

審査の結果の要旨

氏名 熊進標

本研究は原子力発電プラントにおける液滴衝撃エロージョン(LDI, Liquid Droplet Impingement)および流れ加速型腐食(FAC, Flow-Accerelated Corrosion)の流体解析に関するもので、5章より構成されている。

第1章は緒言であり研究の背景が述べられている。日本における原子力発電プラントは1970年代および1980年代に建設されたものが多く、高経年化対策が重要な課題である。適切な高経年化対策がプラントの安全性確保と計画外停止の回避のために求められている。中でも、配管減肉はしばしば報告されており、1986年の米国のサリー原子力発電所2号炉の事故および2004年の美浜原子力発電所3号炉の事故において配管破断が発生している。配管減肉のメカニズムとしてはLDIとFACが重要であり、本研究ではこれらの2種類を対象にしている。

第2章ではLDIの流体解析がまとめられている。LDIは曲り管やオリフィスの下流において気液二相流中の液滴が配管内面に高速で衝突することによって生じる。そこで、単一液滴が高速に壁面の衝突するシミュレーションを粒子法(MPS-AS (Moving Particle Semi-implicit for All Speed)法)によって実施した。まずシミュレーションの検証と妥当性確認のため、単一液滴が垂直に壁に衝突する解析をおこない、空間解像度に対する収束を確認するとともに、衝突速度に対する衝撃圧力の変化が従来の相関式と一致することを確認した。また、3次元計算と2次元計算を比較し、衝撃圧力の最高値は次元の影響がほとんどなく、最高値の後の減少速度は3次元の方が速いことが示された。本研究では空間解像度を高めた2次元計算を主におこない、衝撃圧力の最高値を議論するものであり、次元の影響は現れないとしている。次に、液膜の影響、衝突角度の影響およびナトリウム液滴の場合についてシミュレーションを用いて評価した。液膜によって衝撃圧力が緩和されること、衝突角度の垂直成分で衝撃圧力が決まること、ナトリウムの場合でもほぼ水と同じ結果が得られることがわかった。

第3章ではLDIに関する様々なシミュレーション結果にもとづいて、衝撃圧力に対する新たな相関式を提案している。具体的にはHeymannの相関式を拡張して、衝撃圧力から潜伏期間と減肉速度を算出できるものとしている。

第4章は FAC の流体解析がまとめられている。FAC は配管内面の酸化皮膜からのイオンの溶出が乱流によって促進されることによって減肉が加速される現象である。そこで、低レイノルズ数型 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)モデルおよび高レイノルズ数型 RANS モデルを、複数用いて流体解析をおこなった。計算体系として、円管流れ、バックステップ流れ、およびオリフィス流れの 3 種類を用いた。いずれも空間 2 次元である。計算は有限体積法にもとづく OpenFOAM コードに、独自に乱流モデルを組み込んで実施している。円管流れでは、速度分布や壁面摩擦係数はいずれの乱流モデルでも DNS(Direct Navier-Stokes)の結果とよい一致を示したが、物質伝達係数では大きな違いが現れた。これは、シュミット数が 1,000 と非常に大きい値であるため、低レイノルズ数型 RANS モデルでは壁面のごく近傍のわずかな乱流の違いによって結果が大きく影響されることがわかった。一方、高レイノルズ数型 RANS モデルでは壁関数境界条件の中に高シュミット数の効果が適切に考慮されていれば妥当な結果が得られている。バックステップ流れおよびオリフィス流れでははく離が生じるため、これを精度良く計算することが重要であり、SST モデルがよい結果を与えるとの知見が得られた。FAC ははく離が生じる場所に現れることが多いので、FAC の流体解析には高レイノルズ数型 RANS モデルとして SST モデルを用い、壁関数境界条件と組み合わせることが適切であるとの結論を得た。壁関数境界条件では壁近傍に細かいメッシュを切る必要がなく、実用性の観点からも優れている。

以上を要するに、本研究では原子力プラントの高経年化対策として重要な配管減肉の予測のため、LDI と FAC に関する流体解析をおこない、LDI における単一液滴の衝撃に関して様々なパラメータの影響を解明し、その結果を相関式にまとめ、さらには FAC における乱流解析を様々な実施して高シュミット数流れによって生じる FAC 特有の現象を明らかにするとともに、これを精度良く解析できる乱流モデルを提案している。これらの成果は配管減肉のメカニズムの解明と減肉速度の予測に対して大きく貢献するものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。