

分析論文 

## 保全学の構築に向けて(4) - 「保全工学」構築のアプローチ -

日本原子力発電株式会社・青木 孝行

Takayuki AOKI

慶應義塾大学・宮 健三

Kenzo MIYA

普遍学国際研究所・高瀬健太郎

Kentaro TAKASE

関西電力株式会社・千種 直樹

Naoki CHIGUSA

## 1. はじめに

保全は、機械、電気、制御などの機器から成る、いわゆる「機械系」とそれを保全する「人間系」から構成されている。これまでの保全はこの2つの要素が渾然一体となって取り扱われ、両者を明確に分離して分析評価する手法が十分には取られて来なかった。これには社会的状況や規制などの影響もあったと考えられるが、いずれにしても保全の体系化や保全学の構築など、学術的アプローチを積極的に進めようとする気運が希薄であった。しかしながら、近年、保全を学術として捉え、それを体系化することによって、合理的効率的に保全の最適解が得られるようにすべきとの考えから、保全学を構築しようとの積極的な活動が行われつつある<sup>[1]</sup>。このような保全の体系化活動の中で今後は両者を明確に分離し、分析的解析的手法を用いて論を進め、保全の体系化あるいは保全学の構築を目指して行くことが強く期待される。

これまで本稿では、「保全学の構築に向けて」と題して、保全と保全学の構造、保全理論、実務から見た保全学のテーマについて論じてきた<sup>[2],[3],[4]</sup>。今回は、既に高度に体系化されている自然科学および基礎工学を活用して論じることのできる「機械系」の世界に注目し、これを合理的に取り扱うことができる学術、すなわち「保全工学<sup>[5]</sup>」の構築を目指した具体的なアプローチについて論じる。保全あるいは保全工学の特徴の1つとして、経年劣化というリアルタイムの事象、すなわち「実時間」の進展に伴って変化する事象を取り扱うことがあげられる。今回は、この視点から保全工学の一部を構成すると考えられる「検査システム工学」のイメージと概要について論じることとした。

## 2. 経年劣化と機器の機能

どのような機器も使用時間の経過とともに多かれ少なかれ経年劣化が進展する。その経年劣化は急激に進展するのではなく、緩慢に進展するのが通常である。しかも多くの場合、設計寿命内であれば、経年劣化の蓄積が顕在化するのとは極めて稀である。しかし、稀ではあっても応力腐食割れなどのき裂は発生しており、今後も発生の可能性を否定できない。

それでは、このような経年劣化をどのように取り扱えば良いのであろうか。通常は下記の2つの方法によって対処される。

## ①経年劣化を発生しにくくする。

経年劣化の主要因子である材料、応力、環境の3因子について経年劣化の進展する条件を緩和する。具体的には、材料の改良、応力の低減、使用環境の緩和であり、これらの組合せである。

## ②経年劣化の発生進展を監視し、その状況に応じて必要な措置、たとえば、補修、取替などを実施する。

しかし、上記①の方法をとっても、経年劣化の発生を完全に防止あるいは劣化自体を否定することが困難な場合があり、その場合にも上記②の考え方を取ることになる。

たとえば、図-1に示すように、応力腐食割れのようなき裂が機器の使用開始とともに図中のA→B→C→Dに沿って徐々に発生・進展し、これに伴い当該機器の機能(例えば、安全機能、耐圧機能、漏洩防止機能など)がA'→B'→C'→D'に沿って低下する例を考える。まず経年劣化の無い初期状態であるA点から始まり、経年劣化が緩慢に進んでB点に達し、それまで検知できなかったき裂がここで検知できるようになる。この点は何らかの検査手法でき裂が検出できる大きさになった時点、すなわち、き裂が「顕在化」した時点を示している。その後さらにき裂が進展し、D

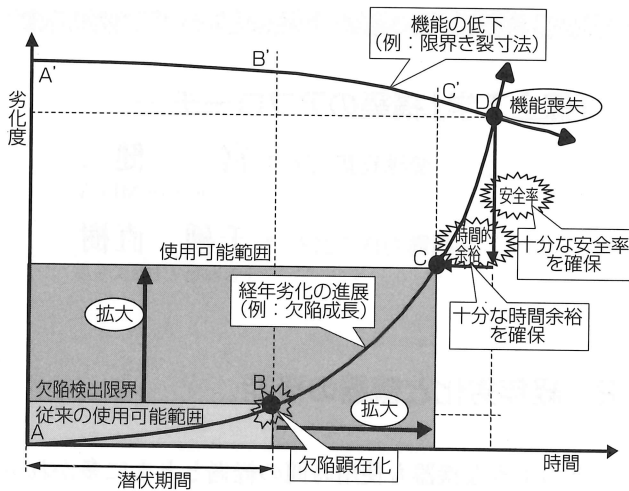


図-1 経年劣化の発生進展過程と使用可能範囲

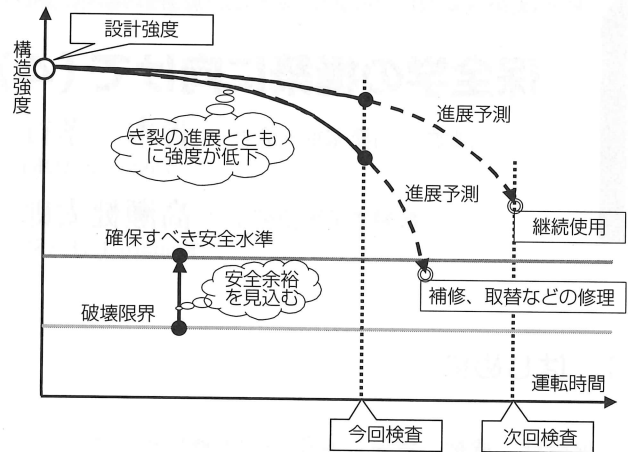


図-2 経年劣化に対して確保すべき安全水準

点に達すると、当該機器は機能を喪失する。ここで、保全を考える上で極めて重要なことは当該機器の機能が維持されていれば、それを前提に、経年劣化の進展を一定の範囲で許容するという考え方を取ることである。この世の人工構造物は多かれ少なかれ経年劣化するので、この考え方を取らない限り機器を利用できないことになるのである。ただし、経年劣化を許容すると言っても、程度問題であり、自ずと限界がある。保全工学はその限界を規定する重要な役割を担っている。

経年劣化が進展しても、なぜ機能を維持できるのか。それは、通常、産業界で使用されている機器は十分な余裕を持たせて設計製作されているためである。言い換えると、通常の機器は元々設計時点で設定された安全水準に対し十分な機能、あるいは機能上の十分な余裕を有しているのである。(図-2) 従って、経年劣化が多少進展しても技術的に特段の問題は無い。要するに、安全機能や耐圧機能などの機能を喪失することがないように十分な安全余裕(安全率と時間的余裕)を確保して如何に機器を管理するかが重要な問題なのである。このような管理を可能にするのも保全工学である。

このように考えると、機器の使用可能範囲は、図-1に示すように、「き裂などの欠陥が顕在化した時点まで」としていた従来の使用可能範囲をかなり拡大できる。そして、これは技術的に合理性を有していると考えられる。

以上のように、経年劣化の発生進展およびそれに伴う機器の機能低下を予測し、その結果に基づき、下記の保全活動を技術的、工学的に最適化する合理的な手法を提供することが保全工学の中核的役割であると考えられる。

- ①点検・検査(手法の種類、手順要領、実施時期など)
- ②評価(経年劣化の発生進展、構造強度評価、安全機能評価など)
- ③補修等の対応措置(適用工法、手順要領、劣化回復の程度評価、工期など)

### 3. 経年劣化する機器の機能維持

前項で述べたように、経年劣化と機器の機能には特定の関係がある。従って、これを前提に保全あるいは保全工学について検討を進めていく必要がある。

#### 3-1) 経年劣化の予測

まず一つの仮定を置く。すなわち、現状の技術では難しいが、経年劣化の進展を完璧に予測できたとする。経年劣化が何処でどのように進展し、それがいつ顕在化(発生)するか、さらにその後どのような速度でどのように進展するか。また、この経年劣化の発生・進展が機器の機能をどのように低下させるか、正確に予測できたとする。このような場合には、機器の機能が許容できないレベルまで低下すると予測される

直前に何らかの対策を講じればよい。この間、定期的な点検・検査や評価、取替などの保全活動を全く実施する必要がない。このようにできれば、これが最も効率的であり、何もしない事が最も合理的でもある。

しかしながら、このように経年劣化を正確に予測することは現実的には困難である。経年劣化予測技術が十分ではないからである。<sup>注1)</sup>そこで、経年劣化予測技術を補完するため下記のような措置を講じる。これが保全工学としての1つの工夫であり、最適化とも言える。

- ①予測技術に保守性を持たせる。ただし、不必要に過度な保守性を与えることはしない。
- ②ある頻度で点検・検査を行い、予測技術の精度を確認する。必要に応じ予測技術の修正を行う。
- ③十分な安全余裕を確保して対応措置のタイミングを決める。機器の破壊や機能喪失などの許容できない状態に対し、十分な安全余裕を確保して点検や補修等の対応措置を行う。

経年劣化予測技術は、今後とも精度向上に向けた不断の努力が必要であり、少しでも完璧な予測技術に近づけていく必要があるが、その一方で予測技術が十分でない部分がある場合は前述の補完措置を有効に活用することができるのである。

### 3-2) 経年劣化予測と保全活動との関係

前項で述べたように、保全を考えると、まず初めに考えることが経年劣化の進展を予測する事であり、この事が保全を考えるうえで全ての基盤になる。

ここで仮に経年劣化の予測ができるようになったとする。しかし、次の問題はこの予測が可能になったことを保全または保全活動にどのように活用するかである。この問題を考える前に、まず保全活動とはどのような活動か考えてみる。

通常、保全とは、次に示す活動を行うことである。

(図-3)

- ①保全対象を選定する。
- ②経年劣化予測技術を活用して経年劣化の進展を予測する。
- ③その結果に基づき、適切な時期に適切な方法で劣化の予測される部位を点検・検査する。

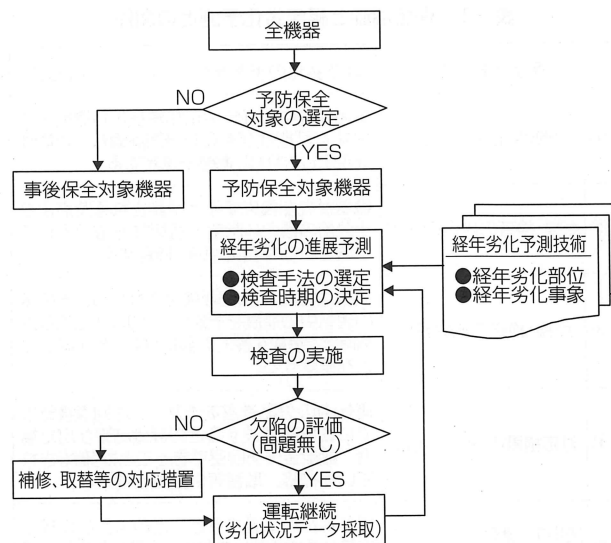


図-3 保全活動の流れ

- ④その点検・検査の結果を評価する。
- ⑤その評価結果に基づき、どう対応するかその対応措置(継続監視、補修、取替など)を決定、実施する。
- ⑥対応措置後の運転中に経年劣化の状況を評価するのに必要なデータを採取する。

この保全活動で特筆すべきは、表-1に示すように、これらのいずれの活動を取ってみても全て経年劣化の予測がそのベースになることである。保全活動において経年劣化の予測は極めて重要であり、その基盤となっていることが分かる。

この経年劣化の予測とは具体的にどのようなことであろうか。経年劣化の予測とは、下記を行うことである。

- a) 経年劣化モードが何か(たとえばSCCなのか疲労なのか)を特定する。
- b) それが運転時間の経過とともに進行して発生(顕在化)する時期を予測する。
- c) その顕在化時期における欠陥サイズ(初期欠陥)を設定する。
- d) それがどのような速度で進展するかを予測する。
- e) その進展の結果として当該機器がいつ機能喪失するかを予測する。

これらの事項を確実に実施できるようになれば経年

注1: 経年劣化は自然科学的因子だけでなく、社会経済の状況や人為的操作などの予め予測できない多くの因子にも影響されると考えられる。しかしながら、ここでは、経年劣化の予測に直接強く影響を与える「経年劣化予測技術」に着目して述べることにした。

表-1 保全活動と経年劣化予測との関係

	保全活動の内容	経年劣化の予測をベースとしている理由
①	予防保全対象の選定	供用期間中に経年劣化が顕在化し機能を喪失する可能性があるか予測評価し、可能性を否定しきれない機器を選定する。
②	点検・検査の内容の決定	機器が機能喪失すると予測される時点より十分前の適切な時期に適切な方法で劣化の予測される部位を点検・検査する。
③	点検・検査の結果評価	点検・検査して欠陥が検出されたら、その後の運転中の進展を予測し、少なくとも次回点検時まで機能を喪失するようなことがないことを確認する。
④	対応措置の決定・実施	運転中の欠陥進展を予測し、次回点検時まで機能を喪失するとの評価結果が出た場合、機能喪失を回避できることが確認されている補修、取替等の措置を講じる。
⑤	使用中/運転中のデータ採取	経年劣化が進展すると、どのような症状が出るか予め予測しておき、採取した機器の運転データと比較して健全性を確認する。

劣化を予測できるようになったと言える。しかし、このような予測技術が確立されても、経年劣化モードをどのように特定するか、実際にどのようなサイズの欠陥がどこにあるか、などを確認する行為は予測技術に劣らず重要である。

ところで、表-1に示す①～⑤の保全活動のうち、②③④はそれぞれ「検査」「評価」「対応措置（補修）」に対応している。この「検査」「評価」「対応措置（補修）」という3つの保全活動は、点検・検査し、その結果を評価する、さらにその評価結果に基づき対応措置（補修等）を決定・実施するという、時間軸に沿った保全活動の流れを形成しており、一般的な保全活動の構成要素<sup>注2)</sup>でもある。(図-4) これらの各事項に対し、空間軸に沿った展開を考える。たとえば、検査の「要素」「要素間の関係」「その関係から創出される意味、基準」である。これらの項目は「時間」と「空間」の3X3マトリックスを構成している。この3X3マトリックスは、この世の創造物の完結性、すなわち「時間」と「空間」の完結性を体系的に検討し考察するとき、極めて有用なツールであるが、保全の構造、体系、内容などの全貌を正確に知る上でも極めて有用であり、検討を容易なものにしてくれる<sup>[7]</sup>。

そこで、本問題を3X3マトリックスにまとめてみ

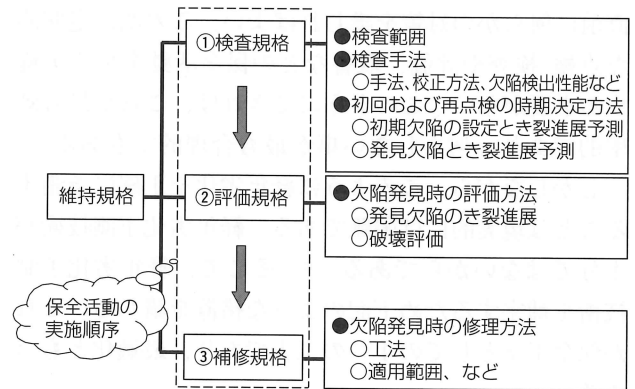


図-4 維持規格の構成内容

表-2 保全活動の3X3マトリックス

		時間軸→		
		検査	評価	対応措置(補修等)
空間軸↓ 関係	要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>●対象機器 (材料、構造、寸法)</li> <li>●経年劣化事象 (発生部位、モード、劣化程度、進展予測)</li> <li>●検査手法(能力) (種類、欠陥検出性、位置同定、サインング)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●対象機器 同左</li> <li>●経年劣化事象 同左</li> <li>●使用条件(負荷) (荷重、環境)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●対象機器 同左</li> <li>●経年劣化事象 同左</li> <li>●適用工法 (施工可能箇所、工法の基本支配因子と施工条件、修復の程度)</li> </ul>
	関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化進展と機器の機能低下の関係 (機能とは安全機能、構造強度、漏洩率など)</li> <li>●機器の機能と経年劣化の検出性能との関係 (欠陥検出性、サインングなどに対する最低必要能力)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化進展と機器の機能低下の関係 同左</li> <li>●経年劣化進展と材料/応力/環境の関係 (例: <math>da/dt \propto C \cdot K^n</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化進展と機器の機能低下の関係 同左</li> <li>●適用工法と修復の程度の関係</li> </ul>
	意味抽象(基準)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●上記の関係(理論)に基づき「検査」を規格基準化 (例: 日本電気協会「電気技術規程 JEAG4207」)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●上記の関係(理論)に基づき「評価」を規格基準化 (例: 日本機械学会「維持規格」)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●上記の関係(理論)に基づき「対応措置」を規格基準化 (例: 日本機械学会「維持規格」)</li> </ul>
		将来、検査システム工学として確立?	破壊力学/欠陥評価工学などの学術に集約?	将来、対応措置工学などの学術として確立?

ると、表-2のようになる。この表中で、時間軸の「検査」と空間軸の「関係」の交点に注目する。ここは検査を構成する各要素間の関係を表わす部分であり、保全工学の一部を構成する「検査システム工学」に相当する部分であると考えられる。ここでは、試みにこの部位に着目し、検査に関する各要素間の関係や

注2: 「検査」「評価」「対応措置(補修)」という3つの保全活動は、たとえば、日本機械学会の維持規格<sup>[6]</sup>の構成要素となっている。この維持規格は、原子力発電所の供用期間中に発見されるSCCや疲労などの欠陥に対する取扱い基準であり、既に多くの人が納得するような技術的合理性を有する標準的ルールとなっている。

それを踏まえて得られる理論などについて以下に検討してみたい。

## 4. 検査システム工学の構造および内容

### 4-1) 検査を実施することの意味

#### (1) 機器の健全性確認と経年劣化予測技術の妥当性確認

検査を実施する目的は何であろうか。前述したように、経年劣化の進展を完全に正確に予測できれば、機器の機能が許容できないレベルまで低下すると予測される直前に何らかの対策を講じればよいので、この間、点検・検査を含む一切の保全活動を全く実施する必要がない。しかし、現実には経年劣化の進展予測手法が完璧ではないので、このようなことは不可能である。

では、何のために検査を実施するのか。それは下記に示すように、2点ある。

- ①検査時点での機器の健全性を確認すること。
- ②経年劣化の予測手法の精度、妥当性を確認すること。

ここで、第一の点が重要であることは言うまでも無いが、第二の点も極めて重要であり、欠くことのできない検査目的の1つである。なぜなら、その時点の検査結果(実測結果)が経年劣化(たとえばSCCき裂)の進展予測結果と一致するか否かを判定できる、すなわち進展予測技術の予測精度を評価できるからである。経年劣化の進展予測は、その後の保全の内容と時期を決定するという重大な技術的役割を担っている。

(図-5)

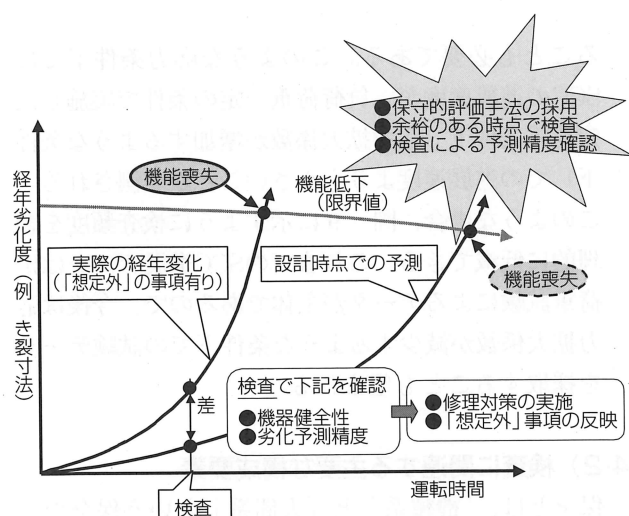


図-5 経年劣化と検査の意味

もし経年劣化の進展予測が実測値に対し過小評価あるいは過大評価となっているようなことがあれば、速やかにその進展予測技術を適切に修正する必要がある。この修正の内容には2種類がある。すなわち、

- ①経年劣化の実測値が定量的に予測値と異なるが、予測中の係数あるいは定数を修正すれば、問題が解消されるケース
- ②経年劣化の種類、経年劣化モードあるいは経年劣化メカニズムの想定が間違っており、経年変化技術を根本から見直す必要があるケース

がある。ここで分かるように、経年劣化の進展予測技術は、その基盤とする経年劣化メカニズムの想定と予測の定量性という2つ重要な事項を内包している。なお、上記②の場合であっても、予測値の保守性が確保されていると言えれば、暫定的にその予測技術を使用できることは言うまでもない。

#### (2) 経年劣化の進展予測と検査の関係

SCCや疲労などの進展予測手法は、破壊力学を活用した手法が確立されている。(図-6) この手法を使って検査の内容と時期を決定することは合理的であると考えられるが、経年劣化の進展予測精度や進展速度の大きさによっては、検査を高頻度を実施せざるを得なかったりする場合があり、注意を要する。以下にこれらについて述べる。

##### ①検査精度と検査頻度

経年劣化の進展速度が大きいと、機器の機能喪失までの余裕が少ないので、検査頻度を上げざるを得ない場合がある。(図-7) このため、その進展速度が本当に大きいのか、あるいは検査結果に多くの誤差等が含まれていて見かけ上、進展速度が大きくなっているのか正確に把握することが重要となる。もし実際に進展速度が大きい場合は、より高頻度の検査が必要となる。逆に、検査精度が十分でないために見かけ上進展速度が大きくなっているような場合は、検査精度を上げ、より正確に進展速度を把握できれば、無用な検査や取替を避けることができることになる。

##### ②予測精度と検査頻度

経年劣化試験の条件が精密に制御されていなかったり、測定精度が十分でなかったりすると、試験データのばらつきが大きくなる。この場合、評価に保守性を持たせるため、データを包絡する厳しい経

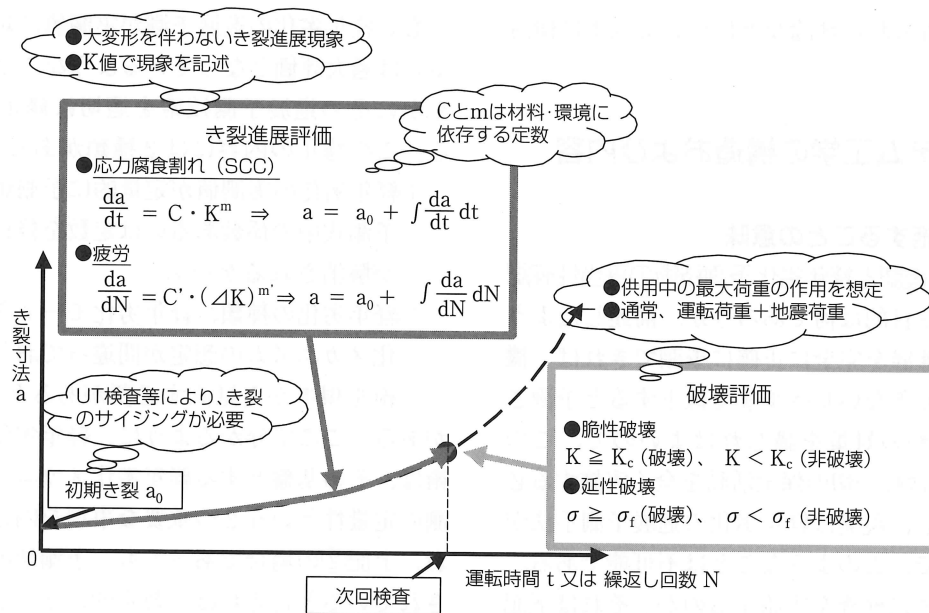


図-6 破壊力学を用いた「き裂進展/破壊」評価

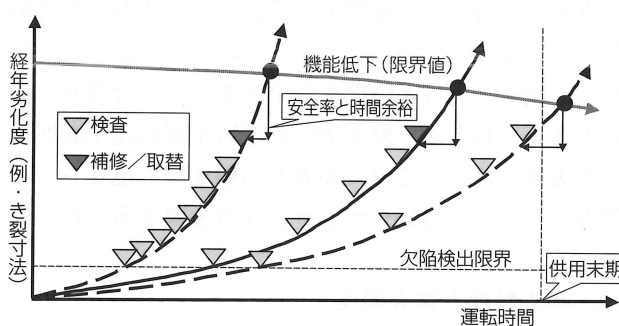


図-7 経年劣化速度と検査・補修時期

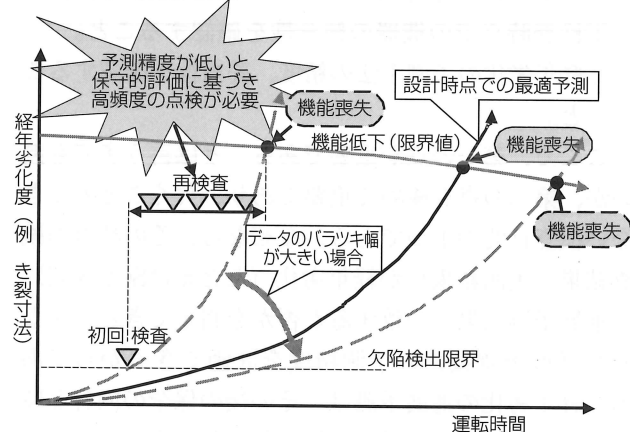


図-8 経年劣化予測と点検頻度

年劣化進展予測曲線を採用せざるを得ず、その結果、検査頻度を高くしなければならないような場合がある。(図-8) このため、試験データのばらつきの原因となる要因、すなわち材料、応力、環境に関する各要因をできるだけ少なく、あるいは無くす工夫することが重要である。

また、SCCは溶接等の残留応力の影響が大きい経年劣化事象であるので、SCCが発生し進展すると、き裂先端の残留応力場は正(引張)の値から負(圧縮)の値へ転じる場合がある。従って、SCCの進展データを採用する場合は、作用している応力がSCCの進展とともに低下していくような条件(応力拡大係数が減少するような条件)で試験データを採用す

ることも必要である。このような応力条件下ではSCCの進展速度が、負荷荷重一定の条件で実施した定荷重条件下(応力拡大係数が増加するような条件下)での進展速度よりも小さいことが予測される。このような場合、図-9に示すように検査頻度を合理的に低減できる。これまでのSCC進展データは定荷重試験によるデータが主体であるので、今後は応力拡大係数が減少するような条件下での試験データを採用することも望まれる。

#### 4-2) 検査に関連する主要な構成要素

保全とは、「機械系」と「人間系」という保全の2大要素の間に位置付けられ、その両者を繋ぐ「保全行

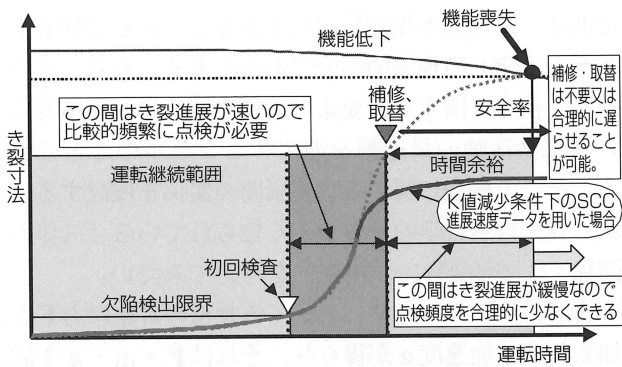


図-9 K値減少下のSCC進展速度データを用いた場合の点検頻度と修理時期

為<sup>回</sup>」のことであり、保全しようとする対象に対し、どのような保全項目をどのような方法で、何時、実施するか、というのがその内容である。これを検査に当てはめて考えてみると、検査対象に対し、どのような検査項目をどのような方法で、何時、実施するか、ということになる。つまり、検査の構成要素には、検査対象、検査項目、検査方法、検査時期の4つの要素があることになる。(図-10) このことを表にまとめると、表-3に示すようになる。

#### 4-3) 検査に関する3X3マトリックス

機器の検査を実施する場合、まず実施しようとする検査を「計画」し、その計画に基づき検査を「実行」し、さらにその検査結果を「評価」する。この「計

表-3 保全の2大要素と検査内容

検査内容	機械系 (自然科学、工学の世界)	人間系 (文化、社会、慣習の世界)
検査対象	経年劣化の想定される機器を科学的工学的に抽出。 ●経年劣化発生予測機器 *ポンプ、モータなど	—
検査項目 (メニュー)	経年劣化の想定される部位を抽出し、当該部位を点検・検査する。 ●経年劣化の種類と発生部位 ●劣化発生部位の点検・検査	—
検査方法	多くの検査・モニタリング方法の中から劣化部位の検査・モニタリングに最適な方法を選定。 ●検査方法の種類 *非破壊検査、破壊検査など ●検査方法の能力 *検査装置、検査要領、検査員の組合せ *欠陥検出(識別)、位置方向同定、サイジング、劣化診断能力	検査工事の実施方法などを決定。 ●工事方法 *分解するか、非分解で可能か *足場、揚重設備などをどう使うか ●工事計画 *作業員、検査員(職種/資格/技量等)の動員 *道具書類(特殊工具、資機材など) *工事要領(手順、マニュアルなど) *管理(工程、品質、安全など)
検査時期	経年劣化進展の予測結果に基づき検査実施時期を科学的工学的に決定。 ●経年劣化の発生が予測される時点 ●経年劣化の進展で機器等の機能喪失が予測される前の時点、など	—

画」「実行」「評価」という行為は時間軸に沿った保全行為の展開である。これらの各事項に対し、空間軸に沿った展開を考える。まず創造物はそれを構成する「要素」から成り、それらが結びついて(要素間の

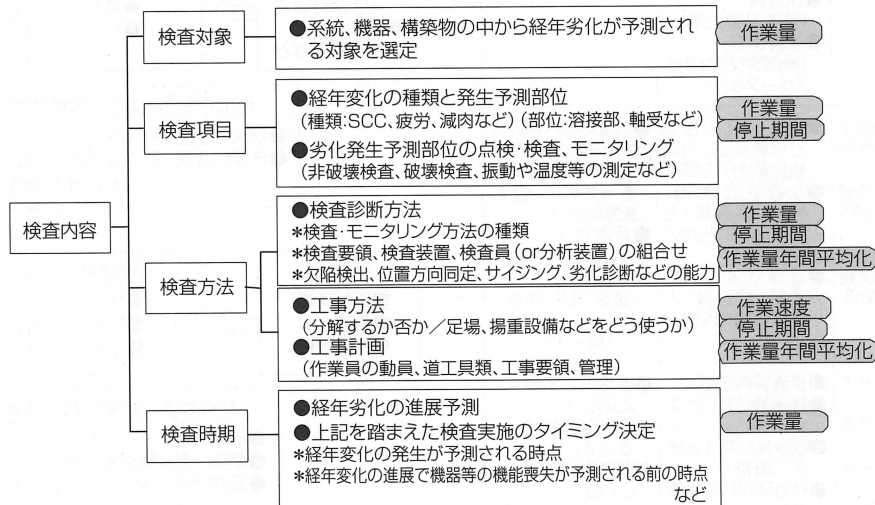


図-10 検査内容の主要な要素

「関係」全体の構造を形成する。そして、その全体構造は何らかの働き（「機能」、創出される「意味」あるいは一般化/抽象化された「基準」）を持つ。これらの項目が前述の表-2に示した保全活動の3X3マトリックスと同様、「時間」と「空間」の3X3マトリックスを構成するのは自明である。

この例のように、表-2の「検査」「評価」「対応措置（補修）」という保全活動、そのうちの「検査」に着目すると、これも「計画」「実行」「評価」というように更に時間軸に沿って展開でき、3X3マトリックスに表わすことができる。保全活動の3X3マトリックスはフラクタル性を有しているのである。

ここで「検査」という保全活動を3X3マトリックスにまとめると、表-4に示すようになる。表中の「関係」の行は、「要素」間の関係を論じている箇所

表-4 検査に関する3X3トリックス

		時間軸→		
		計画(検査計画)	実行(検査実施)	評価(検査結果評価)
空間軸↓	要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化する機器(材料、構造、寸法、機能)(経年劣化の種類と発生予測部位)</li> <li>●検査項目(劣化発生予測部位の点検・検査)</li> <li>●検査方法(検査方法の種類、(欠陥検出、位置方向同定、サイジングなどの検査能力)</li> <li>●検査時期(経年劣化の進展、機器の機能維持、安全裕度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化する機器(材料、構造、寸法、機能)(経年劣化の種類と発生予測部位)</li> <li>●検査への要求仕様(検査計画の段階で明確にされた検査への要求仕様)</li> <li>●検査装置(SN比、分解能、最小検出可能欠陥サイズなど)</li> <li>●検査要領(キャリブレーション、走査方法など)</li> <li>●検査員(資格、技量、経験)</li> <li>●検査環境(検査部の圧力温度、スペースなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化する機器(材料、構造、寸法、機能)(経年劣化の種類)</li> <li>●検査結果(欠陥の位置、方向、形状、寸法)</li> <li>●機器へ作用する負荷(運転環境、運転荷重、地震など)</li> <li>●機器に生じる現象(破壊、変形、漏洩など)</li> </ul>
	要素間の関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>●対象機器の経年劣化進行と機能低下の関係(劣化に伴う安全機能、構造強度などの低下)</li> <li>●経年劣化に伴う機能低下と検査方法/時期の関係(図-12)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●経年劣化の種類と検査手法(欠陥検出能力)の関係</li> <li>●検査手法(装置、要領、検査員)と欠陥検出能力の関係</li> <li>●検査手法(装置、要領、検査員)と検査環境の関係(図-13)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●対象機器への負荷と経年劣化の関係(運転環境、運転荷重、地震など)(腐食、疲労など)</li> <li>●機器に生じる経年劣化現象と機能低下の関係(破壊、変形、漏洩など)(図-11)</li> </ul>
	意味抽象(基準)	<ul style="list-style-type: none"> <li>●検査方法の決定基準(検査性能に対する要求事項)</li> <li>●検査時期の決定基準(安全率、時間的余裕の確保)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●検査装置の要件</li> <li>●検査要領書に対する要件</li> <li>●検査員に対する要件(資格)</li> <li>●検査環境に対する条件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●破壊限界基準 <math>K &lt; K_{IC}</math></li> <li>●変形限界基準 <math>\delta &lt; \delta_c</math></li> <li>●漏洩限界基準 <math>Q &lt; Q_c</math></li> <li>など</li> </ul>

であり、これは本稿で検討しようとしている「検査システム工学」の理論的部分であると考えられる。すなわち、検査に関する各要素の関係を明確にし、検査という保全活動の最適解を導出するツールのことである。そこで検査に関する各要素間の関係を検討するにあたり、自然科学の世界でよく知られている「三体の関係<sup>[7]</sup>」を念頭に、「検査」を考えてみたい。

まず、ニュートン力学において質量mの対象に力Fを加えれば、加速度aが得られ、それは $F = m \cdot a$ を満足するという相互作用、すなわち対象-負荷-応答の「三体の関係」から類推が容易と考えられる、検査の「評価」から考えてみたい。経年劣化が進行する機器という「系」に運転荷重や地震力、環境などの「負荷」が作用し、それに「系」が「応答」して応力が発生、変形したり、腐食が進行したりする。(図-11)このように機器である「系」に環境や外荷重などの「負荷」が作用する場合、既存の工学(材料力学、破壊力学、腐食工学など)などを活用すると、系の「応答」、すなわち腐食や疲労の進行、発生応力や変形などを予測することができる。これが空間軸の「関係」に当たる。通常、機器は一定の機能を有しており、それは内部流体の耐圧漏洩防止機能や送水機能であったりする。このため、それらの機能を維持するために、

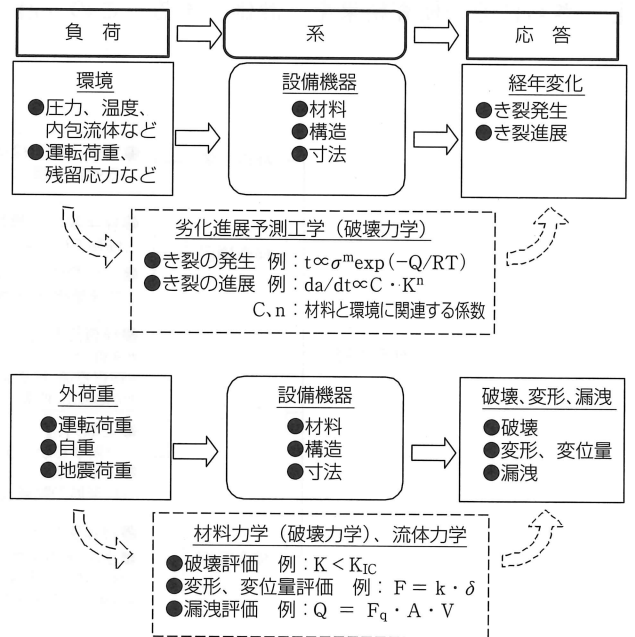


図-11 検査における三体の関係(検査の「評価」)



経年劣化した機器の破壊に対する防止基準、変形に対する許容基準、漏洩に対する許容基準などを定める必要がある。これが空間軸の「意味、抽象（基準）」に対応する。

同様に、検査の「計画」「実行」についても三体の関係を考えてみたい。「計画」段階では、経年劣化する機器や検査の項目、方法、時期などの要素がある。これらの要素間の関係としては、経年劣化する機器である「系」に、系の機能維持を前提に、特定の検査方法を適用する、すなわち「作用」させると、経年劣化を合理的なタイミングで検出できるようにするための検査への要求仕様が「応答」として出てくる。検査方法に対する要求事項（検査能力/精度など）や検査実施時期に対する要求事項である。（図-12）

次に「実行」段階では、検査対象である経年劣化機器、上記検査への要求仕様、検査手法（装置、要領、検査員）、検査環境の各要素がある。これらの要素間の関係は、次のように考えられる。経年劣化する対象機器である「系」を検査する、すなわち、「系」である対象機器に検査行為（装置、要領、検査員）を「作用」させる。このとき、「応答」として何が出てくるであろうか。それは検査への要求仕様を満足する検査能力を発揮できる検査内容、すなわち検査装置に対する要求性能、検査要領に対する要求事項、検査員に対する要求事項（資格）、さらにはそれらの組合せである。（図-13）

#### 4-4) 検査、評価および対応措置の間の補完関係

実時間軸に沿って進行する経年劣化事象を予測し、その結果を踏まえて「検査」「評価」および「対応措置」という保全内容とその実施時期が合理的に決定される。しかしながら、現実の機器は、これら「検査」「評価」および「対応措置」が必ずしも容易に実施できない場合が想定される。すなわち、下記のような理由である。

- a) 物理的に不可または容易でない
- b) 信頼性が十分でない
- c) 安全性が十分でない
- d) 経済性が十分でない
- e) 社会的受容性が十分でない

また、これら「検査」「評価」および「対応措置」の3者は、それぞれ独立ではなく、それらの間には補完関係がある。なぜなら機器はこの3者いずれか一つ

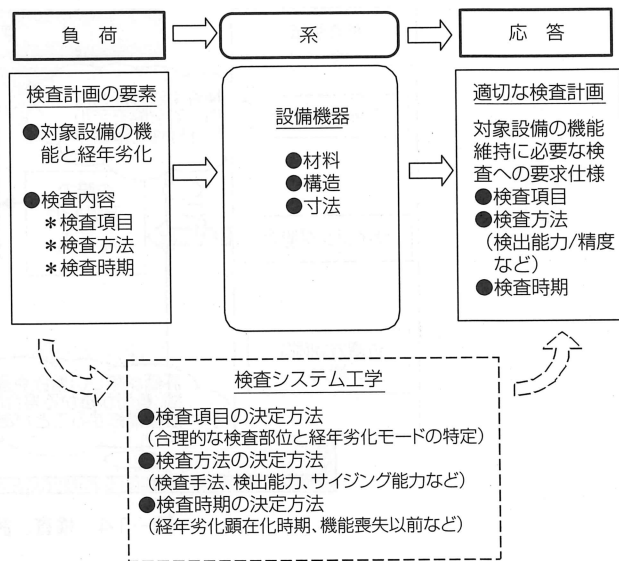


図-12 検査における三体の関係（検査の「計画」）

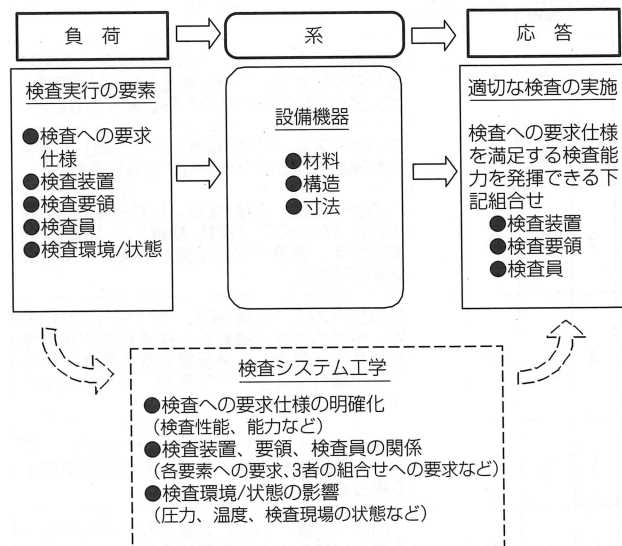


図-13 検査における三体の関係（検査の「実行」）

でその健全性を確認できる場合もあるが、3者全体でその機能を確保する場合も考えられ、その場合でも安全性を確保できるからである。表-5に示すように、補完関係が成立するケースとして多くのケースが考えられる。これら3者の補完関係は主なケースとして下記のような場合が考えられる。（図-14）

(1) 不十分な検査を保守的な欠陥評価あるいは対応措置で補完する場合

たとえば、検査が物理的制約などにより望み通り実

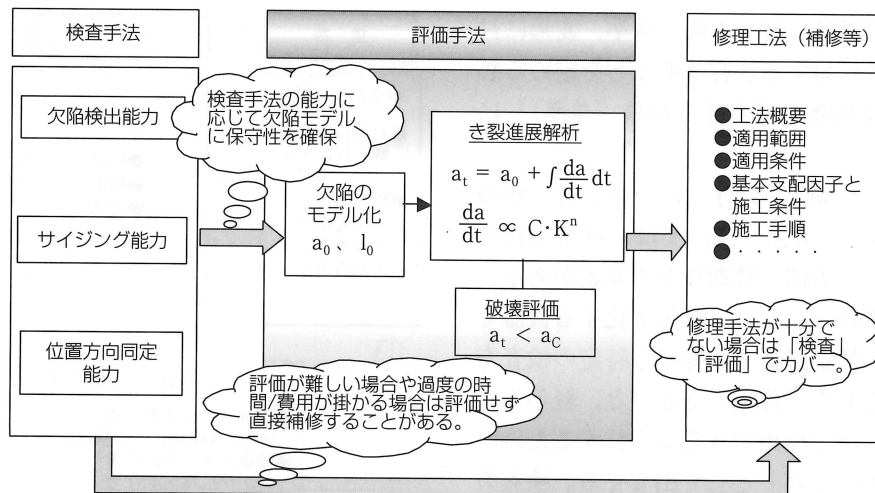


図-14 検査、評価、補修の補完関係

表-5 検査、評価、対応措置の補完関係のケース

ケース	点検・検査	評価	対応措置	備考
1	◎	◎	◎	補修等の「対応措置」が容易な場合、「対応措置」のみを実施し、「点検・検査」および「評価」は実施しない方が効率的である場合がある。
2	◎	◎	△	このケースは、「点検・検査」と「評価」で健全性が確認できる間のみ使用する場合である。
3	◎	△	◎	このケースは、「点検・検査」しても「評価」を十分行えないので、「点検・検査」と「評価」を実施せず、直接「対応措置」を実施した方が効率的である。
4	△	◎	◎	このケースは、「点検・検査」が十分行えないので、裕度の大きい機器なら検査結果に保守性を加えて「評価」し運転継続を目指す。そうでない場合は直接「対応措置」を実施した方が効率的である。
5	◎	△	△	このケースは、精度の高い「点検・検査」を実施し、健全性が確保されている間のみ使用する場合である。
6	△	◎	△	このケースは、「点検・検査」が十分行えないので、裕度の大きい機器なら検査結果に保守性を加えて「評価」し、運転継続を目指す。
7	△	△	◎	「点検・検査」および「評価」が容易であってもそれらを実施せず直接「対応措置」を取った方が効率的な場合もある。
8	△	△	△	通常何らかの対応が可能であるので、このような場合は少ない。

◎：実施可能  
△：実施不可能または容易でない

施できない場合がある。このような場合には、何の対応もできず、健全性を確認できないかという、そのような事は無い。もし機器の構造強度に十分な余裕があれば、検査が物理的に実施できない場合、あるいは検査手法の欠陥サイジング精度が必ずしも十分でない

ような場合でも、十分大きな欠陥サイズを保守的に設定して（あるいは検査誤差を大き目に見込んで）、欠陥評価し、これで健全性が確認できれば、当該機器を継続使用することができる。

また、欠陥のサイジング精度が十分でない検査手法でも、欠陥の検出は可能な場合があるので、このような場合は欠陥を検出したら、すぐに補修を実施することが考えられる。このような場合でも当該機器を継続使用することが可能となる。

(2) 不十分な欠陥評価を対応措置あるいは検査で補完する場合

たとえば、経年劣化事象のメカニズムが十分究明されておらず、経年劣化の進展予測が十分できない場合は、検査で欠陥が検出されたら評価を実施せずに、直ちに補修等の対応措置を講じ、健全性を確保することが考えられる。ただし、この場合、準備が容易で短期間の間に容易に施工できる補修等の対応措置工法が必要である。従って、今後はそのような特徴を備えた工法の開発が強く望まれる。

また、欠陥評価が十分に実施できない場合は、検査精度を上げて精密に点検し、過度な保守性を確保して評価しても健全性あるいは必要機能を確保できることが証明できれば、当該機器を継続使用することが可能となる。

ところで、経年劣化の進展予測が十分でないとは、どのような事であろうか。それは、予測に用いている

き裂発生時間や進展データ等を採取した材料試験の条件が実機条件を必ずしも十分模擬していないという理由が考えられる。試験の供試体条件、荷重条件、環境条件の違いである。その結果として、経年劣化の発生する場所、時期、進展挙動などが予測と実機で違ってくるのである。この点を解決することは保全工学の重要な課題の一つである。

### (3) 対応措置の実施が不可で、それを検査と評価で補完する場合

準備が容易で短期間の間に容易に施工できる補修等の対応措置工法が存在しない場合、検査で発見された欠陥の進展評価を実施し、その健全性が確認されれば、当該欠陥をそのままにして当該機器を継続使用することが可能である。この場合は、その後も計画的な欠陥の監視が必要である。

## 4-5) 合理的な検査内容の決定方法

この節ではもう少し具体的に合理的な検査内容の決定方法について述べる。

### (1) 合理的な検査対象の選定方法

如何なる構造物も供用中に経年劣化するので、現実的に可能なら、構造物を構成している全ての機器を常時監視し、高頻度で検査すれば良いと考えられる。しかしながら、通常、産業界で用いられている巨大構造物は膨大な数の機器、部品から構成されており、また個々の機器で経年劣化の発生頻度や可能性、発生したときの社会や作業員への影響度などが格段に異なる条件を持っている。従って、膨大な数の機器を一律に検査するのは合理的でない。このため、機器毎に下記を考慮して検査を実施する事が合理的であると考えられる。

- ①機器の経年劣化の発生可能性、頻度
- ②経年劣化による故障が発生した場合の影響度（安全性、経済性）

ここで、重要なことは、安全上重要な機器は合理的な手法で検査対象を選定し、計画的に検査を実施すべきことは言うまでもないが、一方で故障しても安全性の問題が無い、あるいは影響が小さい場合は経済性の観点から検査の内容や頻度を決定するのが合理的であり、場合によっては、検査などを実施せず、機器が故障した後、事後保全として当該機器を修復した方が合理的な場合があるということである。

上記①②を考慮して検査対象を決定する手法として、現在、リスク評価手法が幾つかの産業分野で開発され、実用化されつつある<sup>[8]</sup>。これらの手法を活用して合理的に、しかも容易に検査対象機器が選定できるようにすることが強く望まれる。

### (2) 合理的な検査内容（検査項目）の選定方法

産業界で用いられている機器は、これまでの研究や運転保守実績などからどの部位にどのような経年劣化が発生する可能性があるか、ほぼ特定されている。たとえば、原子力発電所の場合、機器の長期的な健全性を評価するため、「高経年化対策検討」と称する機器の経年劣化評価を体系的に実施する手法と仕組みが確立され、既にこれが実行、運用されている<sup>[9]</sup>。従って、これらの成果を利用して、経年劣化が想定される部位と経年劣化モードを特定し、その経年劣化状況を検査するための検査内容（検査項目）を明確にすることができる。

### (3) 合理的な検査方法の選定方法

検査手法に要求される性能/能力には、i) 欠陥検出能力、ii) 欠陥位置同定能力、iii) 欠陥方向特定能力、iv) 欠陥サイジング能力の4つがある。これらの性能/能力は、如何なる場合でも高度なレベルを要求されるかということ、必ずしもそうではない。検査対象である構造物の設計や強度、経年劣化の進展速度などによって異なり、ケースバイケースで検査に要求される精度などが異なるのである。たとえば、実際には下記のような場合がある。（ここでは便宜上、欠陥サイジング、特にき裂のサイジングを例にとって説明する。）

#### ①き裂の深さと長さの情報が必要な場合

検査では、検出されたき裂のサイズ（深さと長さ）とその精度が問題となる。その両者がその後に行う機器の健全性評価に直接影響するからである。図-15に示すように、検査による欠陥の測定値 $a_0$ と測定誤算 $\Delta E$ に対し、機器の機能喪失までの裕度が十分確保されていれば、すなわち次回点検時までの間のき裂進展量 $\Delta a$ を考慮しても、機能喪失に対応するき裂サイズ $a_c$ に達しなければ運転継続は可能である。つまり下式が成立すれば運転継続は可能である。

$$a_0 + \Delta E + \Delta a < a_c \quad \dots(1)$$

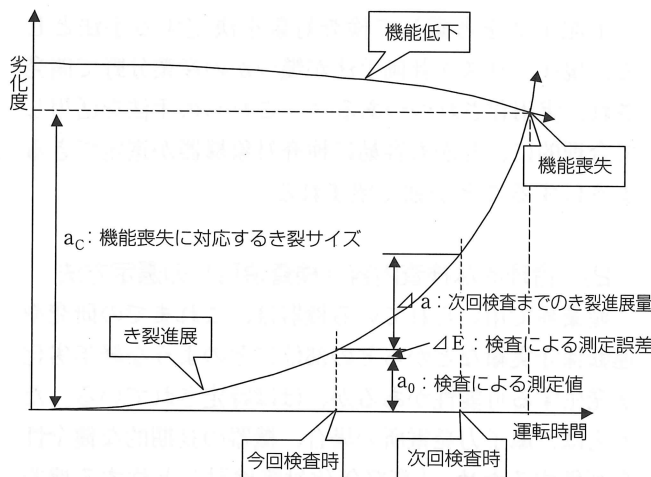


図-15 機器の機能、経年劣化速度および検査精度の関係

ここで

$$\Delta a = \int_0^{t_0} (da/dt) dt + \Delta a = \int_0^{N_0} (da/dN) dN,$$

$da/dt = C \cdot K^n$  (応力腐食割れの場合)、 $da/dN = C' \cdot (\Delta K)^m$  (疲労の場合)、 $t_0$ : 次回検査までの時間、 $N_0$ : 次回検査までの繰返し回数、 $C, n$ : 材料および環境に関連する係数、 $K$ : き裂先端の応力拡大係数、 $\Delta K$ : 応力拡大係数の変化幅、 $a_c \propto (K_{IC}/\sigma)^2$ 、 $K_{IC}$ : 破壊靱性値、 $\sigma$ : 応力

上記 (1) を変形すると、下式となる。

$$\Delta E < a_c - (a_0 + \Delta a) \quad \dots(2)$$

以上のように、検査手法に対する要求精度は、上式が成立する範囲内に収まるように測定誤差  $\Delta E$  を指定すればよく、それ以上の高精度を要求する必要は技術的にはない。

②欠陥の長さ情報のみあれば良い場合

たとえば、圧力障壁でない内部構造物の場合、発生したき裂の深さ情報が無くても当該内部構造物の健全性を確認することができる場合がある。それは、構造物の構造強度余裕が十分あり、検出された表面き裂が特定の範囲に限定されていれば、表面き裂を保守的に貫通していると見なして評価できる場合である。ただし、表面き裂の発生範囲が広い場合、あるいは全周にわたる場合は、保守的に貫通き裂を仮定すると、構造物の構造強度余裕を食い潰してしまうので、健全性を証明できないことになる。

③特定の範囲のみの健全性が確認できる場合

部分的な検査を行い、当該部の健全性が確認できれば、十分な強度を確保できるような場合は、全ての範囲を検査する必要はない。たとえば、圧力障壁でない内部構造物の場合、通常、耐圧漏洩防止機能が無く、内部構造を保持する機能を有するのみであるため、全範囲の健全性が確保されていなくても一定以上の強度がありさえすれば機能上問題ない。従って、運転荷重や地震荷重を考慮して、たとえば内部構造物の円周4方向の検査可能な特定の範囲のみ健全性を確認しそれだけで強度が十分であることを証明し、その上で運転継続することは可能である。このような場合は、取って全範囲を検査する必要はないのである。

以上に示すように、機器の健全性を評価する場合、設計余裕の程度（強度余裕）によっては保守的な欠陥の想定が可能となり、必要以上の検査性能を要求する必要がなくなる。このように、検査手法に対する要求性能は、機器の機能維持に対する設計余裕の程度と経年変理事象の進行速度に関連しており、それらのバランスで決定するのが合理的である。

(4) 合理的な検査時期の決定方法

どのような構造物でも多かれ少なかれ経年劣化が発生進展する。従って、検査対象である機器に経年劣化事象が顕在化し、それが進展して当該機器の機能が喪失するかもしれないということを想定して、検査のタイミングを考える必要がある。検査のタイミングを決める考え方としては、下記が挙げられる

- 経年劣化の顕在化時期と機器の機能喪失時期が予測できる場合
- 経年劣化の顕在化時期と機器の機能喪失時期が十分予測できない場合

以下にこの2つのケースについて論じる。

①経年劣化の顕在化時期と機器の機能喪失時期が予測できる場合

検査するタイミングの考え方としては、まず、経年変化が顕在化すると予測される時期に初回検査を実施する考え方がある。このタイミングで初回検査を実施する場合は、機能喪失に対して十分余裕のある時点であるので、経年劣化の予測精度が必ずしも正確でなくても問題は無い。この時点で、経年劣化の予測精度あるいは保守性を確認することができ

る。初回検査後の再検査時期は、検査手法の検出限界サイズの欠陥が存在すると保守的に仮定して進展予測し、今度は機器の機能喪失に対し十分な余裕を確保した時点で点検する必要がある。(図-16) この考え方は日本機械学会の維持規格、たとえば「IG炉内構造物の個別検査<sup>[6]</sup>」に取入れられている。

次に、初回検査以降の検査で欠陥が検出された場合は、その欠陥の進展を予測し、当該機器の機能喪失に対し十分な余裕を確保した時点で点検する必要がある。(図-16) この考え方は上記同様、維持規格の「EBクラス1機器の欠陥評価」に取入れられている。

②経年劣化の顕在化時期と機器の機能喪失時期が十分予測できない場合

経年劣化の予測手法が十分に確立されていない場合は、設計上の裕度が十分にあり、経年劣化が大きく進展しないうちに、実機データを着実に採取、収集し、それらのデータのトレンドに基づき経年劣化の将来予測をするという方法が考えられる。この方法を採用する場合は、必要最小限のデータは何か、過度な負担とならないように如何に効率的に実機データを採取するか、国内外あるいは他産業の類似機器のデータを如何に活用するか、などに注意を払う必要がある。

また、経年劣化対策材などを採用した場合は、従来材の検査頻度を参考に、運転経験を踏まえ徐々に延長していく方法が考えられる。

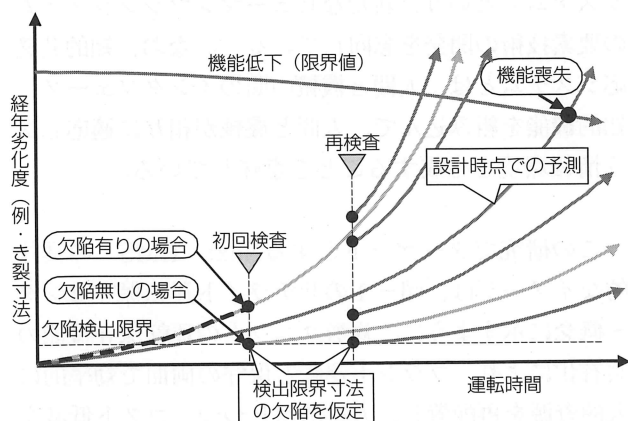


図-16 経年劣化予測と検査時期の決定方法

以上のように、経年劣化の予測手法が十分確立されていない場合は、いろいろなアプローチが考えられるが、今後、本件を取り扱う論理体系の構築が必要であり、これは検査システム工学の課題である。

5. まとめ

今回は、「保全工学」の一部を構成する「検査システム工学」のイメージと想定される内容について検討した。今回論じた内容はまだイメージを脱し得ない内容であり、今後、内容の修正、充実が必要であるが、このような試みを通じて実際の保全活動に役立つ保全工学の確立が強く望まれる。

参考文献

1. 日本保全学会 URL : <http://www.mainte.gr.jp/>
2. 宮 健三、ほか；保全学構築に向けて (1)  
日本AEM学会「フォーラム保全学」Vol.1, No.4 (2003)
3. 高瀬健太郎、ほか；保全学構築に向けて (2) - 保全理論について -  
日本保全学会誌「保全学」Vol.2, No.1 (2003)
4. 千種直樹、ほか；保全学構築に向けて (3) - 実務から見た保全学のテーマ -  
日本保全学会誌「保全学」Vol.2, No.2 (2004)
5. 青木孝行；保全科学および保全工学の構造と体系  
日本保全学会誌「保全学」Vol.2, No.3 (2004)
6. 発電用原子力設備規格 維持規格 (2002年改訂版)  
日本機械学会
7. 宮 健三、織田満之；保全の体系化に関する一考察  
日本AEM学会誌 Vol.8 No.2 (平成12年 6月)
8. 木原重光；リスクベースメンテナンスの具体例「発電用ボイラ、クレーン、セメント設備での事例」、  
日本機械学会誌Vol.106, No.1020 (2003)
9. 資源エネルギー庁；高経年化に関する基本的考え方 (平成 8年 4月)  
URL : [http://www.plec.jp/lineup/metijyouhou/line\\_up\\_meth08.php?npt=7000649](http://www.plec.jp/lineup/metijyouhou/line_up_meth08.php?npt=7000649)  
(平成16年 2月24日)