

〔特集〕原子力を巡る流れと熱の研究の最前線

軽水炉冷却材流れが構造に及ぼす影響に関する研究動向

* (財) 電力中央研究所 原子力技術研究所 稲田 文夫†

The Trend of Studies on Effect of LWR Coolant Flow on Structural Integrity

Fumio INADA, Nuclear Technology Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

1 まえがき

軽水炉発電は日本の電力の約 1/3 をまかなっており、極めて重要なエネルギー源である。

一方、国の原子力委員会は、2005 年 10 月に原子力分野の研究開発を含む今後の長期的取り組み、あり方を示した「原子力政策大綱」¹⁾を作成した。この中では原子力の研究、開発及び利用に関する基盤的活動の強化が謳われており、高経年化対策や日常保全の高度化、原子炉出力向上などの課題に取り組むことへの期待が示されている。

これを受け、学会などでこれらの分野の研究開発ロードマップが作成され、産業界での研究や、原子力安全保安院の高経年化対策強化基盤整備事業などが開始された。さらに日本原子力発電(株)の東海第二原子力発電所を対象として、出力向上を実施する具体的な計画の検討が開始された²⁾。冷却材流れに伴う劣化現象は、これらのロードマップの中で解決すべき課題の一つとして位置づけられる。

本稿では、冷却材流れに伴う劣化現象の中で、配管減肉および流動によって励起される構造物振動(Flow Induced Vibration, FIV)について、最近の研究動向について紹介する。なお、熱疲労も重要な現象であるが、日本機械学会でその評価法の規格³⁾も制定されていることから、本稿では扱わなかった。

2 軽水炉の冷却水流れによって生じる劣化現象

軽水炉の冷却水流れによって生じる劣化現象には、配管減肉、FIV、熱疲労などがある。また配管減肉は、流れ加速型腐食(Flow Accelerated Corrosion, FAC)、液滴衝撃エロージョン(Liquid Droplet

Impingement Erosion, LDI)、キャビテーション・エロージョンなどに分類される。これらについて、現象の発生頻度や破損による漏洩の影響度の観点で、それらの重要度について考察する。

まず Swedish Radiation Safety Authority において調査された、各劣化現象が報告された割合⁴⁾を表 1 に示す。流動はあまり関係がないと考えられる応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking, SCC)の諸現象と並んで FAC が約 28%を占めており、また熱疲労と機械振動と合わせると流体流れに起因する劣化現象は半数弱を占めることがわかる。機械振動は、全てではないが多くが FIV によるものと推測される。国によって管理が違い、差はあるとは思われるものの、これらの現象の重要性が高いことを示している。

一方、米国 Electric Power Research Institute (EPRI) は、1961~1997 年にわたって約 2000 炉年の劣化事例を調査し、各現象毎の配管の破断率を算出した(表 1 参照)⁵⁾。その結果 FAC と機械振動の破断率が高い反面、熱疲労や SCC は破断率が低く、大破断に至る前に対策がとられているようである。

以上より、FAC と FIV は発生頻度が比較的高く破断にも至る現象であることから、重要性が高いと言える。また FAC は、軽水炉の主系統配管に用いられる口径 50cm 以上の大口径管でも発生するため、特にその管理が重要であると言える。

3 配管減肉

3.1 FAC とエロージョン

配管減肉は、2004 年 8 月に美浜原子力発電所 3 号機 2 次系配管で発生した破断事故の原因とされている。この事故以降、本現象は流体が流れる多くのプラント配管に見られ、安全上の重要課題であることと

* 〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1

† E-mail: inada@criepi.denken.or.jp

もに、管理対象箇所が多く定検工程へ影響を与え稼働率に影響しうることから保安全管理上も重要な課題であることが広く認識された。この事故を契機として肉厚測定によって配管減肉を管理するための技術規格⁶⁻⁸⁾も制定された。現在、より効率的な管理を行うため、各機関でその予測法の開発が行われている。

配管減肉の原因は、最近までエロージョン・コロージョンであるとされてきた。しかし最近の知見⁶⁾では、FACとエロージョンに分けて説明がなされる。

FACは、水単相流や蒸気-水二相流系のオリフィス下流やエルボなどの偏流部で、腐食(コロージョン)現象が流れの乱れによる物質移動の増大により顕著に進む現象で、主として炭素鋼で発生する(図1(a))。

エロージョンは、高速の液滴の壁面への衝突(図1(b))やキャビテーション気泡の崩壊時の衝撃圧によって機械的に損傷する現象である。原子力発電設備で発生するエロージョンは、液滴衝撃エロージョン(Liquid Droplet Impingement Erosion: LDI)と、キャビテーション・エロージョンがあるとされている。LDIは、蒸気系配管においてオリフィスなど絞り部で蒸気と共に液滴が加速され、液滴の慣性によってエルボ下流部の背側・T字管などの流れ方向が変化する部分で液滴が配管壁面に衝突して発生する。また、絞り部の形状によっては、直後に液滴が衝突して減肉したという事例もある。キャビテーション・エロージョンは、絞り部下流で生じる圧力降下により蒸気泡が生じ、それが下流側の圧力回復により潰れて衝撃圧が発生して生じるとされている。

上記を壁面への作用力の観点で比較してみると、FACが顕著となるような水単相流配管(流速3m/sec程度)では10Pa程度のオーダの小さな値となる⁹⁾。一方エロージョンの場合の衝撃力は、水撃理論をベースとした評価が可能とされ、100MPaからGPaオーダに及ぶと言われている⁶⁾。これらの衝撃圧は、炭素鋼の疲労強度が約100MPa程度であることを考慮すれば、減肉の発生に充分と考えられる。

このように減肉のメカニズムが異なれば、そのパラメータ影響や対策も異なってくる。従って、FACとエロージョンとは流体力学的観点で区別して議論すべきものであると言える。

表1 各現象の発生頻度と破断確率

	Degradation reported in Swedish plants ⁴⁾	Rupture frequency per reactor year ⁵⁾
FAC	28%	1.2×10^{-2}
SCC(IGSCC)	28%	3.8×10^{-5}
SCC(TGSCC, IASCC, PWSCC)	4%	
Corrosion	5%	1.2×10^{-3}
Thermal Fatigue	9%	3.8×10^{-5}
Mech. Fatigue	8%	1.2×10^{-2}

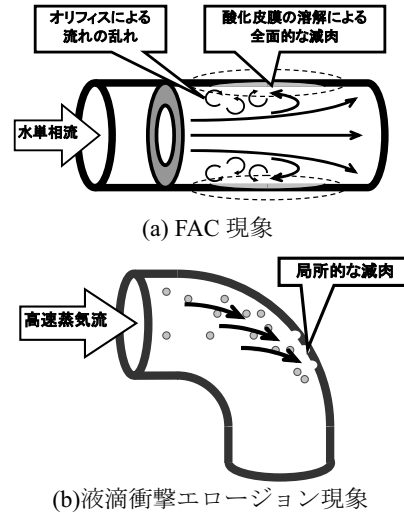


図1 代表的な配管減肉現象

3.2 流れ加速型腐食(FAC)の研究動向

3.2.1 FACの評価モデル

FAC現象の中で乱流による物質移動は重要な因子であるが、鉄イオンの溶出や酸化膜内の拡散などもモデル化の必要がある。現状ではFAC現象の全体モデル自体が研究対象であると言える。

その中で、Sanchez-Calderaのモデル¹⁰⁾はフランスの配管減肉管理で実績がある予測コードBRT-CICEROで使用されている。

Sanchez-Calderaのモデルでは、FAC過程は以下の3つの素過程で表現可能であるとしている(図2)。

- (1) 鉄の母材表面から、水による酸化により Fe^{2+} が生じる過程
- (2) 過程(1)で生成した Fe^{2+} イオンが、多孔質体である酸化膜中の空隙を通して拡散する過程
- (3) 酸化膜表面から Fe^{2+} イオンがバルク水中に拡散する過程

上記の3つの過程を定式化すると、減肉率 R_T の予測式は、以下のように求められる。

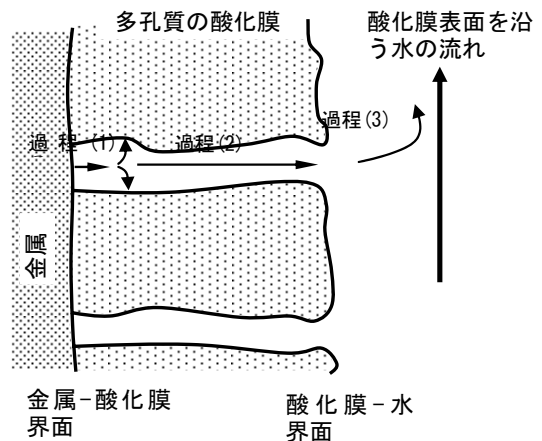


図2 Sanchez Caldera ら¹⁰⁾のFACモデルの模式図

$$\frac{(C_{eq} - C_{\infty})\theta}{R_T} = \frac{1}{K^*} + (1-f) \left(\frac{\delta}{D} + \frac{1}{k} \right) \quad (1)$$

ここで、 K^* は Fe^{2+} の生成のための反応速度定数、 θ は酸化膜の空隙率、 C_{eq} と C_{∞} はそれぞれ、 Fe^{2+} の溶解度とバルク水中の Fe^{2+} の濃度、 f は酸化した鉄がマグネタイトになる割合、 δ は酸化膜の厚さ、 D は当該系の温度における水中の鉄の拡散係数、 k は物質移動係数である。式(1)より、 K^* 、 D 、 k の中で一番小さい過程が律速となることがわかる。またこれらのパラメータ値が大きくなれば、減肉率も高くなる。

反応速度定数 K^* は、一般に様々な物質が温度依存で劣化していく現象を表すアレニウス則 $K^* = A \cdot \exp(-E_a/RT)$ で表されるとされる。ここで A, E_a は材料や環境に対して固有の定数、 T は絶対温度、 R は気体定数である。

Fe^{2+} イオンの溶解度 C_{eq} 、酸化膜の空隙率 θ は、FACに大きく影響する pH や酸素注入、あるいは材料の微量 Cr の効果などを表す材料因子、水化学因子を表す重要パラメータである。

式(1)の中で重要な流動因子は、物質移動係数 k であり、次節で説明するように乱流伝熱とアナログがあるとされている。

3.2.2 乱流による物質移動のモデル

一般に円管内など壁面を沿って乱流が流れる場合、壁面からの物質移動と熱伝達にはアナログがあるとされている^{11,12)}。このアナログのモデルはいくつかあるが、ここでは簡便で比較的精度が高いとされている Chilton-Colburn¹³⁾のものを説明する。

Chilton-Colburn は、熱移動と物質移動に関する様々な実験データから、下記の関係があるとした。

$$f/2 = N_u / (\text{Re} \cdot P_r^{1/3}) = S_h / (\text{Re} \cdot S_c^{1/3}) \quad (2)$$

ここで、 N_u は熱伝達率の無次元数であるヌッセルト数($= \frac{hd}{\lambda} = \frac{|q_w|d}{\lambda(T_s - T_{\infty})}$)、 P_r はプラントル数、 Re と S_c は次式のレイノルズ数とシュミット数である。

$$\text{Re} = dU_m/\nu, \quad S_c = \nu/D \quad (3)$$

この関係に、摩擦損失係数 f として Blasius の式

$$f/2 = 0.0395 \text{Re}^{-1/4} \quad (4)$$

を代入すれば、以下ようになる。

$$N_u = 0.0395 \text{Re}^{0.75} P_r^{1/3}, \quad S_h = 0.0395 \text{Re}^{0.75} S_c^{1/3} \quad (5)$$

一方乱流伝熱および物質移動では、しばしば実験式として、以下の Dittus-Boelter の式が使われる。

$$S_h = kd/D = 0.023 \text{Re}^{0.8} S_c^{1/3} \quad (6)$$

Dittus-Boelter の式は、式(5)と類似の形をしている。

ここで Fick の法則によれば、 ε 、 ε_H 、 ε_D をそれぞれ渦動粘度、渦熱拡散率、渦拡散係数とし、 α を温度伝導率 ($=\lambda/c_p\rho$ 、 λ は水の熱伝導率、 c_p は水の比熱、 ρ は水の密度)とすると、乱流場の剪断応力 τ 、熱流束 q 、物質流束 J は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \tau &= -\rho(\nu + \varepsilon) \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad q = -\rho c_p (\alpha + \varepsilon_H) \frac{dT}{dy}, \\ J &= -\rho(D + \varepsilon_D) \frac{d\bar{\omega}}{dy} \end{aligned} \quad (7)$$

式で u は流速、 ω は Fe^{2+} イオンの質量分率であり、 $\bar{\quad}$ はアンサンブル平均を表す。

壁面近傍には粘性底層と呼ばれる層領域があるが、浅野¹¹⁾によれば、粘性底層内では分子輸送が乱流渦拡散と比較して支配的となり、

$$\varepsilon \ll \nu, \quad \varepsilon_H \ll \alpha, \quad \varepsilon_D \ll D \quad (8)$$

として、式(7)を解析的にも示すことができる。

式(2)で注目されるのは、 S_h や N_u が摩擦損失係数と関係があることである。ただし物質移動が剪断力により剥離する現象であることを意味してはいない。両現象は乱流境界層内の輸送現象と関わり、また摩擦損失係数も乱流境界層の流速分布で決まってくることから、式(2)のような関係が得られている。

ここで粘性底層の厚さは、FACが発生しやすい工業用配管中を水が流れる場合(約3~5m/sec, 150°C程度)について計算すると、約100 μm の場合のオーダーである。一方引き抜き管の表面粗さは約1.5 μm 程度であり、表面粗さの影響は小さいと言える。

FACによる配管減肉が発生すると、表面に鱗片状の模様ができ表面が粗くなるが、この場合の管内流の摩擦損失については、流体の分野では有名なムーディ線図がある。この線図によれば、粘性底層厚さより表面が粗くなると、壁面がなめらかな場合の Blasius の摩擦損失係数から大きくはずれてくる。Chilton-Colburn のアナログでは粘性底層内の物質移動を仮定しているため、このような粗い面に対してのアナログの成立性は今後検討の必要がある。

この他のアナログとして、乱流拡散が分子輸送と比較して支配的であるとする Reynolds のアナログなどがあるが、詳細は文献^{11,12)}を参照されたい。

3.2.3 物質移動に関する研究動向

これまでも偏流部の乱流伝熱や物質移動についての研究はなされてきている。

まずプラントにおける FAC 評価では、直管部の物質移動は 3.2.2 節で説明したアナログより式(6)を用いて求め、偏流部の物質移動は形状係数として直管部との比として与えるエンジニアリング的な評価が

なされている(Keller¹⁴).

また、偏流部の局所の物質移動を求めた例としては、Wang¹⁵はエルボについて、汎用数値流体解析コードCFXを用い、乱流モデルとして一般的なk-εモデルを使用し、物質移動の保存式もたてて評価している。また結果をAchenbach¹⁶による流れの中のナフタリンの昇華に関するデータと比較し、傾向としてよく一致することを示している。

さらにKrall¹⁷は、オリフィス下流部の乱流伝熱について、局所におけるヌッセルト数 N_{ud} と直管部における N_u との比を求め、配管径の2倍の軸方向位置でピークがでることや、 Re に対する影響、様々な研究者の結果との比較などを行っている。本結果は物質移動と乱流伝熱とのアナログも考慮すれば、配管減肉にも参考となる結果である。

しかし、偏流部の乱流伝熱や物質移動に関する研究は十分とは言い難く、またChilton-Colburnのアナログの偏流部での成立性についても、課題として残されているようである。

一方2004年の配管減肉による美浜事故以降、まえがきで説明した研究開発ロードマップと対応して様々な研究が開始され、流動因子の検討も活発化している。

現状で公表されているものには、偏流部のCFD解析やPIV計測により、その流動挙動を把握したもの¹⁸、CFD解析とLDV計測により流動分布を把握するとともに減肉実験を実施して、剪断力と減肉挙動とを比較したもの^{19,20}、将来的に物質移動係数を算出することを念頭に、偏流部のCFD解析を行っているもの^{21,22}などがある。式(2)で物質移動係数が壁面剪断力と密接な関係があることを考えれば、壁面剪断力で整理するのは理にかなった検討とも言える。

著者の所属するグループでも、CFD解析とPIV計測を元に流動分布を把握し、Chilton-Colburnのアナログを元に偏流部の局所物質移動係数を求めることを試みている^{23,24}。この研究では、壁面近傍の粘性底層内の乱流速度を加味した実効摩擦速度を用いた局所物質移動係数を提案し、偏流領域の減肉実験結果と比較し、減肉率との間により相関が得られることを示している(図3)。

今後乱流理論の基礎に立ち返って、偏流部の乱流による物質移動のメカニズム解明が期待される。

3.3 液滴衝撃エロージョン(LDI)の研究動向

次に配管減肉のもう一つの重要な要因であるエロージョンについて説明する。

エロージョンの中でキャビテーション・エロージ

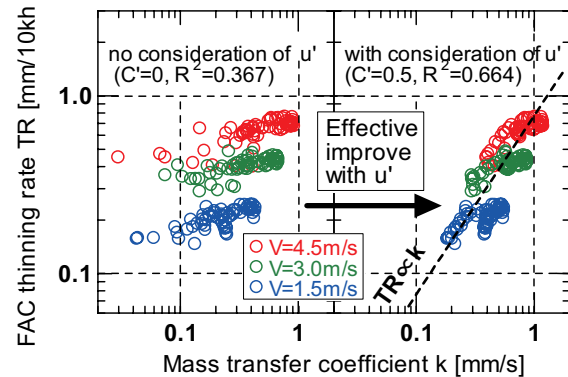


図3 壁面近傍の粘性底層内の乱流速度を加味した実行摩擦速度を用いた局所物質移動係数^{23,24}

ョンが重要であるのは、議論の余地がないであろう。一方キャビテーションは、キャビテーション係数により発生条件がある程度予測できる。プラント管理ではその発生が疑われる箇所は定期的に検査するなどの、設計から運用に至る総合的管理がある程度可能である。また体系的にとりまとめられた著書²⁵もあることから、本稿では扱わない。

以下では最近事例が散見し、日本機械学会規格でも管理が求められている液滴衝撃エロージョン(LDI)について説明する。

LDIの事例は、復水器につながるベント系におけるものが目立ち、この場合は負圧であるためピンホールが開いても外気を吸い込むこととなる。また抽気系やドレン系など、正圧の系統の例もある。破損状況を見てみると、文献によれば調査したすべての事例で口径の小さいピンホールであり、破断に至った例は見あたらない。すなわちFAC(流れ加速型腐食)のような大破断に至る可能性はあまり高くないと考えられている⁶。

3.3.1 液滴衝撃エロージョンの評価法(LDI)

液滴衝撃エロージョンについては、基本的に以下の手順で評価がなされる。

- (1) CFDコードで対象となる系統の流速を求める。
- (2) 流速と湿り度、音速などを入力とする液滴-材料相互作用のモデル式から減肉率を予測する。

過程(1)については、LDIが問題となる蒸気系は圧縮性流体であるため、流れ方向に圧力が降下すると流速が上昇し、流速分布を解析する必要がある。また過程(2)で使用可能な評価法としては、Sanchez-Caldera¹⁰により、減肉速度 \dot{m} (m/h)の予測式として以下が提案されている。

$$\dot{m} = \frac{C_p \dot{m}_{tot} (1-x) V^4 F_e F_h}{p^2 \varepsilon_c^2 A_c} \quad (9)$$

ここで C は実験値に基づく減肉係数で、 1.1×10^{-6} 、 ρ は液体密度、 V は液滴速度、 x はクオリティ、 \dot{m}_{tot} [kg/h] は系の質量流量、 A_c [m²] は液滴が衝突する領域の面積、 F_e は液滴のエントレインメント率、 F_h はヒッピングファクタ（エルボなどの形状によって決められる係数）である。また、 P [Pa] は酸化皮膜あるいは母材の弾性率、 ε_c は酸化皮膜の破壊に必要なひずみの蓄積量である。

Sanchez-Caldera の式では、減肉率が流速の 5 乗に比例し、これは実験結果と整合する傾向と言われている。しかし基本的に平均損傷深さを求めるもので、局所の減肉率の算出には液滴が衝突する面積 A_c を推定する必要がある。

3.3.2 液滴-材料相互作用の素過程のモデル

液滴が衝突するときの液滴-材料相互作用の素過程のモデルとしては、以下のものがある。

まず局所の衝撃力のモデルはいずれも水撃理論をベースおり、また実験的に衝撃圧を求めた例としては、Rochester ら²⁶⁾により衝撃圧力の計測結果から、水撃圧 ρCV の 0.7 倍で近似できるとしている。ただし文献内で、衝撃力の計測センサの大きさや時間分解能が十分でない可能性も述べている。

計算例として、150m/sec の液滴の場合の衝撃圧は約 270MPa となり、炭素鋼の疲労限界応力を超える。

一方、液滴衝撃エロージョンによる減肉率が液滴流速の 4~5 乗に比例することから、ある流速以下ではエロージョンの発生がほぼ無視できる最小エロージョン発生流速が存在すると言われている。この流速を求めたものとして Shinogaya ら²⁷⁾は、水や水銀を用いた実験により、純鉄で 100m/sec、炭素鋼で 110m/sec としている。また鶴田らは、回転盤を用いた試験²⁸⁾で、18-8 ステンレスに対する水のエロージョン限界流速を 70m/sec としている。

3.3.3 液滴衝撃エロージョンの最近の研究動向

液滴衝撃エロージョンにより大破断が発生する可能性は低いと考えられるが事例も散見することから、2004 年の美浜事故以降各機関で研究が開始された。

服部ら²⁹⁾は、水噴流が様々な材料に与えるエロージョン特性を調べ、限界流速や減肉率の流速依存性を求めている。この分野では、材料表面の酸化膜の効果、すなわち損傷するのが酸化膜か母材かが議論となっており、各機関で研究が進められている。

一方著者らのグループでは、森田により CFD と Sanchez-Caldera の式などとを組み合わせて、減肉率を予測するための統合化された以下のようなシステムを構築している（図 4 参照）^{30,31)}：

- (1) 対象となるシステムの流動場を CFD 解析する。このために、3次元圧縮性流体解析が可能な LES モデルの CFD コード MATIS³²⁾を使用する。状況に応じて三次元計算、二次元計算を行う。
- (2) 上記で求めた流動場に液滴を乗せ、液滴の壁面への衝突を解析する。液滴径は、別途実験により求めてデータベース化してある。
- (3) 壁面への液滴の衝突速度から、Sanchez-Caldera の式(9)を用いて局所の減肉率を算出する。

今後このような評価システムを充実化させるとともに、エロージョン損傷に対する酸化膜の効果などの減肉のメカニズムを解明し、その中で使われる最小エロージョン発生流速や減肉率の流速依存性などの相関式を整備していくことが重要と考える。

4 流動によって励起される構造物振動(FIV)

4.1 音響共鳴現象によって生じる疲労

FIV も、1991 年の美浜 2 号機蒸気発生器伝熱管破断事象における気液二相直交流中の管群の流力弾性振動や、1995 年のもんじゅ温度計さや管破損事象に

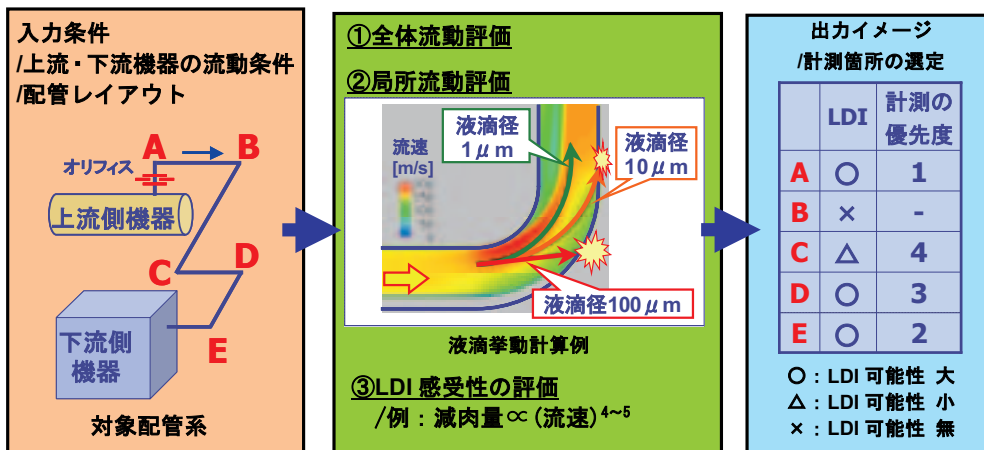


図 4 液滴衝撃エロージョンの減肉率を予測するための統合化されたシステムの例^{30,31)}

おける円柱構造物の渦励振など、注目を集める事象を引き起こしてきた。これまでにこれらの現象について日本機械学会で評価規格^{33,34)}が整備されている。

一方、圧力脈動が配管内を伝わって口径の大きい母管に接続された計測などに使われる小口径管や炉内構造物を疲労破損させた事例が最近散見される。

事例での圧力脈動源は、以下のものがある：

- (1) 回転翼を持つポンプから発生する、羽根通過周波数（羽根枚数×圧縮機回転数）およびその高調波成分を持つ圧力脈動（ポンプ後流の N, Nz 振動）
- (2) 蒸気加減弁を絞ったときに、絞り部で発生する超音速乱流に起因する圧力脈動
- (3) SRV（逃がし安全弁）など先が閉じた分岐管部で発生するキャビティトーン現象

以下ではこれらの現象の研究動向を説明する。

4.2 中間開度時の蒸気加減弁に起因する圧力脈動

蒸気系で使用される圧力調整弁では、起動時などの小開度時に、すきまの狭い部分で音速となる激しい流れとなり、大きい圧力変動源となる。この圧力変動に起因して、弁体そのものの損傷、および弁下流側の小口径管の損傷、下流側にとりつけられた機器の誤動作等が発生した例がある。

この圧力変動は広帯域の周波数成分を有しており平面波としてだけでなく、発電所の主蒸気系配管のような 50cm を超える大口径配管では高次モードの圧力脈動として伝播する場合があります。管壁に高次のシェルモードの共振現象が発生して、予想以上に下流側まで圧力波が伝播する場合があります³⁵⁾。

本現象は一般に定格運転では小さくなるため、通常運転時は問題とならない場合が多い。

小開度時の蒸気系の弁に起因する振動現象については、最近森田ら（例えば文献 36)）、米澤ら（例えば文献 37)）により精力的に CFD 解析および空気や蒸気による実験的な研究が行われている。これらの研究により、弁が中間開度の時にのみ、弁周辺の流れの一部が弁体に付着して局所的な高圧が発生し、それが配管の周方向に回転してスパイク状の圧力変動現象が発生すること、本現象が弁体の振動も引き起こしうることを、弁座に流れが付着するように弁体形状を工夫すると、振動抑制に有効であることなどが明らかになっている。

4.3 ポンプ後流の N, Nz 振動

ポンプは一般に回転数 N (rpm) と、その翼枚数をか

けた成分、さらにはその高調波成分の圧力脈動源となる。本現象は下流側配管にとりつけられた小口径管の疲労破損の原因となりうる。

田中・森³⁸⁾は最近、ポンプで誘起された圧力脈動について、配管は伝達マトリックス法で、容器内は 3次元音響解析コード SYSNOISE により解析し、圧力脈動が容器内にどのように伝わるかを評価しており、実験も行っており、共鳴振動数、モード形状、卓越圧力脈動値の予測を試みている。

4.4 キャビティトーン現象の研究動向

キャビティトーン現象は逃がし安全弁など先が閉じた分岐管つけ根部で、自由剪断層が不安定となり、剪断層が後縁に衝突するときに圧力波が生じて上流側に伝播し、前縁の剪断層にフィードバックして、大きな笛吹音が発生する現象である（図 5、図 6）。

本現象は米国 Excelon 社の Quad Cities 2 号機で、17.8%の出力向上を実施したときに、主蒸気管の電動逃がし安全弁(Electromatic Relief Valves, ERV)で発生した当該圧力脈動が炉容器内に伝播し、蒸気乾燥器を破損させた現象として知られている。本プラントでは現象把握のためのプラントデータが取得されるとともに、当該現象を減衰させるために、化学プラントなどで対策として使用される音響サイドブランチ(Acoustic Side Branch, ASB)がとりつけられた³⁹⁾。

キャビティトーン現象については、これまで Weaver ら⁴⁰⁾により体系的に研究がなされ、発生条件が分岐部の音響固有周波数 f 、分岐管の直径 d 、主流速度 u とするときのストロハル数 ($St = fd/u$) で整理できることを示すとともに、分岐管付け根部の R の影響も、分岐管直径に加えればよいことを示した。

基本的な特性は Weaver らによりほぼ解明されているが、国内プラントでの出力向上時の影響評価を念頭に、最小発生流速のより正確な把握、蒸気系へ

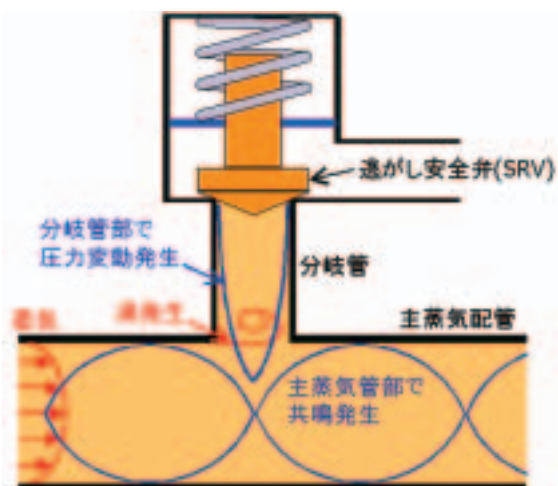
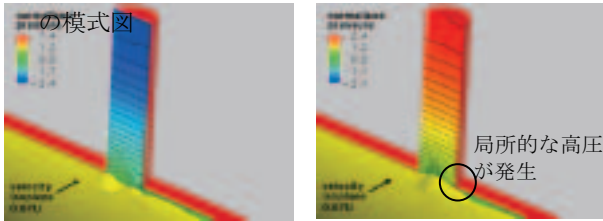


図5 分岐管部で発生するキャビティートーン現象の模式図



(a) 枝管部近傍の圧力分布・速度ベクトル・速度の等値面(左：圧力変動の最小値付近，右：圧力変動の最大値付近， $St : 0.424$)



(b) 枝管部天端の静圧時間履歴($St : 0.391$) (c) St 数に対する圧力変動振幅

図6 キャビティートーン現象の解析例⁴¹⁾

の適用性などを把握するため、国内で最近いくつか研究が行われている。たとえば森田ら、高橋らは、分岐部の流動挙動を詳細な CFD 解析により予測し、ストロハル数で整理すれば空気と湿り蒸気で相似性があることを示すとともに、実機を詳細に模擬した 1/10 スケールの空気による試験を行っている^{41,42)}。また北島らは、音響解析により固有モードを確認⁴³⁾しており、李・岡本らは、分岐部の流れを実験的に可視化している⁴⁴⁾。

5 おわりに

本稿では、冷却材流れに伴う劣化現象の中の代表例である配管の減肉現象および流動によって励起される構造物振動現象について、最近の動向について紹介した。

軽水炉発電については、現状技術で把握している範囲で、保守性をもって運転していくことは可能と考えられる。しかし、今後のプラントの高経年化対策や日常保全の高度化、出力向上などの高度利用を考えれば、技術的にみて流体力学はその概要技術の一つであることは間違いない。今後は乱流などの流体力学の基礎を十分に理解した上で、本稿で述べたような新たな課題に取り組んでいく必要がある。

引用文献

- 1) 原子力委員会「原子力政策大綱」2005年10月。
- 2) 青木,各務,西端「東海第二発電所原子炉出力向上計画における技術評価—その1~7」日本原子力学会 2008 秋の大会(2008)B53-B59。

- 3) 日本機械学会基準「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」JSME S 017(2003)
- 4) K. Gott, “Materials degradation database development as a tool for safety regulation and ageing management, ” 2nd International Symposium on the Ageing Management and Maintenance of Nuclear Power Plants, ISaG2008, NISA (2008).
- 5) S.R.Gosselin, K.N.Fleming, “Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment”, ASME/JSME ICONE5 (1997).
- 6) 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(2005).
- 7) 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年版)JSME S NG1-2006.
- 8) 発電用原子力設備規格「沸騰水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格」(2006年版)JSME S NH1-2006.
- 9) 森田「擬似圧縮性法による3次元CFDコード”MATIS-I”の開発と縮流部流れへの適用」第83期日本機械学会流体工学部門講演会 G603 (2005).
- 10) L. E. Sanchez-Caldera, “The Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations”, Ph. D. Thesis, Dep. of Mech. Eng., MIT, Cambridge, Massachusetts (1984).
- 11) 浅野「物質移動の基礎と応用, Fickの法則から多成分系上流まで」丸善(2004).
- 12) 稲田,米田,森田,藤原,古谷「配管減肉メカニズムに関する流体力学的考察」材料と環境 Vol.57 (2008)218-223.
- 13) T.H.Chilton and A.P.Colburn, “Mass Transfer (Absorption) Coefficients: Prediction from Data on Heat and Fluid Friction,” Industrial and Engineering Chemistry, Vol.26(1934)1183-1187.
- 14) V.H.Keller, “Erosionskorrosion an Nabdampfturbien,” VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 54, Heft 5 (1974) 292-295.
- 15) J.Wang, “Modeling flow, erosion and mass transfer in elbows,” PhD Thesis, The Univ. of Tulsa, Tulsa, OK(1997).
- 16) E. Achenbach, “Mass transfer from bend of circular cross section to air,” Future Energy production Systems, Academic Press, Vol.1 (1976)327-227.
- 17) K.M.Krall, E.M.Sparrow, “Turbulent heat transfer in the separated, reattached, and redevelopment

- regions of a circular tube,” Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol.88 (1966) 131-136.
- 18) 藤澤,早瀬,小原,井小萩「オリフィス背後のマイクロ・マクロ輸送現象と流動加速腐食に関する研究」日本機械学会 第13回動力エネルギー技術シンポジウム No.08-8(2008)15-16.
 - 19) 歌野原,長屋,中村,村瀬「オリフィス下流における流れ加速型腐食の評価 その1:流れ場の計測と数値計算 その2:腐食速度の測定と流れ場の影響評価」日本機械学会 第13回動力エネルギー技術シンポジウム No.08-8(2008) 17-20.
 - 20) 中村,村瀬,歌野原,長屋「流れ加速型腐食に及ぼす局所的流況の影響—研究の背景とオリフィス下流の腐食速度の計測—」INSS Journal, Vol.15 (2008)78-87,
 - 21) 王,二ノ方,内田,内藤,白川,岡田,上原「連成解析による気液二相流中構造物の振動・腐食評価手法の開発 28:3次元数値解析を用いたオリフィスを有する円管流における質量輸送係数評価」日本原子力学会 2008年春の年会(2008)514.
 - 22) 上原,内田,内藤,白川,岡田,王,堀田,市川「———29:乱流に起因する質量移行係数の評価」日本原子力学会 2008年春の年会(2008)515.
 - 23) 米田,森田,稲田「流れ加速型腐食に対する影響因子の定量的な評価(その2)~壁面流動特性を用いた物質移動係数モデルの構築~」電中研報告 L07015(2008)
 - 24) 米田,稲田,森田,藤原,古谷「流れ加速型腐食現象に対する物質輸送の効果に関する検討」日本機械学会 第13回動力エネルギー技術シンポジウム No.08-8(2008)21-22.
 - 25) 加藤洋治編著「新版 キャピテーション 基礎と最近の進歩」槇書店(1999).
 - 26) M.C.Rochester, J.H.Brunton, “Influence of Physical Properties of the Liquid on the Erosion of Solids”, ASTM STP 567(1974), 128-151
 - 27) T.Shinogaya, T.Shinohara, M.Takemoto, “Erosion of Metals in High Speed Mist Flow Evaluation of Threshold Velocity by Acoustic Emission System”, 10th Int. Congress on Metallic Corrosion, vol. IV, Sessions 14-19(1987), 4047-4054.
 - 28) 鶴田,徳永,村田「配管減肉現象(流れ加速腐食/液滴衝撃エロージョン)について」材料と環境 2006, A-203(2006)4p.
 - 29) 服部,早川,滝波「鉄鋼材料の液体衝撃エロージョン」日本機械学会 第13回動力エネルギー技術シンポジウム No.08-8(2008)37-40.
 - 30) 森田「液滴衝撃エロージョン評価法」日本機械学会 第13回動力エネルギー技術シンポジウム No.08-8(2008)41-42.
 - 31) 森田「液滴衝撃エロージョン評価システムの構築」電中研報告 L07017(2008).
 - 32) 森田「蒸気の非平衡凝縮を考慮できる3次元流体数値計算コード"MATIS-SC"の開発」電中研報告 L04002(2005).
 - 33) 日本機械学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」JSME S 012(1998).
 - 34) 日本機械学会基準「蒸気発生器伝熱管U字管流力弾性振動防止指針」JSME S 016(2002).
 - 35) 日本機械学会編「事例に学ぶ流体関連振動 第2版」技報堂出版(2008).
 - 36) 森田, 稲田, 森, 手塚, 辻本「蒸気加減弁に生じる流体振動現象の抑制手法の提案」日本機械学会論文集 B Vol.72(2006)634-641.
 - 37) 米澤, 豊平, 長島, 辻本, 手塚, 森, 森田, 稲田「蒸気加減弁に生じる遷音速非定常流れに関する単純形状を用いた実験」日本機械学会論文集 B, Vol. 74(2008)303-309.
 - 38) 田中,森「原子炉圧力容器・再循環配管系の圧力脈動に関する研究」日本機械学会 D&D2007, No.07-8 (2007) No.818, 5p.
 - 39) G.DeBoo, K.Ramsden, R.Gesior, B.Strub, “Identification of Quad Cities Main Steam Line Acoustic Sources and Vibration Reduction,” 2007 ASME PVP2007-26658 (2007).
 - 40) D.S.Weaver, G.O.Macleod, “Entrance Port Rounding Effects on Acoustic Resonance in Safety Relief Valves,” ASME PVP-Vol.389 Symp.on Flow-Induced Vibration (1999)291-297.
 - 41) 森田, 稲田, 吉川, 高橋「BWR 主蒸気系及びドライヤの音響・流動振動評価(5)非定常数値計算による蒸気と空気との相似性の検討」日本原子力学会 2008年秋の大会(2008)E20.
 - 42) 高橋, 奥山, 吉川, 稲田, 森田「———;(6) BWR 主蒸気系の音響特性」日本原子力学会 2008年秋の大会(2008)E21.
 - 43) 北島,渡邊,松永,萩原「110万kWe級沸騰水型軽水炉の蒸気圧力脈動の音響解析」日本原子力学会 2006春の年会(2006)N5.
 - 44) 李, 岡本, 吉田, 染矢「音響共鳴を伴う管内空気流れ速度場計測」日本原子力学会 2008年秋の大会(2008)E22.