

# 確率論を利用した複数配管の保全・設計最適化手法の開発

## Development of Maintenance and Design Optimization Method for Piping System Based on Stochastic Theory

株式会社 IIU	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	Member
日本原子力発電株式会社	江浪 久	Hisashi ENAMI	Non Member
株式会社 IIU	角皆 学	Manabu TSUNOKAI	Member

The conventional design of structural components such as piping or vessels is made based on the deterministic method. In the design method, the margin of the design integrity is expressed as empirical safety factor. On the other hand, the stochastic safety factor is calculated from data such as the standard deviation of the material strength in the LRFD (Load and Resistance Factor Design) method. This method allows a rational design based on the up-to-date knowledge. In this study the optimization method of maintenance and design has been developed for piping system based on the LRFD method. The effect of SCC to the strength of the piping is taken into account. The periodic inspection of SCC is simulated using the probabilistic model. The database of the inspection results as field data is used to estimate the timing of SCC generation through the Bayesian statistics.

**Keywords:** LRFD, SCC, piping system, optimization of maintenance and design, Bayesian statistics

### 1. 諸言

原子力発電所の事故・故障の起因部位としては、配管に関係するものが大きな比率を占め、その大部分が高経年化によるもので、疲労、応力腐食割れ、熱時効、腐食等の劣化モードが挙げられる。従って、プラントの安全性を確保するために、配管の設計段階においては、経年劣化を適切に予測・評価し、検査と保守の効果を検討した上での、合理的な安全設計が必要とされている。

従来の決定論的設計手法においては、材料や構造の持つ強度、及びそれに係る荷重についてのバラつきに対して、経験的な安全率を用いる事で、安全裕度を担保してきた。これに対して現在様々な分野で適用されつつある確率論的設計手法は、強度や荷重の確率分布を考慮する事によって安全裕度を担保しようとするものである。

本研究は、確率論的設計手法である LRFD (Load and Resistance Factor Design、荷重・耐力設計) 法を拡張し、原子力発電プラントの配管系を対象とした保全・設計最適化手法を開発するものである。

また、用いる確率変数に対して、保全活動の中で得られるフィールドデータを蓄積し、統計処理を行って活用する事を想定する。

### 2. LRFD 法

ASME セクション III に代表される決定論的設計手法に対して、LRFD 法は確率論的設計手法に分類され、様々な分野に適用されている。

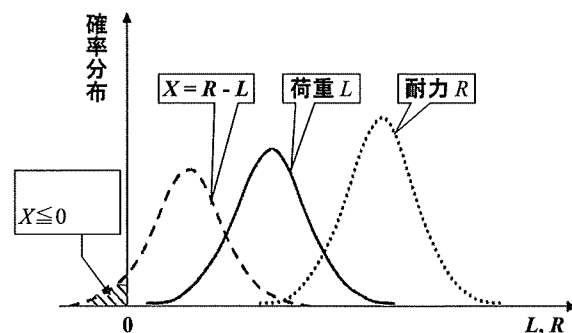


Fig.1 Schematic conception of LRFD

Fig.1 は LRFD 法の概念図である。構造物に係る荷重と材料の強度等を表す耐力はそれぞれ確率分布を持つものとする。破損確率は荷重が耐力を上回る確率に相当する。

LRFD 法では、予め定めた破損確率の上限値を満足するように、各種設計パラメータを設定する事で安全裕度を担保する。荷重や材料強度に関する確率分布の知見が十分に利用可能な場合には、従来の決定論的設計手法と比較して、より合理的で整合性のある設計が可能となる。

### 3. 開発手法

#### 3.1 主な特徴

以下、本開発手法の特徴について述べる。

- ① LRFD 法を拡張した、確率論的設計・保全最適化手法である。

上記 LRFD 法に基づく確率論的最適化手法である。ただし、LRFD 法は元来、設計を最適化する為の手法である。我々はこれを拡張する事で、設計及び保全によって、目標とする信頼性を担保する手法とした。

- ② 配管溶接部に生じる SCC の発生・進展の影響を考慮している。

配管溶接部に生じる SCC (Stress Corrosion Crack、応力腐食割れ) は原子力分野における重要な経年劣化事象である。

本開発手法は、供用期間において配管溶接部に生じる SCC の発生・進展が設備信頼性に与える影響を考慮している。

- ③ SCC に対して行う、検査や保修といった保全行為の効果を考慮している。

実際の原子力プラントでは、経年劣化事象に対して様々な形で保全行為を行い、設備の健全性、安全性を確保している。配管系に生じる SCC についても同様であり、ECT や UT といった非破壊検査手法により、その発生及び進展状況を把握している。また、検出された SCC については、ある基準を超えて進展した場合でも、配管取換等を行う事により、配管系全体としては、引き続き使用していく事が可能である。

そこで、本開発手法では、定期検査をモデル化しシミュレートする事で、SCC が設備信頼性に与える影響に、定期検査及び保修がどのような効果をもたらすかを評価している。

- ④ GA (Genetic Algorithms、遺伝的アルゴリズム) によって複数配管よりなる配管系についての信頼性や、検査・保修・製造コスト、機能喪失時のリスクに関する最適化を行う。

複数の配管よりなる配管系において、それらの使用環境等が一様で無い場合には、ある配管はそ

他の配管と比して安全裕度が大きくないといった具合に、配管系全体から見た保全上の重要部位が生じる。例えば大きな内圧の係る部位には、(相対的に製造コストの高い) 肉厚の大きな配管を使用する必要がある。また、配管自体が同程度の信頼性を持つ場合であっても、より重要な系統に属する配管の方に、設計・保全のリソースを投入する事が望ましい。この様に、使用環境や重要度が一様でない配管系における信頼性及び製造コストのバランス問題に対して、GA を用いた最適化を行う。

その際、最適化目標としては、以下の3種類のいずれかを選択出来る。

- a) 機能損失確率を目標値以下に抑えつつ、(製造コスト+検査コスト+保修コスト) を最小化する。  
b) (製造コスト+検査コスト+保修コスト) を目標値以下に抑えつつ、機能損失確率を最小化する。  
c) 機能損失をコストに換算し、上記コストにリスクとして追加した総コストを最小化する。

最適化パラメータは、それぞれの配管における「厚さ」及び「検査周期」である。

- ⑤ SCC 発生時期に関しては、ベイズ更新モデルを適用する事で、蓄積されたフィールドデータからの確率分布推定を模擬している。

本手法において特に重要なパラメータである SCC 発生時期に関しては、知見が十分でない場合に於いても、その時々での知見に基づいた分析を行う事を想定している。フィールドデータの蓄積に伴って、想定する確率分布が真の分布に近づく事で、より高い最適化効果が得られるようになる。

#### 3.2 分析フロー

本開発手法の分析フローを Fig.2 に示す。

##### (1) SCC 発生・進展評価

SCC は材料、環境、及び残留応力に関する3条件が揃った場合に発生する事が知られているが、これらの要素にはそれぞれバラつきが有る為、SCC 発生時期は確率分布を持つ事になる。

確率分布としては、Weibull 分布を想定する。運転時刻  $t$  において SCC が発生している確率  $W(t)$  は式(1)

で与えられる。

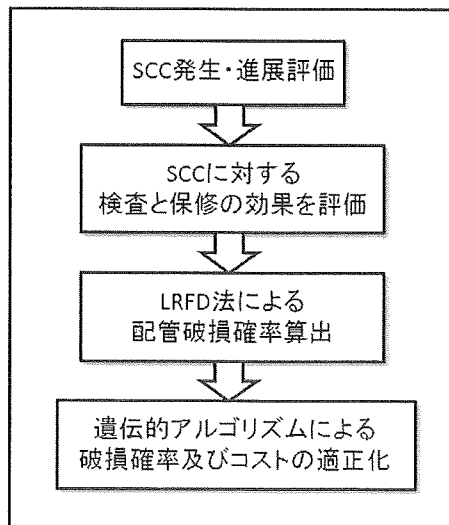


Fig.2 Flow of developed method for optimization of piping system

$$W(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^m\right\} \quad (1)$$

式(1)中のパラメータ  $m$  及び  $\beta$  については、後述の様に、プラント運転中において SCC 検査結果を蓄積し、知見を更新していくモデルを採用している。

SCC の進展については、日本機械学会維持規格<sup>[1]</sup>を参考にし、応力拡大係数に基づいて評価する。応力拡大係数の算出は、与えられた荷重曲げモーメントや熱膨張応力等に基づいており、またそのバラつきについては ASME の報告書<sup>[2]</sup>を参考に設定した数値を用いている。

#### (2) SCC に対する検査と保修の効果を評価

配管系の保全手法としては、時間計画保全 (TBM : Time-Based Maintenance) を考え、配管に対する SCC 検査は、13 カ月毎 (或いは 18 カ月毎) に実施される定期事業者検査の期間中に実施する事を想定する。従って SCC 検査の実施間隔は、数定検に一度という形で表現する事とする。

SCC 検査については、検出確率 (POD : Probability Of Detection) を考慮する。これは検査時の SCC 深さの関数として与えられ、検査員の技量を表すものである。さらに SCC 発見時の深さサイジング能力についても誤差の形でその影響を考慮する事としている。

検査の結果、SCC が発見された場合には、予め定める基準値と比較して、保修あるいは進展管理のいずれかが選択される。進展管理に際しては進展速度が考慮され、次回検査時までには基準値を超えてしまうと判断される場合には、やはり保修の対象となる。

#### (3) LRFD 法による配管破損確率算出

LRFD 法は元来、設計の為の手法であるが、我々はこれを拡張し、保全の効果を取り入れた。具体的には、SCC の進展の程度を配管肉厚の減少と類似の効果として考慮する<sup>[3]</sup>。

例えば、SCC の検査頻度が高ければ SCC が発生した場合でも早期に検出・保修される可能性が高くなり、SCC による配管強度の減少はあまり深刻にならない。逆に、検査頻度が低ければ、SCC の進展による配管強度の減少をある程度見込む必要が生じる。

この様に、検査の頻度や検出確率等を含めて、SCC の進展の程度を確率評価し、設計パラメータの一部として取り込む。

LRFD 法では、与えた設計パラメータに対する破損確率が算出される。設計パラメータを変化させつつ評価する事で、目標とする信頼性を担保する為の設計条件を求める事が出来る。開発手法における数値計算手法としては、反復処理を行う Rackwitz-Fiessler アルゴリズムを実装している。

#### (4) 遺伝的アルゴリズムによる破損確率及びコストの適正化

本開発手法は最終的には、前述した最適化目標を満足する設計・保全のパラメータを求めるものである。最適化パラメータの数は、対象を  $N$  本の配管とした場合、それぞれの配管に対して厚さ・検査周期の 2 パラメータが有り、システム全体では計  $2N$  個となる。

配管は JIS (日本工業規格) に準拠した規格品を用いる事としており、厚さを変化させる場合、外径によって定められた数種類の厚さから選択する事になる。そのため、検査周期だけでは無く厚さもまた、離散化された値を取る。

この  $2N$  個のパラメータの離散化された最適化問題を解くため、数値計算においては遺伝的アルゴリズムを適用し、予め与えた最適化目標を満足する、配管の厚さ及び検査周期の組が求められる。この際、各配管の使用環境や相対的な重要度が考慮される。

### 3.3 フィールドデータに基づくベイズ更新

本開発手法においては、SCC の発生と進展を取り扱っているが、SCC の発生時期に関しては、使用環境等への依存性が大きく、実際の現場への適用を考えた場合、確率分布が既知である事を前提とする事は出来ない。

それにも関わらず、本開発手法の最適化の結果に大きな影響を持つ事から、SCC の発生時期に関しては、ベイズ統計の適用を模擬出来る手法としている。

想定するシナリオは、プラントの稼働に伴って得られる SCC 検査結果をデータベースとして蓄積し、ベイズ更新を適用する事で、SCC 発生時期に関する確率密度分布をより確からしいものに近づけ、保全（及び次期設計）の最適化効果を高めていくというものである(Fig.3)。

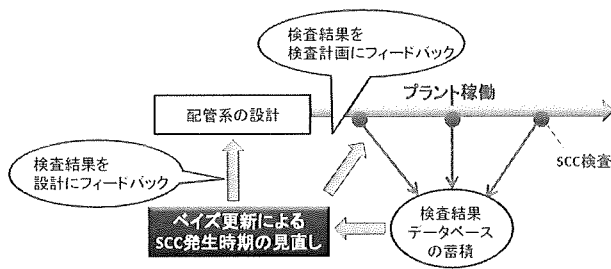


Fig.3 Strategy of optimization of design and maintenance based on the database of SCC inspection results

ある事象が生起する頻度としての確率を、主観によらない客観確率として捉えたとき、ある命題のもっともらしさ、あるいはその根拠となる信念・信頼の度合いを表す数値としての確率を主観確率と呼ぶ。ベイズ確率とは、客観確率に主観確率をも含めた広義の確率の事である。

頻度主義では不確かさはランダム性にのみ基づく。これに対してベイズ主義では情報が不足していることにも基づく。従ってプラントの運転等に伴って、SCC 検査結果に関する情報が蓄積されると、ベイズ確率としての SCC 発生時期の分布は変化していく。

情報取得前の確率分布を事前確率分布、取得後の確率分布を事後確率分布といい、確率分布の更新はベイズの定理に従う。

2つの事象 A,B がある時、

$$\Pr\{B|A\} = \frac{\Pr\{A \cap B\}}{\Pr\{A\}} = \frac{\Pr\{B\} \cdot \Pr\{A|B\}}{\Pr\{B\} \cdot \Pr\{A|B\} + \Pr\{\bar{B}\} \cdot \Pr\{A|\bar{B}\}} \quad (2)$$

をベイズの定理という。ここで、 $\Pr\{A\}$  は事象 A の発生

確率であり、 $\Pr\{A|B\}$  は事象 B が起こったという条件下における事象 A の発生確率である。

数値シミュレーションに際しては、SCC 検査の結果を蓄積したデータベースを乱数によって生成し、ベイズ更新へのインプットとする (Fig.4)。SCC 発生時期に関するバラつき、進展速度に関するバラつき、検査時の検出確率を考慮の上、SCC 検査毎の発見・未発見を登録し、また発見時にはそのサイズをサイジング誤差も考慮した上で合わせて登録し、模擬データベースとした。運転経験の蓄積は、データベースに登録されるデータの数として表される。

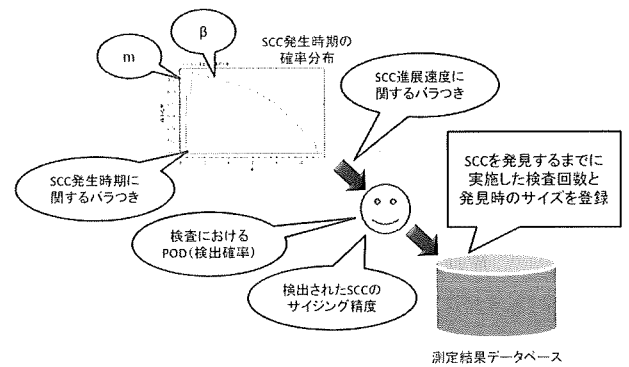


Fig.4 Simulated database of SCC inspection results

模擬データベースに基づくベイズ更新においても、検出確率やサイジング精度といった要素は考慮される。例えば、検出能力の低い作業員が作成したデータベースについては、SCC が見つからなかった場合においても、見落としの可能性を考慮し、保守的に評価する事となる。

## 4. 数値シミュレーション例

### 4.1 解析対象

ここでの解析対象は、実際の配管系を参考にして設定を行ったものである。Table 1 に 2 種類の配管の使用環境パラメータの一部を示す。

Table 1 Piping of sample simulation

(単位 :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

配管名	内圧による 応力	自重による 応力	熱膨張による 応力
A	4.18	0.22	5.31
B	3.56	0.13	9.05

配管の重要度に応じた保全・設計リソースの分配を模擬する目的でA、Bの配管はそれぞれ3本ずつあるものとし、それらの重要度を1:10:100と設定した。即ち計6本(A1,A2,A3,B1,B2,B3)の配管系の最適化問題である。選択可能な配管肉厚は最小6.4mm～最大33.3mmまでの9種類である。

## 4.2 計算結果

### 例1) データベースの品質の影響評価

データベースの品質が最適化に与える影響を見る為に、SCC 発見の有無のみが登録されたデータベース「サイズ登録なし」と SCC 発見の有無に加え、発見時のサイジング結果が登録されたデータベース「サイズ登録あり」の比較を行った。

ここでの最適化目標は、コスト（製造コスト+40 サイクルの保全コスト）を予め定めた設定値以下にするという制限の下での、配管系の信頼性最大化である。

SCC 発生時期の真の確率分布を、式(1)において  $m=2, \beta=5$  年としたものと仮定する。実際にはこれらのパラメータは既知ではないので、事前分布を  $m$  及び  $\beta$  について一様分布とし、蓄積した SCC の検査結果データベースに基づいて SCC 発生時期を推定し、その値を用いて保全・設計の最適化を行う。データベースに登録されたサンプル（検査結果）の数は 20 とした。

Fig.5 は最適化結果を比較したものである。縦軸は信頼性指標として、炉心損傷確率を相対値化したものであり、比率のみが意味を持つ。横軸はデータベースを作成した際の SCC 検査間隔である。「サイズ登録なし」「サイズ登録あり」のどちらのケースも、SCC 検査間隔が短い程、より精度良く SCC の発生時期を推定出来る為、より高い信頼度（より低い炉心損傷確率）を達成出来ている事が判る。

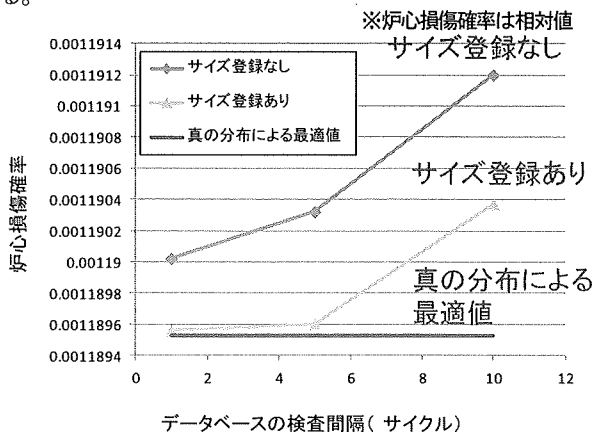


Fig.5 Comparison of reliability optimization results

「サイズ登録あり」のデータベースでは、登録されたサイズをヒントとして、SCC 発生時期を精度良く推定出来る。従って「サイズ登録あり」のデータベースを利用した方が、常に良い最適化結果を得る事が出来ている。

特に、サイズが登録されている場合においては、SCC 検査頻度が 5 サイクルに 1 回のケースでほぼ真の分布と同様の最適化結果が得られている。

### 例2) SCC 発生を遅く見積もっている場合

事前分布として、SCC 発生時期について実際より遅く見積もっている場合には、設計・保全の最適化を行ったと思っても、実際には想定より早く SCC が発生してしまう為、信頼性については更なる向上の余地が残る。

Fig.6 はこのようなケースを模擬したものである。真の値を  $\beta=5$  年と設定した上で、 $\beta$  の事前分布を平均 10 年の正規分布とし、フィールドデータを蓄積していく事で思い込みが解消される様子を表している。

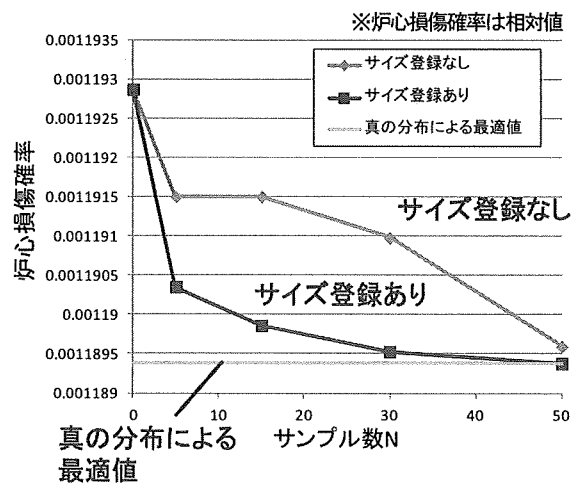


Fig.6 Reliability optimization dependency on number of samples

データが蓄積されるにつれてより高い信頼度を達成出来ている。「サイズ登録あり」のケースでは「サイズ登録なし」のケースと比較して少ないサンプル数で真の分布に近い最適化結果が得られている。また、「サイズ登録なし」のケースであってもサンプル数が 50 程度集まった時点では、十分に最適化が進む結果となっている。

### 例3) SCC 発生を早く見積もっている場合

例2 とは反対に、実際よりも SCC が早く発生すると見積もっている場合には、必要以上に検査を行う事によっ

て保全コスト面での改善の余地が生じる事が予想される。

ここでの最適化目標は、信頼性を予め定めた値以上に保ちつつ、また配管の厚さは変更しないという条件の下で、検査周期のみをパラメータとして、検査コストと保修コストの和を最小化する事とした。

Fig.7 は真の値  $\beta = 5$  年に対し、 $\beta$  の事前分布を平均 2 年の正規分布とし、フィールドデータを蓄積する効果を模擬したものである。

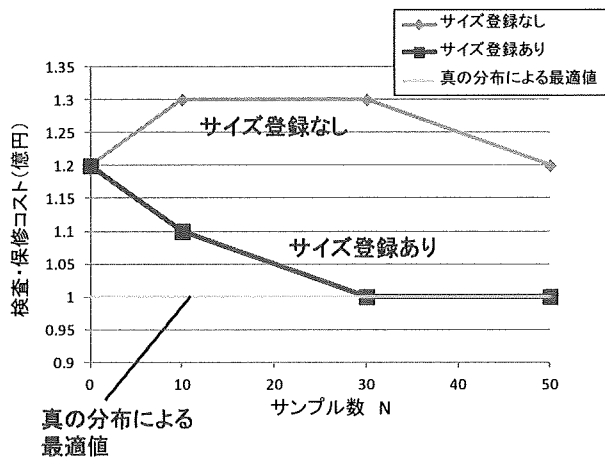


Fig.7 Maintenance cost optimization dependency on number of samples

「サイズ登録あり」のデータベースを用いた場合、データを蓄積する事で、始めは過度に実施していた検査の周期が延長され、保全コストが減少していく。そしてデータ数 30 程度で、真の分布に近い最適化結果が得られ、初期状態と比べて 2 割程度のコスト削減効果が達成されている。

一方「サイズ登録なし」の場合、SCC 発生時期の推定精度が悪いためサンプル数が増えても保全コストは削減出来ない。サンプルデータは乱数によって生成しているため、データ数が少ない内にはバラつきによって逆にコスト増となってしまう。

## 5. まとめ

本研究では、LRFD 法を拡張した複数配管の保全・設計最適化を行う確率論的手法を開発してきた。SCC 発生時期に関してベイズ更新の考え方を適用する事により、フィールドデータの蓄積とともに高い最適化効果を

得るシナリオを想定している。

SCC 検査結果データベースの構築に際しては、SCC の発見時のサイズを登録する事で、より少ないデータ数でより高い最適化効果が得られる事を、数値シミュレーションにより示した。これは、データベースは登録されたデータの数だけではなく、データの品質もまた重要である事を示している。

データベース構築の為に初期投資を行う事は、保全・設計の最適化を推し進めるために有用であり、データベースの質が高い程、その効果は大きいと考えられる。また、データベースが成熟するまでデータ収集を行えば、蓄積の効果は飽和するので、それ以降の収集作業は打ち切って良い。ここで行った数値シミュレーションの結果では、蓄積の効果が飽和する迄のデータ数は数十程度のオーダーであった。

## 謝辞

本研究は平成 23 年度に原子力発電株式会社からの委託研究により実施された成果の一部である。委託元の関係者には、ご教示いただきましたことに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] “発電用原子力設備規格 維持規格(2008 年版)”, 日本機械学会
- [2] “Interim research report : Development of reliability-based Load and Resistance Factor Design (LRFD) methods for piping”, ASME, 2005
- [3] Kentaro Takase, Hisashi Enami, Manabu Tsunokai, Noriko Kodama and Kenzo Miya, “Optimization of piping system based on LRFD method and SCC growth estimation” Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, ICONE19-43524