

検査コスト及び誤差を考慮した保全計画策定手法

A Proposal for the Method to Optimize the Maintenance from the Viewpoint of the Cost and Errors of Inspection

東京大学大学院工学系研究科	藤田 智	Satoshi FUJITA	Student Member
東京大学大学院工学系研究科	福田 研二	Kenji FUKUDA	Non-Member
東京大学大学院工学系研究科	沖田 泰良	Taira OKITA	Member
東京大学大学院工学系研究科	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Member

In this study, we make a new proposal for the maintenance plan to optimize the total cost, which includes the cost of inspection and replacement, and the damage of the accident. It treats the probability distribution of the initial value and degradation rate of the performance of equipments. We apply it to the pipe thinning phenomenon in PWR secondary systems.

Keywords: Risk-based Maintenance, Optimization, Modeling, Measurement Errors, Probability Distribution, Adaptive Algorithm, Pipe Thinning, Flow Accelerated Corrosion

1. 背景

1.1 リスクマネジメントとしての保全

ひとり原子力発電所に限らず、あらゆる人工物において安全性は非常に重要な課題である。一方で、人工物の機能において不確かさは避けられず、事故確率を厳密値としての0にする事は不可能である。この現実を受け入れ、安全性と経済性の観点から適切に人工物を運用する事が必要である。特に電力事業のような公共性の高い産業においては、無謀な目標のために不経済なシステム運用を続ける事は、社会的にも受容できないものである。

安全性と経済性の両立という基本思想を、定量的な手続きによって実現するための方法論がリスクベース保全である。あらゆる保全計画には、実行に要する費用と、それによって防ぎきれずにある確率で生じてしまう事故による損失が伴う。保全費用と事故による損失の合計値は、保全計画によって決まる確率分布を持つ。そして、その分布から決まる何らかの指標値を定義し、その指標値を最小もしくは最大とする事で、保全計画を最適化するのである。最も簡便な最適化基準は、保全費用と事故による損失の合計の期待値を最小化する事である。リスクベース保全は手続きの明瞭さ

によって、円滑なリスクコミュニケーションに基づく意思決定と透明性の高い説明責任の履行という利点を、兼ね備えている。

1.2 大規模複雑システムの保全最適化手法

原子力発電所のような大規模複雑システムでは、保全に関与する因子（構成機器の種類・台数・故障モード、機器間の接続関係・機能の相互依存性、検査・修理の種類と時期など）が膨大であることから、数学的に厳密な最適化を行う事が困難である。しかし当方のグループは、これまでも実効性・有効性の高い保全計画策定手法を開発する事に成功してきた。藤井らの研究[1]は、Fault Tree解析を応用し、システムを構成する各機器の重要度の指標として、従来提案されていた Fussel-Vesely (FV)、リスク増加価値 (RAW) を基にして、新たにコスト Fussel-Vesely (C-FV)、絶対リスク価値 (A-RAW) を導入し、その有効性を示した。望月らの研究[2]は、システム全体を停止させずにシステムの一部だけを停止させて検査、修理等を行うオンラインメンテナンス (OLM) の導入によって、保全費用を劇的に削減する事を提案した。この研究の中では OLM に伴う事故リスク上昇も同時に評価され、Fault Tree解析における中間事象にも重要度を適用する事によって、OLM 実行の可否を判定する事が有効であると示された。

連絡先: 藤田智、〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1、
東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻、
電話: 03-5841-6987、e-mail: fujita@qs.t.u-tokyo.ac.jp

1.3 保全最適化問題における検査の意義

保全計画を最適化するという問題の中で、検査はいかなる意義を持つであろうか。

一つには、検査によって機器の状態がある程度特定されるため、機器が故障するか否かという不確かさを、ある程度減らす事ができるという点が挙げられる。但し検査は機器に関する全ての物理量を一意に定めるものではなく、また測定値自体にも誤差があるため、不確かさを完全に無くす事は検査をもってしても一般には不可能である。

もう一つ、当然であるが、検査は費用を要するという点が重要である。

検査が持つこの2つの意義を踏まえ、いつ、どの機器の測定を行うかを計画する事が、保全最適化において必要な作業である。従来よく用いられる方策として、連続的に測定を続ける方式(状態監視)と、一定の周期によって測定を行う方式(定期検査)があるが、それだけに拘束されず、測定結果等から推定された不確かさを考慮して、測定や修理交換の時期を随時適応的に決めていく事によって、保全計画をより合理的なものとする事が可能であると考えられる。2章以降では、加圧水型原子力発電所(PWR)二次系炭素鋼配管の流れ加速型腐食(FAC: Flow Accelerated Corrosions)を例としてこの理念を具体的且つ数理的に記述する。

2. FAC 要論[3]

配管の肉厚が時間の経過と共に減少する配管減肉現象は、機械的作用である侵食・壊食(エロージョン)と、化学的作用である腐食(コロージョン)によって生じると言われている。腐食の中でも、PWR二次系炭素鋼配管において特に問題となるのはFACである。平成16年8月に11名の死傷者を出した美浜発電所3号機2次冷却系配管の破断は、FACに起因した可能性が高いとされている。

FACは、移流によって液中への金属イオンの溶解が加速されるために生じるとい説が有力である。FACの進行速度を物理モデルに基づいて理論的に予測する技術は、基礎研究レベルでは開発されているものの、未だに実機での減肉管理には不十分なものである。一方で、FACが時間に対してほぼ線形に進行する事は知られているため、その知見に基づいて、適切な時期に肉厚測定を行う事で減肉管理を行っているのが減肉管

の現状である。尚、過去のデータに基づく経験式に基づいて流体条件等の入力パラメータからFAC進行速度を予測する計算コードも既にいくつか開発されていて、これらは測定箇所絞込み等の補助的役割を担う事が期待されている。

3. PWR 内配管の FAC 管理規格の現状

日本機械学会は、PWRでの配管減肉管理に対して規格を制定中である[4]。この規格の基本的な考え方は、以下の通りである。

- ① 必要最小厚さ t_{sr} を技術基準から計算する。
- ② 減肉率 W を過去の肉厚測定値から最小自乗法により計算する。
- ③ 上記の減肉率と最新の肉厚測定値から、肉厚が t_{sr} となる時期を計算する。
- ④ その時期の5年前までに再び肉厚を測定する。但し、次の運転サイクル中にその時期を過ぎる場合は、次の定期検査の時期に肉厚を測定する。
- ⑤ 次の計画運転停止までに肉厚が t_{sr} を下回る場合は、該当部位の交換又は補修を行う。

肉厚測定値や減肉率推定値には誤差が存在し、それらは本来は確率変数として、確率分布の形で扱われるべきものである。時間に対して線形に減肉が進行すると仮定し、最小二乗法により推定した値と測定値の差 t_d の頻度分布の一例を Fig.1 に示した。もし線形近似が正しければ、肉厚測定値に対しておおむね Fig.1 の程度の誤差は想定しなければならないということである。上記の現行の規格は、このような不確かさを直接的に扱うものにはなっていない。この点を改善する事によって、より合理的な保全計画の策定を行うための基本的な考え方を4章及び5章に示す。

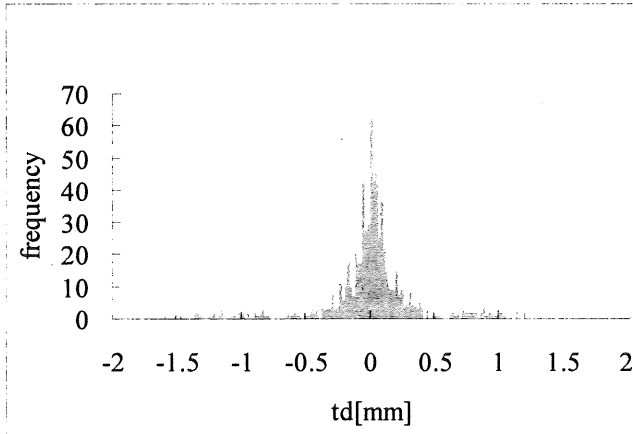


Fig. 1 Histogram of t_d , which is the difference between measured thickness and thickness estimated by the least squares.

4. 問題の数理的記述

ここで、FAC 管理最適化問題を改めて数理的に記述する。詳細な部分で多少の単純化を行ったが、ほぼ問題の本質を保っていると考えている。

時刻 $T=0$ から時刻 $T=(N+1)T_M$ まで、配管を使用するものとする。期間 T_M 毎に定期検査シーズンがある。つまり、時刻 $T=nT_M$ は第 n 検査シーズンである。各検査シーズンには、放置（何もしない）、測定、交換、の 3 種類のアクションから 1 つのみを選択して遂行する。測定を 1 回行う毎に、 c_M だけ費用がかかる。交換を 1 回行う毎に、 c_R だけ費用がかかる。

肉厚 t は、時刻 T に対して 1 次関数的に減少すると仮定する。つまり、

$$t = -W(T - lT_M) + t_0 \quad (1)$$

である。ここに、 l は最終交換シーズン番号（例えば、最後の交換が第 8 検査シーズンに行われたのであれば、 $l=8$ ）、 t_0 は初期肉厚、 W は減肉率であり、いずれも時不変な（つまり、 T に依存しない）定数であると仮定する。 $t=t_b$ となると、配管は破断する（先に述べた必要最小厚さ t_{sr} には安全余裕があり、一般に $t_{sr} > t_b$ であるように設定されている）。配管破断の際には、大きさ d の損害が生じる。

配管の初期肉厚 t_0 は、事前確率分布（何らの検査も行われなない場合に期待される肉厚の分布） $f(t_0)$ を持つと仮定する。減肉率 W に対しても事前確率分布 $f_w(W)$ を考える。

5. 最適化アルゴリズム

第 n 検査シーズンに測定を行った場合、その結果単独で得られる初期肉厚 t_0 と減肉率 W の対数尤度を、 $L_n(W, t_0)$ とする。この定義を測定無しの場合に拡張し、第 n 検査シーズンに測定を行わなかった場合、

$$L_{n-l}(W, t_0) = 0 \quad (2)$$

とする。更に、

$$L_w(W) = \ln f_w(W) \quad (3)$$

$$L_t(t_0) = \ln f_t(t_0) \quad (4)$$

とする。そして、以下の式

$$L(W, t_0) = L_w(W) + L_t(t_0) + \sum_{m=0}^{n-1} L_m(W, t_0) \quad (5)$$

に基づいて $L(W, t_0)$ を計算すると、減肉率 W 及び初期肉厚 t_0 に対する確率分布 $f(W, t_0)$ は、以下の通りに計算できる。

$$f(W, t_0) = \frac{\exp(L(W, t_0))}{\int \exp(L(W, t_0)) dW dt_0} \quad (6)$$

$f_w(W)$ が正規分布であれば $L_w(W)$ は W の 2 次多項式であり、同様に $f_t(t_0)$ が正規分布であれば $L_t(t_0)$ は t_0 の 2 次多項式である。更に、肉厚測定誤差が正規分布に従うのであれば $L_n(W, t_0)$ は W と t_0 に関して、 W^2 、 t_0^2 、 Wt_0 、 W 、 t_0 、1 に比例する各項のみからなる多項式である。従って式(5)から計算される $L(W, t_0)$ も W^2 、 t_0^2 、 Wt_0 、 W 、 t_0 、1 に比例する各項のみで構成され、つまり 6 つの媒介変数 (6 元ベクトル k) のみで $L(W, t_0)$ 及び $f(W, t_0)$ を完全に記述できる事になり、数理的に扱いが容易である事がわかる。以降でもこの前提に基づいて記述を行う。

第 n 検査シーズンから第 $n+1$ 検査シーズンまでの間に配管が破断する確率、つまり

$$n \leq \frac{t_0 - t_b}{WT_M} + l \leq n+1 \quad (7)$$

となる確率は、 k と $n-l$ の関数であり、これを $p_n(k)$ と定義する。ここで、第 n 点検査シーズン直後において、その後の保全計画が最適化されたと仮定する。その場合の期待コスト(保全費用と事故損失の合計の期待値)は k 、 l 、 n の関数であり、 $E_{l,n}(k)$ と置く。明らかに、

$$E_{l,N}(k) = p_{N-1}(k)d \quad (8)$$

である。今度は第 $n-1$ 検査シーズン終了時を想定する。第 n 検査シーズンで配管を放置する場合、期待コストは

$$E_{\text{leave},l,n-1}(k) = p_{n-1}(k)d + E_{l,n}(k) \quad (9)$$

となる。第 n 検査シーズンで配管を交換する場合、期待コストは

$$E_{\text{replace},l,n-1}(k) = p_{n-1}(k)d + E_{n,n}(k_0) + c_R \quad (10)$$

となる。 k_0 は新製配管に対する k である。第 n 検査シーズンで配管の肉厚を測定する場合、期待コストは

$$E_{\text{measure},l,n-1}(k) = p_{n-1}(k)d + \sum_{k_{\text{new}}} P_{n-1}(k_{\text{new}}, k) E_{l,n}(k_{\text{new}}) + c_M \quad (11)$$

となる。ここで、 k_{new} は測定後の k であり、 $P_{n-1}(k_{\text{new}}, k)$ とは第 n 検査シーズンにおいてある k の値が与えられた場合に測定によって k が k_{new} へ変化する確率を示している。上式右辺第 2 項の合計は、測定結果によって異なった k が得られる事に対処するためのものであり、 k の値に基づいた適当な標本抽出によっていくつかの k_{new} を得て、上記の合計を実行する必要がある。そして、

$$E_{l,n-1}(k) = \min(E_{\text{leave},l,n-1}(k), E_{\text{replace},l,n-1}(k), E_{\text{measure},l,n-1}(k)) \quad (12)$$

である。式(8)~(12)は、第 $n-1$ 検査シーズン終了直後において第 n 検査シーズンでとるべき行動を決定するための再帰的アルゴリズムとなっている。従ってこのアルゴリズムを各検査シーズン終了後に実行し、その結果に従って行動をとる事により、保全最適化がなされることになる。

ここで提唱したアルゴリズムはそのまま実行すると、計算量が N に対して指数関数オーダーとなる。そのため、 N がある程度以上大きい場合は、

- ① k_{new} のサンプリングにおいて、確率の小さい分岐枝は無視する (指数関数の底の低減)。
- ② 長時間先においては、検査シーズンの区切りを粗くして計算する (実質的な N の低減)。
- ③ ある程度の期間で仮想的に配管の使用を停止する

として、計算を打ち切る (N に対するカットオフの設定)。

等の対処を取る必要がある。

6. 総括

PWR 二次系炭素鋼配管の FAC を例として、検査のコスト及び誤差を考慮に入れた保全計画策定手法を提示した。類似の手法を用いることによって、各種の経年変化事象に対応する保全計画を合理的に策定する事が可能であると考えている。

時々刻々変化する確率分布という対象は、これまでも確率微分方程式論として数学の中で扱われてきた。これと関係の深い金融工学もまた、時間依存性を持った不確かな系における意思決定の科学として、本研究で扱った様な保全最適化問題と同形性の高い問題を扱っていると捉える事ができる。一方、限られた測定情報に基づいて機器の内部状態を推定し、行動計画を策定するという考え方は、制御工学では状態観測器として研究が進んでいたものである。この成果は現在配管減肉管理においても課題として残っている、保全におけるシミュレータの活用という点でも重要な洞察を与える事が期待される。これらの周辺諸領域の知見が、今後の保全計画策定の鍵となる可能性がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって、関西電力株式会社の御協力をいただいた。

参考文献

- [1] 藤井秀樹、関村直人、“コスト重要度を用いた保全計画策定手法に関する研究”、日本保全学会第 1 回学術講演会要旨集、2004、pp.179-181。
- [2] 望月雅文、関村直人、古田一雄、“大規模人工システムの保全におけるオンラインメンテナンスの有効性の定量的評価手法”、日本保全学会第 1 回学術講演会要旨集、2004、pp.183-185。
- [3] 日本機械学会、“発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格(2005年版)(増訂版)”、JSME S CA1-2005
- [4] 日本機械学会発電用設備規格委員会、“発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格”、2006