

審査の結果の要旨

氏名 李佳智

本論文は、ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器におけるナトリウム-水反応現象をシミュレーションするとともに、同現象に関する安全評価のため、粒子法(MPS法)に基づく新しい解析方法を開発するものである。

第1章にはナトリウム-水反応の現象について概観し、既往の数値シミュレーション手法について解説をするとともに、本研究の目的を述べている。ナトリウム-水反応のシミュレーションでは、化学反応と気液界面挙動をモデル化する必要がある。そこで、反応形態と反応速度を適切に定めるとともに、反応界面における流動様式を考慮することにより界面積濃度を評価している。ナトリウム-水反応に適用できる反応性混相流シミュレーションのためのMPS法を開発すること、その手法の高速炉実機体系への適用性を示すことが本論文の目的である。

第2章では、液体ナトリウムと水並びにその反応生成物である水酸化ナトリウム、酸化ナトリウム、水素などを含む、多成分多相流の解析手法の開発について述べている。圧力の変動が大きい場合に安定に数値解析を行うため圧力項補正手法を導入し、数値解析誤差を大幅に低減させるとともに、数値的に安定な解析を行えることを示した。また、気液界面の曲率の計算精度を向上させることにより、表面張力モデルを高度化した。提案された表面張力モデルでは、平滑化された位相カラー値の導関数を導入し、気液界面の解像度を改善した。さらに、実用問題に適用するために、比較的時定数の長い熱伝達現象を陰的に解く方法の導入によって、計算効率の大幅な向上を実現した。開発したモデルについては理論解や実験結果と比較することにより検証を行っており、密度差が大きい粒子間の相互作用を適切に考慮した多成分多相流を安定に解析できる手法を確立した。

第3章では、ナトリウムと水の化学反応モデルを開発した。水の沸点は液体ナトリウムと比べると十分に低いため、化学反応領域においては水蒸気として存在する。一方、ナトリウムは液相あるいは気相として存在する。そこで、表面反応および気相反応の2つの化学反応モデルを開発し、温度と圧力条件に応

じて選択できるようにした。表面反応は、液体ナトリウムと水蒸気との反応、気相反応はナトリウム蒸気と水蒸気との反応である。表面反応モデルでは、反応速度は、液体ナトリウム界面への多成分気体中の水蒸気拡散フラックスにより支配される。水蒸気とナトリウム蒸気の気相反応速度は、それぞれのモル濃度に依存し、気体粒子の相平衡温度によって反応速度を評価する。開発した手法は、新規性のあるもので、伝熱管を含むナトリウム中に蒸気が注入される現象に適用することができる。

第4章では、これまでに述べた解析コードを用いてナトリウム-水反応現象の解析を行い、その有効性を検証した。伝熱管の存在しない容器体系中に水蒸気ジェットが注入することにより、形状効果以外の現象についての解析・評価を実施した。流れ場、温度場ともに実験的知見を再現する結果が得られ、水蒸気とナトリウムの反応について、化学反応モデルにより妥当な結果が得られていることを確認した。新たな知見として、反応により生成された水素がナトリウムと水の接触を妨げること、過熱された水酸化ナトリウムの蒸発潜熱が系のさらなる温度上昇を妨げることなどの、化学反応抑制効果があることを数値的に説明した。これは、ナトリウム-水反応が加速的に進行するのではなく、その反応を抑制するフィードバック効果があるとの実験的知見を説明するものである。

第5章では伝熱管を含む体系でのナトリウム-水反応のシミュレーションを実施した。まず、伝熱管が1本のみの容器体系において、水蒸気ジェットが伝熱管に衝突する現象の解析を実施した。伝熱管の影響により、水蒸気ジェット噴流が空間的に振動し、反応場と温度場が形成されることが解析され、構造物の影響と形状効果について妥当な結果が得られることを確認した。次に21本の伝熱管が配置された蒸気発生器の部分体系の解析を実施した。伝熱管の隙間をジェットが通過しながら反応領域が下流側に伝播していく現象が適切に解析されることを確認し、バンドル体系でも現実的な計算時間でシミュレーションを実施できた。最後に実機と同等の蒸気発生器を模擬した体系での解析を実施した。この結果を計算格子を用いた解析コードと比較し、両者で整合する結果が得られることを確認した。開発した手法は、安定性や計算効率、精度の観点から、実機体系への適用性があることを示した。

第6章は結論であり、本研究の成果をまとめている。

本論文は、ナトリウム冷却高速炉の安全上重要な課題であるナトリウム-水反応現象をシミュレーションする手法を新たに開発したものであり、本研究の成果は原子力工学の進展に寄与するところが少なくない。

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。