 年 4 月 横浜国立大学工学部 教授
平成 17 年 4 月 横浜国立大学 名誉・特任教授



〔専門分野〕

腐食防食工学、反応系の安定性計測、化学センサ、リカレント型工学教育

〔研究業績〕『化学概論』(共著、1982、共立出版)、『新安全工学便覧』
(共著、1999、コロナ社)ほか、著書約 50 冊、原著論文約 200 報、
解説等約 140 報、講演約 800 回

目 次

1	はじめに.....	1
2	保全技術の重要性.....	1
3	保全技術の思想の流れ.....	3
4	設備診断・異常検出技術の分類.....	5
5	将来の展望.....	7
6	おわりに.....	8

1 はじめに

近頃は、ハイテクノロジーのかけ声が処々で盛んである。日本の工業技術も成熟し、現有の技術あるいは現在開発中の技術はきわめて近い将来に完成し、そのあとはハイテクノロジーの夢を追えばよいような錯覚に陥る。日本人は熱しやすく、さめやすい性格を持つといわれる。つい、昨日まで我々は欧米コンプレックスであった。そして、今は極度に思い上がっている。完成した技術はそうやすやすと手に入るものではない。我々は、裏方となって産業をしっかりささえている保全技術に目を向けなければならない。現在、日本で操業されている多くの生産プロセスは、残念ながら、いまだに欧米から導入されたものである。それらは、完成されるまでに、保全技術に対して、莫大な努力が払われてきたことを思い出す必要がある。我が国は、顕在化しにくい保全技術を込にして、これらの生産技術を導入した。技術を完成させるまでに嘗々と積み上げられてきた保全技術に対する認識と評価が十分であるとはいえない。

自らが完成に至る道程を経験していないからである。

筆者は、防食技術を中心として諸外国の保全技術に対する取り組みを調査したことがある。日本の場合とは比較にならない程の努力が払われており、研究組織を例にとっても、けたちがいと質を有することである。しかも、保全技術は決して、裏方としての認識をされていないことおよび保全技術は、皆の共通の問題であるとする立場から広く意見交換がなされていることの2点は特に印象的であった。かつての工業先進国のこのような状況は彼らが生産プロセスを完成させる上で保全技術がどれほど重要位置をしめていたかを実感することができる。

前に述べたように、日本人は多くの技術輸入をしてきたために、保全技術を完成させるための苦しみを経験していない。今、我々が新技術を完成させ、既存技術の完成度を高めて行く過程で、欧米流の地味な保全技術の積み上げを飛び越して、一挙に最新の常の高い保全技術を手にいれようとしている。

ところで秀才は概して、きびしい現実には弱い。実用に耐える保全技術はまさしく、最もきびしい現実に育った野人としての性格を持つ。我が国の保全技術は現在いまだ温室育ちの秀才としての面を多分に含んでいる。野に出て、幾多の風雪にさらされた時にもこれらの技術が十分に耐えうるだけの資質を持つようにきたえておくことが我々の仕事であろう。

このようなトレーニングを得ることなしにはこれらの「保全技術の先端技術」も決して実用化されないであろう。

2 保全技術の重要性

保全技術の経済効果についてはあまり知られていないが、実際には膨大であることを、材料保全技術の一分野である腐食防食技術について調べてみよう。

次に述べるように、その影響は顕在化しにくいだが、実に膨大である。最近の高度技術産業に比較し、けたちがい大きな経済効果を有する。工業は生産のみではなく、全行程を

考えて経済的最適条件を見いださなければならない。高度技術にのみ目を奪われている我が国の現状をみる時、いまだに後進性が残っていることを感じる。見方を変えれば企業にとって大きな利益が潜在していることになる。

まず腐食による損失が国家的にみでどの程度であるかを表1に示す。表中、米国以外は腐食に伴う直接損失を示したものである。直接損失のみで国民総生産の2～3%であり、間接損失を含めると4%をこえる。なお、後者のこの値はこの2倍におよぶとする報告もある。

表1 各国の腐食損失

国名	調査年度	腐食損失の総額	国民総生産に対する腐食損失の割合	現在の技術で削減できる損失の割合
ソ連	1969	67億ドル	2%	-
西独	1969	60億ドル	3%	約25%
フィンランド	1965	0.47～0.62ドル	-	-
スウェーデン	1964	0.58～0.77ドル (塗装費のみ調査)	-	25～35%
英国	1969	32億ドル	3.5%	23%
オーストラリア	1973	5.5億ドル	1.5%	-
日本	1974	92億ドル (2.5兆円)	1.8%	-
米国	1975	700億ドル (間接損失を含む)	4.2% (間接損失を含む)	15%

また、この表はこれらの損失の約4分の1程度が現有の防食技術を用いることで削減できることも示している。すなわち、特に新技術の開発を行なわなくとも従来技術を企業に導入するだけで国民総生産の1%に相当する利益をあげ得ることに注目したい。当然、腐食防止技術の開発研究が進めばこの値は容易に増加するであろう。このように腐食防止の問題は企業にとって大幅な利潤追求ができる、残された部分である。

ここで、腐食による直接損失と間接損失の代表的項目をあげる。前者としては、

- (1) 腐食による装置、部分品等の交換、補修費
- (2) 装置の稼働効率の低下
- (3) 過剰な腐食しる等の過大設計による浪費

また、後者としては、

- (1) 施設、装置などの操業停止により得られるはずであった利益が上がらなくなる
- と
- (2) 腐食部分より製品が流出し逸失することによる損失
- (3) 製品が腐食孔を通して進入してきた異物等によって汚染されること
- (4) 腐食が原因となって事故が発生し、これが第三者に損害を与える場合

などがある。

さて、次に腐食による損失が遍在している様子を示そう。表2には化学工場における装置事故に腐食がしめる割合を示したものである。約半数を腐食がしめていることがわかる。

このように腐食劣化は産業のみならず身近な生活にも音もなく忍びよってくる闇将軍である。欧米諸国では早くから腐食損失の重要性を認識して専門の研究機関や教育機関をおいている。特に米国では前述したように、既存技術の普及が重要であることに着目し、「教育こそ対策のかなめ」との口

表2 化学工場における装置事故に腐食がしめる割合

会社名	損傷事故件数	腐食が原因となった事故の割合	調査者など
BASF社	-	約50%	H.Spahnによる調査
Dupont社	685	55%	CollinsとMonackによる調査
-	1378	45%	C.W.Georgeの統計
A社(日本)	929	55%	西野知良による調査
B社(日本)	685	49%	同上

ーガンをもとに資格認定制度まで設けている。我が国の意識の低さとは対照的である。

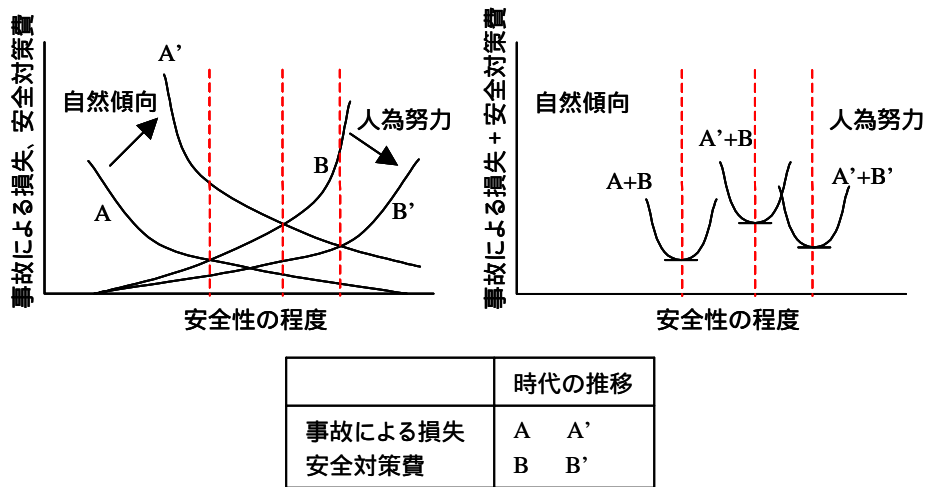


図1 生産に伴う損失の推移と保全技術の重要性

次に、保全技術の進歩が大変重要であることを少し一般的に考察してみよう。図1には、よく知られた事故による損失(A)および安全対策費(B)が安全対策によってどう変化していくかを示している。AとBの和が生産に伴って生ずる全損失である。この和は、よく知られている通り、なべ底曲線となり、極小値の部分に相当する安全対策の程度で実際には操業が行われている。ところで、近年の社会情勢から、人命尊重、地球環境の保全が強く主張されるようになり、事故により生ずる経済的損失は、年をおって増加していく傾向にある。すなわちAからA'へと自然の傾向として変化していくのである。もし、保全技術が現在のままであれば、全損失はA'+Bとなり、その極小値はおおいに増加する。この図からわかる通り、このような社会情勢は操業の安全の程度の増加をもたらすものの、全損失は飛躍的に増大するわけである。AからA'への変化は、自然の傾向であるから変えるわけには行かない。唯一、損失の増加を抑制するのは安全対策費を低減化させることである。すなわち、BからB'へ変化させるわけである。これは保全技術の進歩に相当するものであり、人為的努力がぜひとも必要なのである。A'+B'の和を調べると図から明らかなように、全損失の低減化がはかれると同時に安全の程度が改善されるのである。

このように、保全技術の発展と普及は、その経済効果の大きさとともに今後の社会動向とも関連して必要不可欠なのである。

3 保全技術の思想の流れ

1950年以前の保全技術は事後保全(break-down maintenance)の考え方が中心であった。事故や故障が起こってから行う保全である。失敗に失敗を重ね、経験から少しずつ保全技術の向上をはかっていた時期である。この手法は人間の健康管理になぞらえれば対処療法に対応する。

1950年以後になると予防保全(preventive maintenance)の考え方が行われるようにな

った。これは、事故や故障は必ず起こることを前提として、あらゆる手段を講じて、それらを事前に防止しようとする行き方である。これは、思想としては望ましいが、実際に行うとなると、営繕費や対策費が膨大となり、必ずしも広く用いられることにはならなかった。これを前記のような健康管理にたとえれば、予防医療に相当する。

1958年頃、G.E.社は事後保全と予防保全の両方を折り混ぜたような生産保全(productive maintenance)を提案した。これは生産プロセスの経済性が最も高くなるように両者を混ぜて用いるというものであった。

1960年初頭になると改良保全(corrective maintenance)が言われ出した。ここに至って、はじめて、設備あるいはプロセス設計の時点で、保全技術を取り入れることが行われたのである。すなわち、保全経費が最小になるような設計が行われ出したのである。

1963年以後は、従来の保全方法を統合化しようとする考えが普及してきた。これが予知保全(predictive maintenance)あるいは保全予防(maintenance prevention)とよばれるものである。すなわち、設備の設計、運転、廃却にわたって、総合的に経済性を評価して行うとするものである。

ここに示した保全方法をながめると、事故や故障を全無にしようとする立場とそれに伴う経済的な損失をきらう立場が常に拮抗し、実際の対策は両者の間を揺れ動いていることがわかる。具体的に言うならば、事後保全は故障や破壊が起こってからへの対応であるから、経済的にも社会的にも損害が大きい。予防保全は、網羅的な対応をしなければならないので、莫大な経費が必要となる。生産保全は上記の両者の妥協点を見いだそうとするものであり、改良保全は保全技術が介入する場を広くしたにすぎない。予知保全はさらに寿命の考え方を取り入れはしたが、やはり前記した2つの立場のジレンマから脱却するものではない。

これらの保全方法の最大の問題点は、保全技術の殆どが過去の経験とそれに基づく予想によってプログラムされており、現在の事態に対して盲目的なことにある。事故や故障は装置の運転状況あるいはその歴史によって起こるものであり、しかも確率的である。

従って、完全に事故や故障を未然に防止するためには、予想されるすべての事態について網羅的な対策を講じておかなければならない。

ひるがえって、人間の機能を考えてみよう。体内あるいは体外に生命を維持するのに好ましくない現象、すなわち、故障や破壊に相当する現象が発生したとしよう。人間はこのような現象すべてに対して常に完全な保護体制を整えてはいない。それは、膨大にすぎて、不可能である。しかし、人間は常に自己診断の機能をそなえており、ひとたび好ましくない事態に遭遇すれば、直ちにそれを検知し、体内あるいは頭脳に蓄えてある情報に基づいて、対応が始まる。

つまり人間は網羅的でなく必要なことを必要なだけ選択的に行い、生命を維持している。言い換えれば、高度に情報化された対応をしていることがわかる。この点が、従来行われてきた保全方法と人間の生命維持方法との差異であろう。

それでは、人間はこのような生命維持方法を保全技術に持ちこむことはできないであろうか。

筆者はこのような新しい保全方法を情報保全 (informative maintenance) または知的保全 (intelligent maintenance) と呼びたい。

設備診断技術あるいは異常検出技術は、まさに、このような新しい保全方法の具体的な現れであると思われる。

情報保全の方法によれば、設備やプロセスを、過去の経験や予想によってのみ保全するのではなく、個々の場合について臨機応変な保全が行えることになる。すなわち、必要な場合に必要だけの保全を行い、不必要な保全に費用を投じることがないことをくりかえしてのべておきたい。従来の保全方法では危険の可能性のために殆どの費用が費やされており、実際に起こりつつある故障や事故の防止に用いられる費用は、そのうちのごくわずかの部分にすぎないことを想いおこしていただきたい。

設備診断や異常検出技術を駆使した情報保全がおこなわれるようになれば、危険の可能性のために投じていた大部分の経費を削減し、しかも極めて高い安全性を保ち得るのである。

4 設備診断・異常検出技術の分類

今後の技術動向として情報保全を中心とした技術が発展することはまちがいないが、それらを適正に用いる方法として、あるいは新しい技術を作り出す指針として、現在用いられている設備診断技術あるいは異常検出技術を分類し、系統的に整理しておくことは有用である。第一の分類は時間の連続性について行える。すなわち、チェックが連続的であるか断続的であるかによって分類できる。前者は、モニタリング技術と呼ばれるものに含まれる。後者は検査技術と考えることができる。前者は装置を稼働状態で常に監視を続ける方法であるが、後者は一定期間ごとに装置をとめて欠陥等を見いだす方法である。異常検出技術は主に前者を意味し、設備診断は後者に属するといえるだろう。又、オンストリームモニタリング (On Stream Monitoring) とオフストリームモニタリング (Off Stream Monitoring) も類似の分類と考えられる。もちろん、オンストリームモニタリングが前者に、オフストリームモニタリングが後者に対応する。

表3にここでのべた考え方によって分類した設備診断・異常検出技術を示した。

今一つの分類法は計測法自体の動作原理に基づくものである。図2にそれを示した。

表3 時間的連続性による手法の分類

分類	一般的に用いられる技術呼称	具体的な方法例
時間的に連続的	モニタリング 異常検出技術 オンストリームモニタリング	アコースティックエミッションによる破壊予知 赤外線サーモグラフィ 水素プローブ 電気化学的腐食計測 劣化環境測定 電気抵抗プローブによる腐食計測
時間的に断続的	検査技術 設備診断技術 オフストリームモニタリング	超音波厚み計測 渦電流による欠陥測定 目視検査 磁粉探傷法 X線による検査 色素浸透法による細孔検知 腐食クーポンによる劣化評価 放射線による欠陥検査

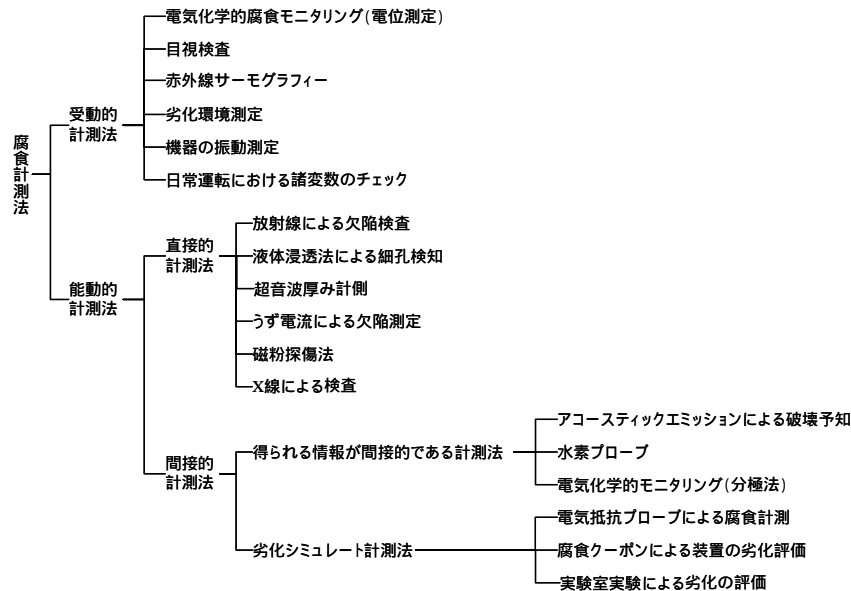


図2 計測法の動作原理に基づく分類

まず、設備診断技術・異常検出技術は計測系が測定対象に対して積極的に働きかけるか否かによって分類できる。受動計測法は積極的に働きかけない計測法であり、装置の稼働状況を傍観する立場に立つ。

いいかえると、外部から計測のための刺激を特に与えないで、稼働状態にある装置から自発的に放出される情報を捕収して、それらから設備を診断し、異常を見いだそうとするものである。人間の健康状態を知るのに体温、血圧、のような自発的に放出されている情報を解析するだけでかなりの様子がわかるように、日常見過ごされているこれらの情報を見直すことは今後重要な課題とすべきであろう。赤子が自分の体の調子をなき声でうたえるように、装置が発するうめきをもう一度耳をすませてきくべきである。特に近ごろはコンピュータの発達によってこのよううめき方を解読することが容易になりつつある。一見消極的であるが、解読のソフトウェアが発達すれば、現在の予想をはるかにこえた発

展が期待できるであろう。

さて、一方、能動的計測法は計測系が設備や装置に積極的に働きかけ、意図的に情報を取得する方法である。少し具体的に言えば、何らかの刺激を装置に与えて、その応答を読みとったり、人為的に劣化の評価を得るための操作を行う方法である。

この方法はさらに直接的計測法と間接的計測法に分けられる。前者は直接に設備の欠陥や異常を検知する方法である。すなわち、故障や事故をおこす要因そのものを測る方法である。

一方、間接的計測法は故障や事故をおこす要因そのものを直接測るのではなく、それに関連する変数を測ったり、あるいはシミュレーションによってそれを評価しようとするものである。図2に示したように、間接的に得られる情報を用いれば、比較的容易に異常を連続的に計測でき、きわめて魅力的である。しかし、得られた測定値と故障や事故の要因となる直接量を結びつけることはなかなかむずかしい。この方面の研究者が当初に課題の期待をいってアプローチし、研究のむずかしさを知って失望することをよく見聞きする。たゆまない努力の蓄積が必要である。劣化のシミュレーションによる計測法は、直接計測対象を測るのではなく、装置の稼働状態に類似した状況を作り出し、それから装置の劣化状態を推定し、設備の安全性や異常を評価する方法である。実装置とシミュレータの相似性が必ずしもよくないことが多い。これもやはり相似性の研究に対する地味な経験の積み上げが必要であろう。

なお、本書でとりあげた例は筆者の専門の上から、腐食を中心とする劣化の診断や検出に片寄っていることをおゆるし願いたい。

5 将来の展望

前項でのべた分類は新しい診断・検出技術をあみ出す上での手がかりになるであろう。少数の専門化された技術にたよるのでなく、なるべくニーズにあった手法を広い範囲から取り入れるべきであろう。又、本分類に対する批判から、全く新しい思想の技術が芽生えることも期待したい。ここでのべた分類は現在用いられている技術を整理したものにすぎないのである。

さて、ここで、上にのべた心情にのって、設備診断と異常検出技術の将来について、二、三の私見を述べさせていただきたい。

まず気がつくことは、これらの技術は測定対象からどのような信号を検出すべきかということとその信号を検出するにはどのようなセンサが最適かということの二つにわけて考えることができることである。急がば回れ(Walk don't run)のことわざがあるように、診断の対象となる事象の研究がまず大切といわねばならない。従来、成果をあせるあまりこの点の研究が少なかったような気がする。すでにセンサは目的に応じてデザインして用いられる段階にきているといえる。診断・検出をシステムとしてとらえる生き方をとるようすべきである。診断の対象となる事象の研究が進めば、想像外の欲張ったニーズに答え

られるものである。

次に、診断・検出技術のインテリジェント化があげられる。これは従来の手法で得られた情報の解析精度をあげるようなものだけではなく、複数の情報を取り入れて、より多数のしかも信頼性の高い結果を得るようにすべきである。前述した診断対象事象の基礎研究と組み合わせ、より高度な解析のソフトウェアが作られるべきであろう。

第三には、連続した計測システムがもっと普及すべきであると考えられる。一般に、装置や設備の劣化はいろいろな歴史をたどる。そのために一様な評価がむずかしいものである。そこで、装置や設備の劣化の様子あるいは稼動状態を連続的に監視しておき、逐次コンピュータで解析を行っておくことは無駄な検査や修理をはぶき、故障や事故を未然に防止するために大いに有用であろう。

6 おわりに

他の多くの分野と同じように、設備診断や異常検出技術の分野でも、コンピュータの導入はデータの解析の速度や処理量を飛躍的に増加させた。しかし、はたして、質的な進歩をもたらしているであろうか。未だに、熟練技術者の勘による診断や異常の発見には遠くおよばないものがある。最近は一エキスパートシステムのようにこのあたりの経験をたくみにとりこむ方法も開拓されつつある。しかし、人間の直感的な診断は永遠に到達不可能な面を内包するであろう。もちろん、工学的手法による診断の方がずっとすぐれている面も出てくるであろう。この時、熟練技術者はこれらを利用してさらにうでをみがかなければならない。このように考えると、我々は次のステップをこれからも循環してくりかえし、らせん階段のように技術レベルを高めてゆくのが不可欠であろう。どのステップもゆるがせにできないのである。

- (1) 設備や装置の稼動状況や劣化の様子を熟知した技術者の継続的養成と確保
- (2) 彼らの知識と感のうち機械やコンピュータで置き換えられるもののシステム化
- (3) 熟練技術者が設備診断や異常検出技術を活用して安全稼動の程度を高める
- (4) 設備診断や異常検出技術の汎用化と普及
- (5) 上項(2)、(3)、(4)の成果は常に熟練技術者にフィードバックされ、さらに人間の能力を機械・コンピュータシステムにおきかえて行く。

「材料の劣化と予知保全技術」
著者：朝倉 祝治