

沸騰水型原子炉の液膜ドライアウト予測精度向上に向けたフィルム型光導波路による高精度多点液膜計測手法の開発

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2024-06-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 古市, 肇 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/0002000660

(課程博士・様式7)

学位論文要旨

専攻：環境・エネルギーシステム専攻 氏名：古市肇

論文題目：沸騰水型原子炉の液膜ドライアウト予測精度向上に向けたフィルム型光導波路による高精度多点液膜計測手法の開発

論文要旨：

本研究では沸騰水型原子炉（BWR）の安全性向上のため、熱水力現象に基づく液膜ドライアウト予測モデルの高度化に必要な高精度液膜分布計測技術としてフィルム型光導波路を用いた液膜反射光強度センサ（OWF）を開発した。計測技術の必要要件である(a)サブミリオーダーの液膜厚さへの適用性、(b)じょう乱波検出に十分な時間・空間分解能の確保、(c)模擬燃料棒等の曲面狹隘流路への適用性、(d)多点計測に拡張性、(e)高温環境への適用性をそれぞれ評価し、以下の結論を得た。

(1) 液膜厚さの計測手法の確立

OWF の出力信号を計算可能な 3D レイトレーシングシミュレータを開発した。フィルム型光導波路と液膜を表現した幾何学的な 3D 形状モデルにおいて反射・屈折する光線のエネルギーを計算し、センサ出力から計測システムで得られる出力信号を評価した。2次元体系の理論モデルで算出したエネルギー入出力比をシミュレータによる計算結果と比較した結果、液膜厚さ 10～1000 μm の範囲において 3.5%の差異で一致することを確認し、プログラムの妥当性確認した。

液膜厚さの校正方法の検討のため、BWR 模擬燃料棒一体型の OWF を製作し、全反射ミラーを用いた模擬水平液膜による校正実験を実施した。気液単相条件の出力信号で正規化された反射光強度割合を比較した結果、液膜厚さ 10 μm ～3mm の範囲において実験結果と計測誤差内で一致した。気液界面と固液界面を用いた反射光強度割合が良く一致したため、反射光強度割合は液膜厚さを算出するための評価値として有効である。実際の計測では、予め気液単相条件で出力信号を取得しておき、本計算結果を校正曲線として用いることで反射光強度割合から液膜厚さを算出可能である。

ランダム波による時系列液膜厚さ計測をシミュレートした結果、模擬信号処理により算出した液膜厚さと入力値として与えた液膜厚さが誤差 1%以内で一致したことから、OWF の信号処理手法として出力信号の極大値を校正曲線を用いて時系列液膜厚さを算出可能であることを確認した。

(2) BWR 燃料棒を模擬した曲面狹隘流路での液膜厚さ及び波速度の計測

模擬燃料棒表面での液膜厚さ計測結果の妥当性確認するため、高速度カメラによる可視化と比較可能な大気圧条件下の液膜試験を実施した。OWF による時系列液膜厚さの計測

結果から、液膜ドライアウト現象を把握する上で重要なじょう乱波やリップルによる波立ちを計測できることを確認した。平均液膜厚さの計測結果は、可視化による計測結果と計測誤差の範囲内で一致することを確認した。

流れ方向に0.5mmの間隔で近接する2つのセンサによる時系列液膜厚さの計測結果から波の移動時間を算出し、じょう乱波速度とリップル速度を評価した結果、じょう乱波速度がリップル速度に対して2~3倍大きくなり従来知見と同様の傾向を確認した。また、じょう乱波速度の評価結果が可視化結果と評価誤差の範囲内で一致することを確認した。さらに、リップル速度の評価結果が可視化結果及び中里見らの実験結果と評価誤差の範囲内で一致することを確認した。

射出光をレーザ誘起蛍光法により可視化した結果、サブミリオーダの液膜厚さ計測では射出光直径が最大152mmであることから、OWFが小さい計測空間サイズを有し、局所計測性能に優れることを確認した。

(3) 凝縮伝熱管内流下液膜の多点検出性能の評価

高温環境下における液膜の多点検出性能の確認のため、BWR非常用冷却器に代表される縦型凝縮伝熱管を模擬した管内凝縮液膜計測試験を実施した。高温高压条件下の密度変化に伴う屈折率変化がOWFの反射光強度割合に与える影響を試算し、BWR定格運転条件下で気液レベル差及び液膜計測時の出力が低下し、SN比が最大20%低下することを確認した。

試験体の圧力温度状態から確認された0.1~0.2MPa(G)、100~133°Cの高压高温条件において、蒸気単相、凝縮液膜の通過を推定可能な出力信号の変化を確認した。短時間挙動では円管内の周方向において表面の凝縮挙動の変化を確認した。

(4) BWR 運転条件下の基底液膜厚さの計測精度の高度化

時間平均液膜厚さの計測精度の向上のため、液膜表面曲率の影響を考慮したOWFの3Dレイトレーシングシミュレーションを実施した。OWFの現状課題と計測誤差要因を整理した結果、曲面での反射光の散乱が計測誤差に最も強く影響することを確認した。OWFによる液膜厚さ計測誤差を低減するために、誤差への影響の強い波を信号処理過程で排除して時間平均液膜厚さを算出する方法を考案した。

OWFの出力信号のピーク特徴量を評価し、液膜表面曲率 $0.1\sim 20.0\text{mm}^{-1}$ の範囲においてピーク幅から曲率を6%の誤差で推定できる見通しを得た。提案した曲率の推定方法により、無次元液膜厚さ1.12までの範囲において計測誤差への影響が7%に低減することを確認した。さらに、飛散直前の液滴直径を液膜表面曲率と仮定してBWR運転条件下での液膜表面曲率を評価した結果、無次元液膜厚さが1.12未満であることから、本手法がBWR運転条件へ適用可能であると判断した。

以上から、BWR運転条件に相当する高温高压環境下の液膜厚さ分布計測技術として、適用要件である(a)サブミリオーダの液膜厚さへの適用性、(b)じょう乱波検出に十分な時間・空間分解能の確保、(c)模擬燃料棒等の曲面狭隘流路への適用性、(d)多点計測に拡張性、(e)高温環境への適用性をOWFがそれぞれ満足することを確認した。