



発電プラントの 配管減肉管理における肉厚検査の 最適化を目指して



発電プラントの配管肉厚検査風景

(出典:「原子力の科学館あっとほうむ」ホームページ、原子カトピックスNo.151-4、福井原子力センター)

原子力や火力の発電プラントでは、水や蒸気が出る配管の肉厚が徐々に薄くなる「配管減肉現象」が一般的に発生します。配管は決められた厚さ以上の肉厚がないと使用できないため、プラントでは配管の肉厚検査による管理が行われています。配管の肉厚の減少傾向を十分に把握できないと、配管の破損事故につながる可能性があります。過度に保守的な管理では検査箇所数が膨大となり、検査の時間や作業量などを必要以上に充当することになります。

電力中央研究所では、減肉速度が大きい部位や余寿命の短い部位を確実に特定して、集中的に検査することにより、プラントの安全性向上と検査の効率化が両立するような肉厚検査の最適化を目指して、現象メカニズムに基づいた減肉予測手法の開発と、発電プラントの現場での実用化に向けた研究を行っています。

配管減肉現象と肉厚検査による管理

発電プラントの配管減肉現象

2004年8月、関西電力美浜発電所において、140℃の水が流れる口径54cmの配管が破断し、大量の高温蒸気が漏れたため、作業員11名がやけどにより死傷する事故が発生しました。配管が破断した原因は、配管の肉厚が運転年数とともに徐々に薄くなっていく「減肉」と呼ばれる現象でした。減肉現象の主なもの、流れ加速型腐食(FAC: Flow-Accelerated Corrosion)と液滴衝撃エロージョン(LDI: Liquid Droplet Impingement Erosion)の二つです。FACは、配管内面の腐食が水の流れにより助長される現象で(写真1、図1)、美浜発電所の配管破断の原因でもあります。FACは比較的広い範囲にわたり減肉するため、大規模な配管破損を生じる可能性があります。一方、LDIは蒸気が高速で流れる配管の中で、流れに含まれる微小な水の粒(液滴)が配管内面に衝突し、その衝撃力により配管材料が破損する現象です(写真2、図2)。LDIは減肉範囲が局所に限定される場合が多いため、検査による検知が難しいですが、配管が破損したとしても小規模に留まります。



写真-1 FACによる配管減肉事例
(出典:NUCIA通番2490、添付資料)

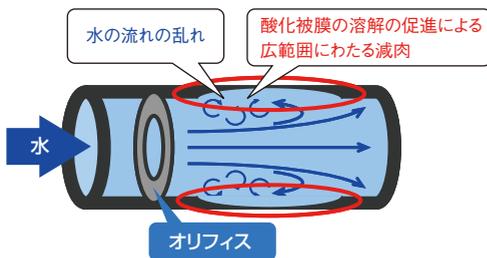


図-1 FACの模式図(オリフィス下流の場合)
オリフィス:管径を細くして流量を測定する所

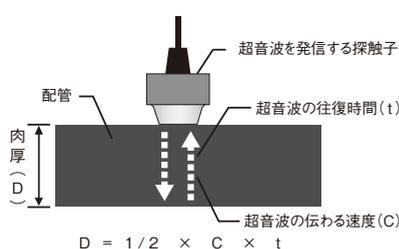


図-3 超音波厚さ計による配管肉厚測定の実験装置の原理

$$D = 1/2 \times C \times t$$

配管減肉管理の現状と課題

日本国内では美浜発電所の事故を受けて、2005年～2006年に日本機械学会において配管減肉管理に関する規格と、要求事項を具体化した技術規格が策定されました。これらの規格では、配管の肉厚測定値を用いた減肉速度および余寿命評価に基づく管理が規定されています。そして原子力および火力発電プラントにそれぞれ対応した技術規格に則り、配管の減肉管理が行われています。

配管の肉厚測定には、通常、超音波厚さ計(図3)が用いられ、配管の周方向と軸方向にそれぞれ特定の間隔で設定された測定点に対して、肉厚を複数回測定することで減肉傾向を把握し、余寿命の評価(図4)が行われています。現行の規格では、プラントによっては一回の定期点検で肉厚測定部位が千箇所以上と膨大な数に及ぶことがあります。しかし、減肉速度が大きい部位や余寿命が短い部位を特定できれば、そうした部位を集中的に検査することにより、プラントの安全性向上と肉厚検査の効率化に役立つと考えられます。そのための方策として、配管減肉に対する定性的・定量的な予測手法を減肉管理に導入することが挙げられます。



写真-2 LDIによる配管減肉事例
(出典:NUCIA通番8269、添付資料)

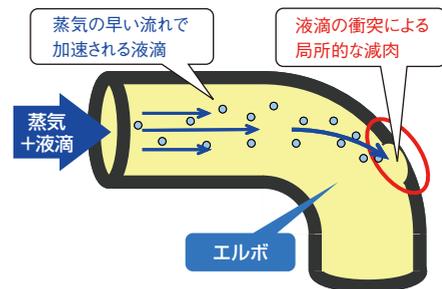


図-2 LDIの模式図(エルボの場合)
エルボ:配管の曲り部

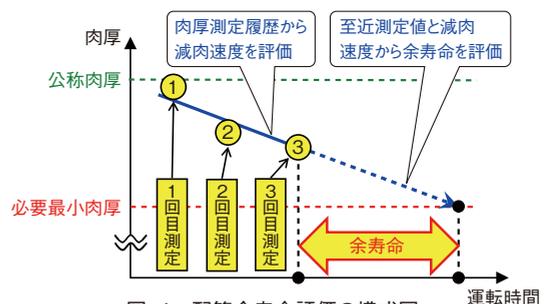


図-4 配管余寿命評価の模式図

配管減肉予測手法の開発

当研究所では、基礎的な実験や数値計算から得られたデータ、および現象メカニズムに基づいた理論式などを用いて、流動、水質、材料などの因子が複合的に関与するFACおよびLDIによる減肉速度の予測手法を開発しています。

流れ加速型腐食 (FAC) による減肉予測手法の開発

FACは、主として炭素鋼^{*}製の配管の内面に形成された腐食を防ぐ働きがある酸化皮膜(マグネタイト、 Fe_3O_4)の溶解が、水の流れによって促進される現象です(図5)。この中で、マグネタイトの溶解易さ(溶解度)と、溶出した鉄イオンが水に流される物質移動が、FAC現象の評価において重要な要素と捉え、当研究所ではこの双方の効果の積を基本としたFACによる減肉予測式を構築しました。溶解度の評価においては、水の温度、酸性度(pH)、溶存酸素濃度などの水質因子や、配管材料のクロム含有率等の材料因子の影響を考慮しています。一方、物質移動の効果の評価においては、配管内の平均的な流速だけでなく局所的な流れの乱れも含めた流動因子の影響を考慮しています。この予測式により、配管の曲り部(エルボ)等におけるFACによる減肉傾向を概ね予測できるようになりました(図6)。

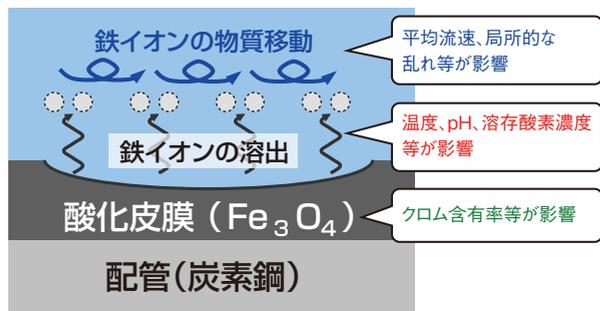


図-5 FACに対する影響因子

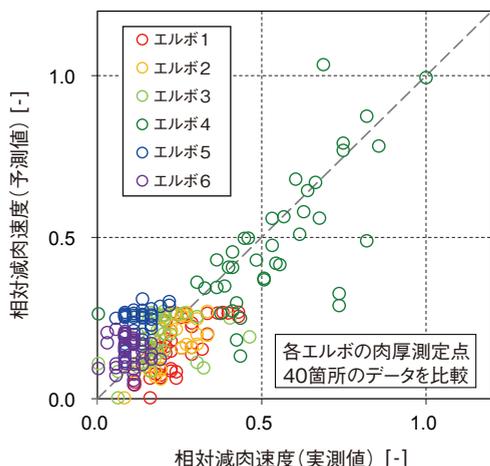


図-6 FAC予測手法によるエルボの肉厚測定点における減肉速度

液滴衝撃エロージョン (LDI) による減肉予測手法の開発

LDIは、液滴の衝突により配管材料が物理的・機械的に破損する現象であるため(図7)、LDI現象の評価においては、衝突する液滴の挙動に伴い配管材料に作用する衝撃圧と、衝突される配管材料の強さをそれぞれ評価する必要があります。これに対して当研究所では、特に流動因子である液滴の挙動に着目し、配管内における液滴の数、大きさ、流速、飛跡等を、実験データから導いた独自の相関式や三次元の流体数値計算データ等を用いて詳細に評価しています。また、配管内面に薄い水の膜(液膜)が存在する場合に液滴の衝撃圧が緩和される効果についても評価しています。これらの流動因子に、主な材料因子である材料硬度を加えて、各因子の影響を考慮したLDIによる減肉予測式を構築しました。この予測式により、配管エルボにおけるLDIによる減肉傾向を、FACと同様に概ね予測できるようになりました(図8)。

^{*}炭素鋼:鉄と炭素の合金で、炭素含有量が通常0.02%~約2%の範囲の鋼。加工が容易で廉価なので一般的によく使用される鉄鋼材料。

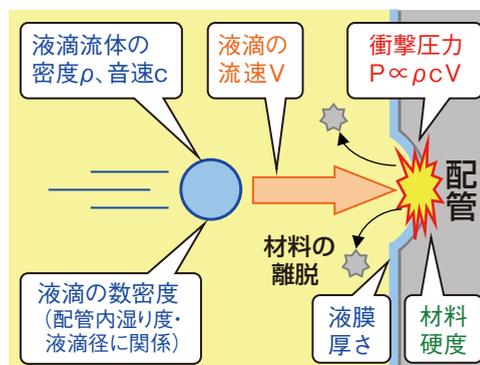


図-7 LDIに対する影響因子

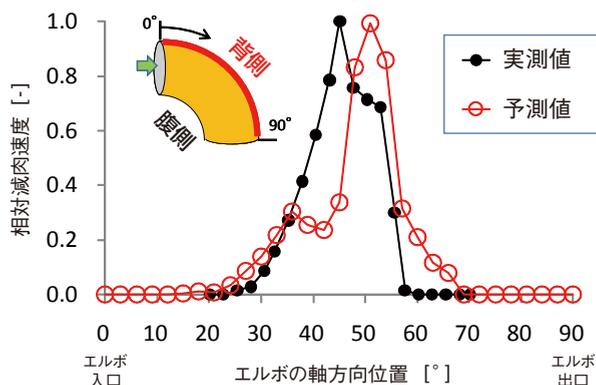


図-8 LDI予測手法によるエルボの減肉傾向

配管減肉予測ソフトウェアFALSETの開発と実用化に向けて

配管減肉予測ソフトウェアの開発

当研究所が構築したFAC/LDI予測手法が、発電プラント配管の減肉管理において簡便に利用できるように、配管減肉予測ソフトウェアFALSET (FAC and LDI Prediction Software for Pipe Wall Thinning)を開発しています。FALSETでは、評価対象のプラント配管の諸条件(圧力・温度・流量・水質や各部位の寸法・材料など)に関する情報を入力することにより、各部位における最大減肉速度を予測し、余寿命を評価することができます。この予測・評価結果は、パソコンの画面上でカラー表示され(図9)、減肉管理における優先度が高い部位が視覚的に理解しやすくなっています。またFALSETでは、予測式による予測結果と、発電プラントで実測された配管肉厚データの経時変化(減肉速度)とを比較して、配管の余寿命に基づいて補修・取替時期を検討することができます。

これまでに、原子力発電プラント数基の主要系統配管の肉厚測定データを用いて、FALSETの予測精度の検証を行い、残余肉厚を誤差±10%以内の精度で概ね予測できることを確認しました(図10)。FALSETの予測精度は実機適用が可能なレベルに達しつつありますが、今後さらに検証を進めて必要な改良を行い、精度向上を図る予定です。



図-9 FALSETの減肉速度分布表示画面

実用化に向けて

前述の通り、国内の現行規格では肉厚測定に基づく配管減肉管理が規定されているため、FALSETを用いた減肉予測手法を管理に導入するには、実測と予測とを適切に組み合わせる規格への改訂が必要です。予測手法を管理に適用する具体例として、肉厚測定回数が少なく実測値を用いた余寿命評価の信頼性が低い部位、あるいは水質改善等の運転環境条件が変更され減肉傾向の変化が想定される系統などに対して、検査時期の最適な設定が可能になり、プラントの安全性向上に役立つと考えられます。このような管理手法の改善を可能とすべく、今後、学会での現行規格の改訂作業にも参画し、FALSETの実機プラント管理での実用化を目指します。

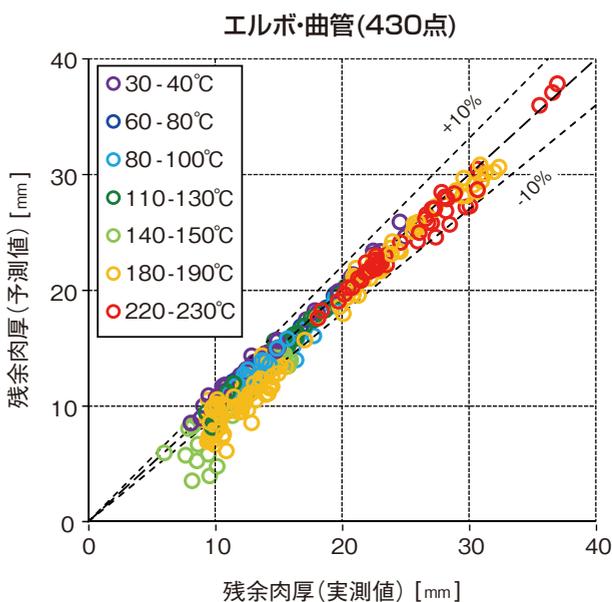


図-10 FALSETによる残余肉厚の予測精度

ひとこと

原子力技術研究所 原子炉システム安全領域 上席研究員 米田 公俊

配管減肉現象は原子力や火力の発電プラントに限らず、水や蒸気が流れる配管において、昔から普遍的に発生する現象です。欧米諸国では、特にFACに関して多くの事例・事故を経験してきたこともあり、20年以上も前からプラント管理に予測手法を導入しています。この観点で日本は後進国であり、当研究所では国外の既存知見を参照しつつ、これに独自の新しい評価技術を加えて、減肉予測手法およびソフトウェアを開発しています。国内プラントの管理における予測手法の導入による検査の適正化とさらなる安全性の向上に貢献できればと考えています。



| 関連する研究報告書 | L11007「配管減肉予測ソフトウェアFALSETの開発」

報告書は当所ホームページよりダウンロードできます