

# 予測コードとリスク評価

## AC Estimation code and Risk Evaluation Based on the Code

エネルギー総合工学研究所	内田 俊介	Shunsuke UCHIDA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	内藤 正則	Masanori NAITOH	Non-member
エネルギー総合工学研究所	岡田 英俊	Hidetoshi OKADA	Non-member
エネルギー総合工学研究所	鈴木 洋明	Hiroaki SUZUKI	Non-member
東京大学	越塚 誠一	Seiichi KOSIZUKA	Non-member

FAC risk has been defined as the mathematical product of the possibility of wall thinning occurrence and its hazard scale. The possibility of wall thinning occurrence was designated as the time margin for pipe rupture determined by applying a one-dimensional FAC code, which could predict wall thinning rate with an accuracy within a factor of 2, while the hazard scale was defined as the volume of effluent steam and water from the ruptured mouth, which was enthalpy of water originally flowing in the pipe multiplied by the square of the pipe inner diameter. High FAC risk zones along entire cooling systems could be evaluated only in a tenth or a hundredth of computer time for 3D FAC code to determine the priority for inspection order importance.

**Keywords:** flow-accelerated corrosion, wall thinning, mass transfer coefficient, geometrical factor, risk, computer program, system safety analysis

## 1 . 緒言

1次元(1D)流動解析の迅速性を活用し、PWRおよびBWRプラント主要部について、1D流動解析コードで算出した直管内面の物質移行係数に、種々の配管形状に対するKeller型の形状係数を乗じ、様々な部位での当該部位における最大減肉速度を求める。この最大減肉速度と当該部位の配管径、材質、圧力、温度から求められる最小限界厚さから配管評価する。さらに、減肉速度および最小限界厚さの不確かさを考慮して、破断確率を定量化して、プラント寿命中における減肉発生の可能性の高い箇所を抽出する。同時に、減肉により配管破損が生じた場合の安全性への影響を、放出される可能性のある蒸気量を想定した指標(ハザードスケール: エンタルピーと管断面積の積に比例)を用いて評価して、発生確率と影響度の両面からFACのリスクを評価可能とするシステム安全手法を提案した。

## 2 . 1D 減肉速度解析コード DREAM-FAC

1D FACコードでは、Figure 1に示す6ステップの3D解析コードの最初の3ステップを用いて減肉速度を求める [1]。配管の主要データは設計書からあらかじめ準備しておき、特に材質、主としてCr含有量を求めておく。ステップ1では1Dの流動計算コードで流路に沿っての温度、流速分布を求める。この結果を用いて、直管の物質係数を算出し、これにKeller型の形状係数(すでに様々な改善された形状係数が報告されている)を乗じて、当該部位での最大物質係数を求める [2]。ステップ2では、酸素-ヒドラジン反応の解析に基づき $[O_2]$ の分布を求める。近似的な減肉速度は、温度、pH、 $[O_2]$ 、材料中のCr濃度 $[Cr]$ そして物質移行係数の関数で表される。pHと材料中の $[Cr]$ を加えた5つのパラメータを用いて、ステップ3では、各部位の最大減肉速度を求める。

## 3 . 評価結果

Verification & Validation法(V&V法)による3D FACコードの妥当性評価 [3]と同様のプロセスで、1D

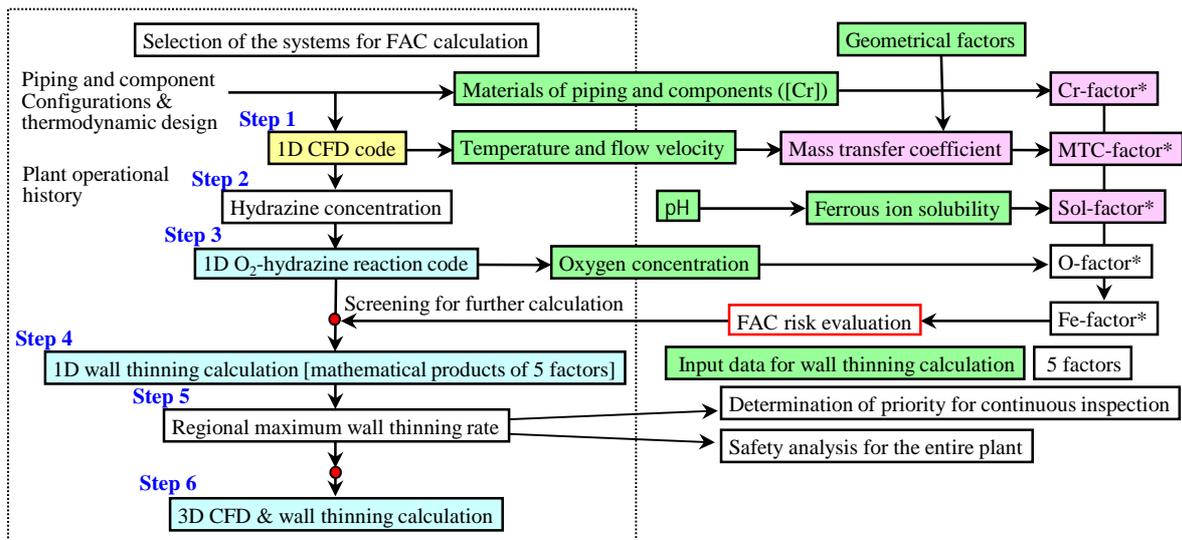


Figure 1 Calculation procedures and major input data of 1D FAC code (DREAM-FAC)

コードの妥当性評価を行った。実機 PWR の曲管、T 字管で実測された減肉速度、実験室系で測定されたオリフィス下流部での減肉速度の最大値を用いて解析結果の妥当性の確認 (Validation) を実施した。評価結果を Figure 2 に示す[4]。減肉速度が小さな領域では、測定誤差が大きく、減肉速度が負となるケースも散見され、一部予測最大値が実測値を下回るが、概ね予測精度ファクター 2 を確保できることが示された。

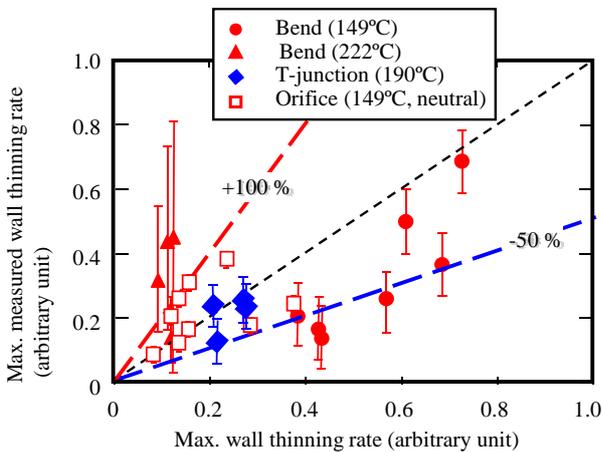


Figure 2 Comparison of calculated results with 1D FAC code and measured maximum values

#### 4. 予測と監視の融合

Figure 3 に示すシステムの主要箇所での最大減肉速度を求めた。

上記評価点について 1D FAC コードで計算した減肉速度および配管の初期肉厚と最小限界厚さの差

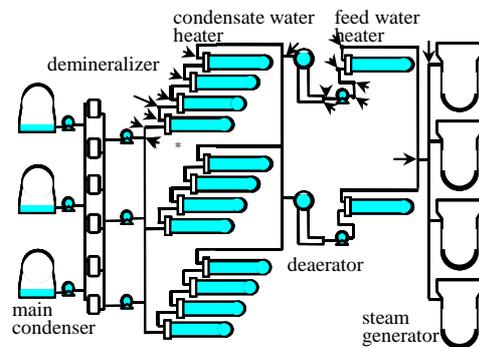


Figure 3 Schematic diagram of PWR secondary cooling system

( $T_w - T_{w_{min}}$  : 減肉余裕厚さ) を Figure 4 に示す。

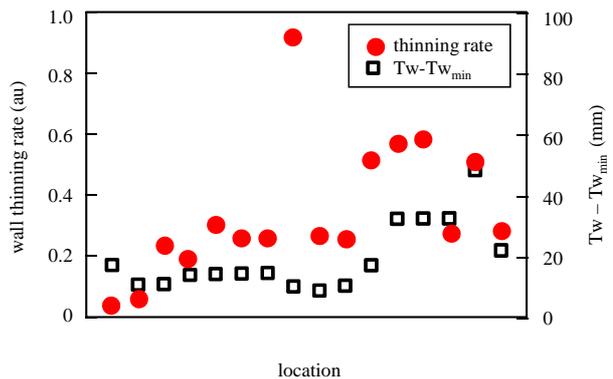


Figure 4 Wall thinning rate and thinning margin

減肉余裕厚さと減肉速度だけからでは、平均的な配管破断までの時間余裕しか求めることができないが、減肉余裕厚さと減肉速度の確率分布を導入することにより、破断確率を定量化することでできる。減肉速度の予測誤差、ファクター 2 と最小限界厚さの安全係数、ファクター 4 [5] を適用し、残存肉厚が

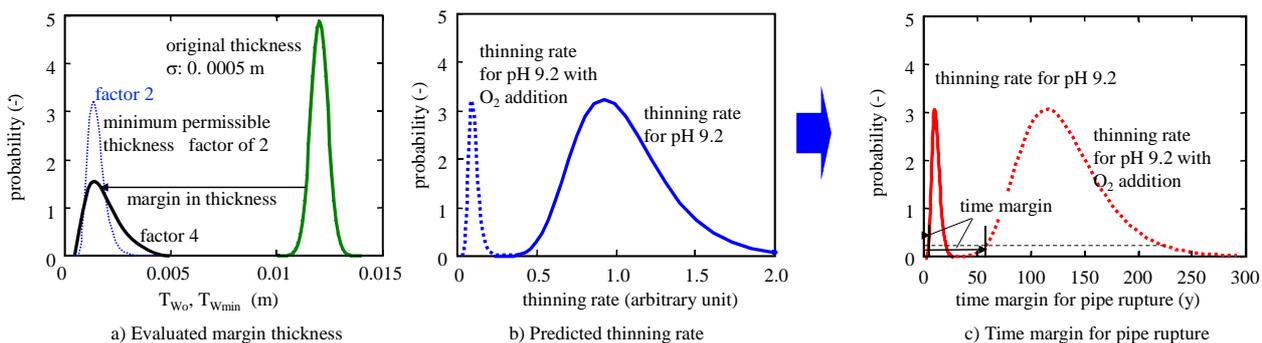


Figure 5 Probability distributions of thinning rate, margin in thickness and rupture time

最小限界厚に達したときに配管が破断すると仮定して、それぞれの最確値に基づく、Figure 5 に示すような確率評価を行った [6]。

すなわち、配管の初期肉厚については測定誤差を考慮し、最小限界厚是最確値に対してファクター4に相当する確率分布を与えた。この差が残存肉厚に相当 (Figure 5 a) し、これを減肉速度 (Figure 5 b) で除したものが破断までの時間余裕 (Figure 5 c) となる。プラント運用中の肉厚測定については適宜初期厚さを変更し、その時点からの時間余裕を求める。こうして求めた破断までの時間余裕確率分布の 5% を損傷に至るまでの時間余裕と定義した。

Figure 6 に減肉が進行し、損傷に至るまでの時間余

裕と損傷の影響の大きさ (ハザードスケール) についての評価結果を示す。ハザードスケールとしては破断した場合の周辺への影響の大きさを示す指標として配管の断面積と液体のエンタルピーの積で示している。この定義は、今後適宜見直しが必要と考える。

損傷に至るまでの時間余裕とハザードスケールの間には、Figure 6a) に示すように、特に相関はなく、両者をそれぞれ評価することにより FAC 高リスク領域を予測することが可能となる。損傷に至るまでの時間余裕が小さく、ハザードスケールの大きな部位が FAC 高リスク領域となる (Figure 6b) )。FAC 高リスク領域の予測に基づき、優先監視区域の効率的な選定に資する。一方、監視の結果得られた残存肉厚および減肉速度のデータは、解析コードの精度検証に適用され、解析高度の改良による精度向上に資する。また、FAC 高リスク領域については、Figure 1 に記載したように、詳細な 3D 流動解析とそれに引き続き 3D FAC コードによる減肉形状の評価を効率的に行うことが可能となる。

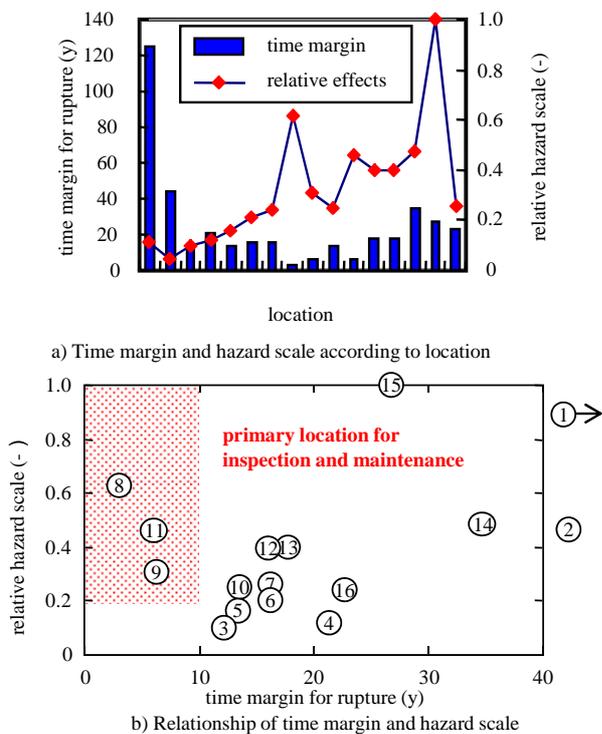


Figure 6 Probability analyses of time margin and hazard scale of pipe rupture

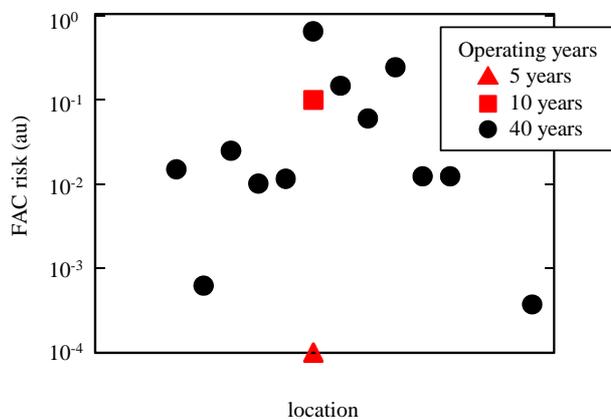


Figure 7 FAC risk

FAC リスクを FAC による配管の破断確率とハザードスケールの積として表すと、Figure 7 に示すように、運転時間の短い間は、リスクは発生確率で決まり、長期運転にあると、ハザードリスクの影響も含まれてくる。このため、簡単には両者の積で表すことも有用であっても、Figure 6 に示すような 2 次元表示での評価が間違いないものとする。

## まとめ

冷却システム全体にわたる主要部位での最大減肉速度を 1D FAC コードで算出し、減肉速度および最小限界肉厚の評価誤差を考慮して、配管破断に至る時間余裕を算出すると共に破断の影響の大きさを加えて、FAC リスクを算出した。リスクに応じて優先計測部位を定めると共に、監視データに基づき、評価精度の更なる向上に資する。

## 謝辞

本研究は、高経年化評価技術高度化事業（フェーズ 1：NISA；H18-22）で開発された配管減肉に関する検査・診断による監視技術とシミュレーションによる予測技術に基づき、同上事業（フェーズ 2：NISA NRA；H23-24）で、予測技術と監視技術を合体・融合させ、新しい予測・監視手法の確立を図ったもの

である。

## 参考文献

- [1] S. Uchida, M. Naitoh, H. Okada, H. Suzuki, S. Koikari, S. Koshizuka and D. H. Lister, "Determination Procedures of High Risk Zones for Local Wall Thinning due to Flow-Accelerated Corrosion", *Nucl. Technol.*, 180
- [2] W. Kastner, M. Erve, N. Henzel and B. Stellwag, "Calculation Code for Erosion Corrosion. Induced Wall Thinning in Piping System", *Nucl. Eng. Design*, **119**, 431 (1990).
- [3] S. Uchida, M. Naitoh, H. Okada, T. Ohira, S. Koshizuka and D. H. Lister, "Verification and Validation of Evaluation Procedures for Local Wall Thinning due to Flow Accelerated Corrosion and Liquid Droplet Impingement", *Nucl. Technol.*, 178 (3) 280 (2012).
- [4] H. Suzuki, S. Uchida, M. Naitoh, H. Okada, Y. Nagaya, Y. Tsuji, S. Koshizuka and D. H. Lister, "Verification and Validation of 1D FAC Code for Determination of High FAC Risk Zones", *Nucl. Technol.*, **183** (1), 62-74 (2013).
- [5] American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Section, II, Materials, p.460, July (2010).
- [6] H. Suzuki, M. Naitoh, H. Okada, S. Uchida, S. Koikari, S. Koshizuka and D. H. Lister, "Determination Procedures of High Risk Zones for Local Wall Thinning due to Flow Accelerated Corrosion", *Nucl. Technol.*, **183** (1), (2013) in press.

（平成 25 年 6 月 7 日）