

「保全工学」構築のアプローチ

Approach to the Construction of "Maintenance Engineering"

日本原子力発電(株)	林田 貴一	Kiichi HAYASHIDA	Member
日本原子力発電(株)	青木 孝行	Takayuki AOKI	Member

Abstract This study proposes the systematization of plant maintenance and establishment of Maintenology or "Maintenance Engineering". In this paper, it is shown that "Inspection System Engineering", which consists of a part of Maintenance Engineering, is necessary to incorporate a scientific approach or rationality into maintenance planning and can provide how to optimize inspection planning by considering the structural strength and aging degradation of equipment or component.

Keywords: Maintenance Engineering, Inspection System Engineering
E-mail: kiichi-hayashida@japc.co.jp

1. 緒言

人類の活動が地球環境や地球活動に影響を与えるようになった今日、人類の造り出す人工物については、合理的に維持管理し長期間活用する必要があるとの考え方に転換しつつあり、それを可能にしようとする事は、もはや喫緊の課題となっている。

人工物に対する従来の保全活動は、保全管理者の経験と勘とに大きく依存しており、これが保全を最適化する上での大きな障害となっていた。例えばプラントの保全は、設計、運用、管理に携わるエキスパートによりその内容が立案され実施されている。また計画立案の際に最も有効な情報は、エキスパートの実務経験に基づく知識や、過去の運転実績であった。特に原子力プラントの場合、他の産業と比較して歴史が浅いことから、現場の人達の試行錯誤によって保全計画の改善がなされてきた側面が強い。しかしながら現在は、運転経験の蓄積に伴い、従来の経験に基づく保全から理論に基づく保全へと移行しようという気運が高まっている。そして、この一連の流れに理論構築の枠組みを与え体系化することにより、合理的効率的に保全の最適解が得られることが強く期待されている[1]。

本検討では上記の観点から、保全工学の一部と考えられる「検査システム工学」の構築に向けたアプローチについて検討を実施した。

2. 「検査システム工学」構築のアプローチ

2.1 検査に関する主要な構成要素

検査計画を立案する場合に決定する必要がある事項は、検査しようとする対象に対し、どこをどのような方法で、いつ実施するかであり、これらは「検査対象」「検査項目」「検査方法」「検査時期」の4つの要素に対応している (Fig1)。検査システム工学は、これら4要素を合理的に決定する理論やツールを提供してくれる必要がある。

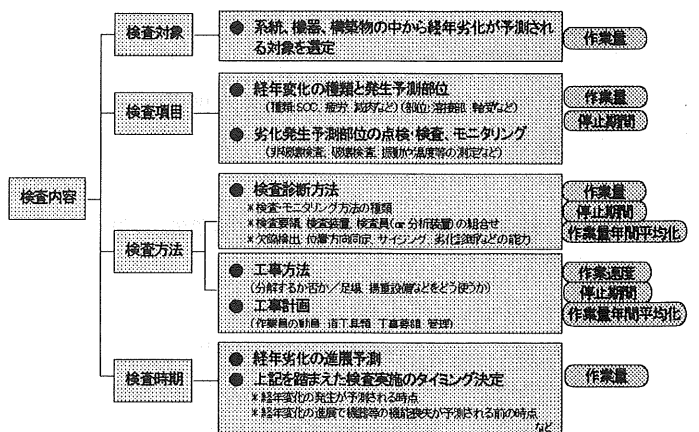


Fig1 検査内容の主要な要素

2.2 検査内容の合理的な決定手法

2.2.1 検査対象の選定方法

程度の差こそあれ、如何なる構造物も供用中

に経年劣化する。そこで、構造物の健全性信頼性を確保するために、その構成機器の全てを常時監視し高頻度で検査することが考えられる。しかし、膨大な数の機器を一律に検査するのは合理的でなく現実的でもない。例えば、原子力プラントを構成する系統のひとつを考えても、そこには数多くの弁、配管、容器、ポンプ等、幾種類もの機器が存在し、さらにポンプ1台をとらえても軸、軸受、羽根車等の数多くの部品から構成されている。経年劣化の発生頻度や可能性は、各機器の使用条件・環境等によって異なり、またプラント運転上で機器が果たすべき役割によっては、経年劣化が発生した時の社会等への影響度も異なる。以上の検討から、機器ごとに下記を考慮して検査を実施すること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）

なお、プラント運転上の各機器の重要度等も勘案して保全の内容や頻度を合理的に決定すると同様に、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であり、故障しても安全性の問題が無い、影響が小さい場合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考えられる。

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[2]。これらの手法を活用し、より一層合理的にかつ容易に検査対象機器を選定することは可能である。

2.2.2 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、振動診断や潤滑油分析など、設備診断活動を積極的に導入展開している事業者には、経年劣化がどのように機器の運転状態へ表れてくるのか等も含め独自にデータベース化しているところも多い。また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[2]。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整理し特定できれば、その経年劣化状況を検査するための検査内容（検査項目）を合理的に決定することができる。

2.2.3 検査方法の選定方法[2]

検査方法の選定は、検査性能へ対する要求と密接に関係すると考えられる。検査方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つが挙げられる。これらの性能/能力に対し、如何なる場合でも一律に高度なレベルが要求されるのは合理的ではない。このことについて、以下に欠陥サイジング能力を例にとり検討する。

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）とその精度が問題である。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。

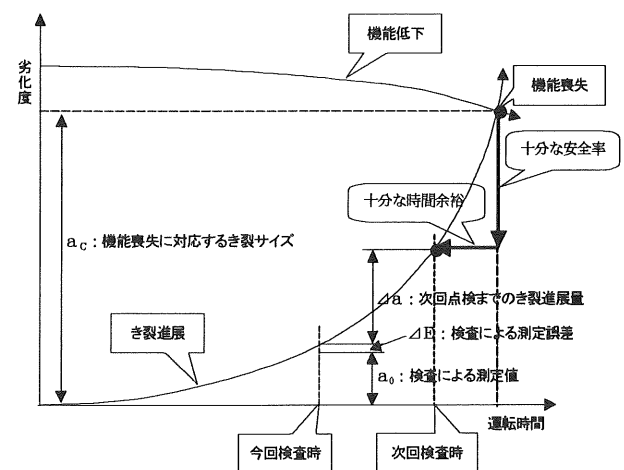


Fig2 機器の機能、経年劣化速度および検査精度の関係

Fig2 に示すように、検査による欠陥の測定値 a_0 と測定誤算 ΔE に対し、機器の機能喪失までの余裕が十分確保されていれば、即ち次回検査時までの間のき裂進展量 Δa 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、運転継続は可能といえる。つまり次式が成立すれば運転継続は可能である。

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

ここで
 $\Delta a = \int_0^{t_0} (da/dt)dt$, $da/dt = CK^n$, t_0 : 次回検査までの時間、あるいは

$\Delta a = \int_0^{N_0} (da/dN)dN$, $da/dN = C' \Delta K^n$, 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、 ΔK : 応力拡大係数の変化幅、 $a_c \propto (K_{IC}/\sigma)^2$ 、 K_{IC} : 破壊靱性値、 σ : 応力

上記(1)を変形すると、下式となる。

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

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測定誤差 ΔE 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

この例として、圧力障壁でない内部構造物において、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る場合が挙げられる。ここでは、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。

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がなくなるので、上記の保守的仮定は設定できない。

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、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、耐圧漏洩防止機能は無く、内部構造を保持する強度を維持さえすればよいので、全範囲の健全性を確認する必要はない。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できれば、その後の運転継続は可能である。

このように、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。以上の検討から、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化事象の進行速度に関連しており、検査手法はそれらのバランスで決定するのが合理的である。

2.2.4 検査時期の決定方法[2]

検査時期は、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が機能を喪失する可能性があるということを想定し決定する必要がある。

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 (Fig3)。

また、初回検査以降の検査で欠陥が検出された場合、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 (Fig3)。

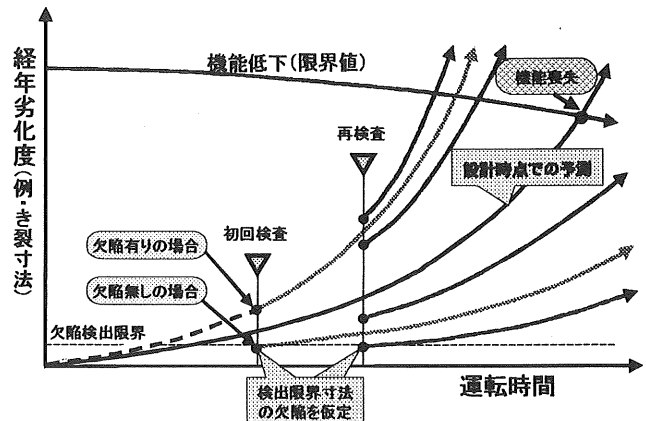


Fig3 経年劣化予測と検査時期の決定方法

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。ただし、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等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。

3. 結言

本論文では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」構築のアプローチについて検討した。その結果、検査に対する要求事項は対象構造物の機能、及び経年劣化の発生進展予測の関係において決定することが合理的であると考えられ、その合理的決定手法を提供するのが検査システム工学であると考えられた。今後、発展・確立されるであろう各種の保全工学も、検査システム工学と同様に検討対象の主要な構成要素、及びその要素間の関係を明確にし、予測性の高い理論を構築するアプローチがとられるものと考えられる。

参考文献

- [1] 高瀬健太郎、宮健三、千種直樹、青木孝行、“保全学の構築に向けて(2)－保全理論について－”、日本保全学会誌「保全学」、Vol.2、No.1、2003、pp.63-68.
- [2] 青木孝行、宮健三、高瀬健太郎、千種直樹、“保全学の構築に向けて(4)－「保全工学」構築のアプローチ”、日本保全学会誌「保全学」、Vol.3、No.1、2004、pp.57-69.