

沸騰機構解明のための伝熱面温度／熱流束同時計測技術の開発

(受託者)独立行政法人 日本原子力研究開発機構

(研究代表者)劉 維 原子力基礎工学研究部門

(研究開発期間)平成22年度～23年度

1. 研究開発の背景とねらい

原子力機構では、通常必要とされる原子炉炉心燃料集合体を模擬した実規模伝熱試験を実施することなく、炉心熱設計を可能にする三次元詳細沸騰二相流解析手法を確立しようとしている。三次元詳細沸騰二相流解析手法を確立するためには、沸騰現象を正確に予測できる沸騰モデルの構築が必要であり、そのためには沸騰伝熱機構の詳細を把握することが必要である。気泡サイクルにおける熱伝達メカニズムに関して、①気泡が伝熱面との間に取り残されたマイクロ液膜に対して均一に蒸発する液膜均一モデルと②液相－気相－固相の三相接触線上に蒸発が集中する楔状集中モデルの2つの大きく異なるモデルが提案されている。これらのモデルのうち、どちらがより現実に即しているかを定量的に評価するためには、時間的及び空間的に変化する伝熱面温度／熱流束を高分解能で取得した実験データが必要である。しかしながら、既存の計測技術では必要な実験データを取得することが極めて困難であるため、これまで沸騰蒸発モデルを詳細に検証することができず、すべて仮説の域を出ることができなかった。

そこで、本事業では、流れを乱す原因となる伝熱面上へのセンサの設置が不要で、従来では計測困難な伝熱面温度／熱流束を高密度かつ高速度で同時計測できる技術を開発する。開発した計測技術を用いて、既存沸騰伝熱モデルの検証に必要な実験データを取得し、沸騰伝熱機構を解明することを目的とする。

2. 研究開発成果

平成22年度は、高密度高速度表面温度／熱流束同時計測技術を開発するために、高密度で伝熱体内部温度を計測するための共同陽極を持つ素線型温度センサの高密度配置技術の開発、および伝熱面上における表面温度／熱流束分布を詳細に計測するための二次元円筒座標系逆問題解析法の最適化を実施した。開発した技術が沸騰研究に適用できるように、沸騰実験装置の基本仕様を策定し、その結果を温度センサ高密度配置技術開発用試作品の製作に反映した。また、試作品に対して性能試験を実施し、最適な高密度配置技術を確立した。

2.1 高密度高速度表面温度／熱流束同時計測技術の開発

①高密度で温度計測のための共同陽極を持つ素線型熱電対高密度配置技術の開発

伝熱面からの気泡の発生や成長に影響せず、気泡直下における伝熱体内部温度分布を高密度に計測するため、共同陽極を持つ素線型熱電対群の高密度配置技術を導入し、三つの試作品を製作した。具体的には、素線径の異なる2種類のコンスタンタン線を使い、その設置方法、試験体研磨、洗浄、共同陽極膜の製膜条件及びプロセスの最適化について検討し、伝熱面上1mmの距離に対して温度センサを5点から7点の高密度に配置した三つの試作品を製作した。各試作品の製作仕様を表1に示す。試作品A、B、Cでは、それぞれ伝熱面表面から1.3 μm 、1.6 μm 及び390 μm の深さに、伝熱体の半径方向に沿って、それぞれ27点、20点、20点の温度計測センサを配置した。性能試験を実施する前に、試作品Aに配置した27点の熱電対の内、温度接点として測温できるのが18点であり、細い素線の取り扱いが難しく切れやすいことが明らかになった。一方、試作品BおよびCでは設置した20点の熱電対すべてが使用可能であり、 $\phi 120\mu\text{m}$ ポリイミド被覆コ

ンスタantan素線が十分な耐久性を持つことを確認した。また、基盤加熱(150°C)条件で

表1 試作品の仕様

試作品	コンスタantan素線	配置密度	製膜条件	膜種類
A	被覆付き $\phi 60 \mu\text{m}$	1 mmの距離に7点、計27点	スパッタリング	Cu-Ti-TiN (1.0-0.1-0.2 μm)
B	被覆付き $\phi 120 \mu\text{m}$	1 mmの距離に5点、計20点	スパッタリング	Cu-Ti-Au (1.0-0.1-0.5 μm)
C	被覆付き $\phi 120 \mu\text{m}$	1 mmの距離に5点、計20点	電解メッキ	Cu (0.393mm)

のスパッタリング成膜に関して、2種類の熱膨張率の異なる三層の薄膜(Cu-Ti-TiN、Cu-Ti-Au)を問題なく精密に形成できることを確認した。

②伝熱面上における詳細温度/熱流束分布を計測するための二次元円筒座標系逆問題解析法の最適化

数十ミリ秒の周期で変化する沸騰現象下における伝熱面上の詳細な温度/熱流束分布を逆問題解析で追従できるように、既存二次元円筒座標系逆問題解析法^{1,2)}の最適化を検討した。試作品2で製作した表面から1.6 μm 下方に位置する温度接点からの計測データを使って伝熱面表面の温度・熱流束分布を算出する際、最適時間窓間隔をフーリエ数を8に設定した場合、伝熱面表面の温度と熱流束を高精度に予測できることを確認した。

2.2 沸騰における伝熱面温度/熱流束同時計測実験

①沸騰実験装置の基本仕様の策定

沸騰実験により沸騰伝熱機構を解明する際に、伝熱面上の所定位置だけで気泡を発生させるための試験体の形状について検討した。所定位置以外で気泡が生成しないように、表面鏡面仕上げの上、試験体に大きな翼をつける形状とした。また、所定の位置で気泡が発生できるように、文献調査を行い、気泡核の形状を検討した。その結果を2.1①に示す試作品の製作に反映し、気泡の発生位置を制御できる沸騰実験装置の基本仕様を確立した。

②性能試験

前述した2.1①で製作した素線型熱電対を高密度に配置した三つの試作品に対して、大気中で加熱し、20°Cから110°Cの温度範囲で性能試験を実施した。試験において、試作品に設置した素線型熱電対からの信号をデータ収録装置を使って記録するとともに、試作品の表面に黒体テープを貼って、サーモグラフィによる表面温度を計測した。両者の計測結果を比較することにより、高密度に設置した共同陽極を持つ素線型熱電対群の性能を確認した。また、試作品に対して30回以上の昇温-降温過程試験を繰り返して行った結果、各試作品ともに十分な計測データ再現性を有しており、高精度な温度計測を達成できることを実証した。一連の実験結果を基に総合的に判断し、被覆性線の取り扱いの容易さ、共同陽極膜の耐久性および形成された温度接点の表面からの深さなどから、 $\phi 120 \mu\text{m}$ 素線とスパッタリングによるCu-Ti-TiNの三層膜の組合せが最適であることがわかった。

3. 今後の展望

上記開発した計測技術を用いて、プール沸騰実験を実施し、実験データを取得するとともに、沸騰伝熱機構を解明する。

4. 参考文献

- (1) Woodfield P.L., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.49, 187-197(2006).
- (2) Woodfield P.L., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.49, 2864-2876(2006).