

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研究

(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 日本原子力研究開発機構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

沸騰熱伝達は、沸騰水型原子炉、熱交換器、ボイラー等の基幹技術として数多くの研究が行われてきたが、そのメカニズムについては解明されていなかった。沸騰熱伝達機構を解明するために、時間的、空間的に変化する伝熱面温度／熱伝達量を高分解能で計測する必要があるが、既存の技術では対応できない。本事業では、伝熱面温度と熱流束分布を高密度かつ高速度で同時計測する技術を開発し、必要な実験データを取得し、沸騰熱伝達機構を解明することを目的とする。

2. 研究開発成果

沸騰気泡直下伝熱面温度・熱流束分布を計測するには、①伝熱面上にセンサ等を設置しない非接触計測技術；②蒸気泡と伝熱面の接触領域は半径1mm程度であることから、1mmあたり数点の計測ができる高密度計測技術；及び③500Hz以上の周波数で変動する蒸気泡直下温度を計測できる技術が要求される。

①を達成するため、熱伝導逆問題解析を利用する伝熱面表面温度・熱流束の同時解析が求められる。

②に関しては、逆問題解析から求められる伝熱面温度・熱流束の空間分解能が伝熱体内部への温度センサの設置数に依存することから、1mmあたり3点以上の温度センサの設置が必要になる。また、③については、高速応答を達成するため、温度センサをできるだけ伝熱面に近い位置に設置する必要がある。

これらの要求を満たすために、表面温度・熱流束の同時解析法を考案すると共に新型温度センサを開発した。図1にその概念を示す。複数の個別金属線（コンスタンタン線）に共同金属膜（銅）をつけることによって、これまでの温度センサよりも配線数を半分に減らし、微小領域への高密度な温度センサの配置を可能にした。同時に、高精度スパッタリング技術の導入により、共同金属膜の薄膜化を達成し、伝熱面への温度センサの近接配置を可能にした。図2に新型温度センサを設置した沸騰試験体を示す。伝熱面から深さ1.4μmの位置に1mmあたり最大6点の温度センサを設置する技術を確立した。

上記新型温度センサを設置した沸騰試験体を図3に示すプール沸騰実験装置に設置し、プール沸騰実験を実施した。沸騰気泡の位置を制御するため、沸騰試験体表面中心に気泡核を設けた。伝熱面直下各温度センサの計測温度に加え、高速度カメラにより蒸気泡の画像を同期して取得した。実験結果の一例として、図4に気泡核より左に2mm以内に設置した10個の温度センサ(L₁,

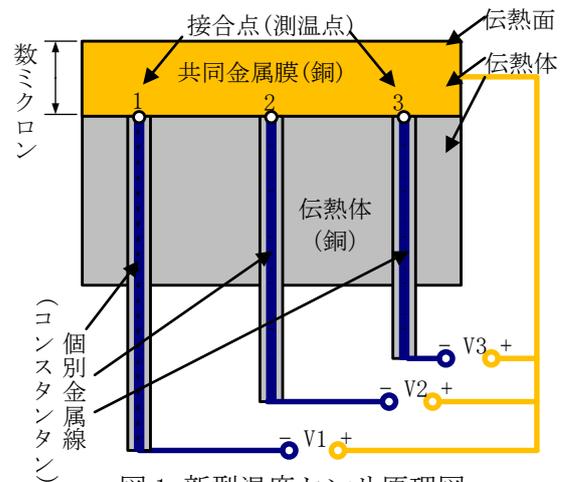


図1 新型温度センサ原理図

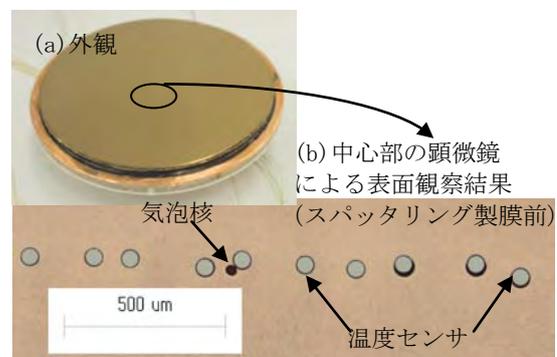


図2 新型温度センサを設置した沸騰試験体

$L_2 \dots L_{10}$)により計測した温度の時間変化を、気泡開始時刻を 0s として示す。沸騰気泡が存在する場合には温度変化が大きく、存在しない場合には温度変化が小さいことが確認できた。そして、計測した温度分布データに二次元半無限逆問題解析を適用し、気泡直下における伝熱面上温度および熱流束分布を求めた結果及び気泡画像を図 5 に示す。気泡の形成に伴い、表面熱流束は急速に上昇している。可視化画像との比較から、固、気、液の三相界面近傍で熱流束が高いことが確認できるから、「三相界面近傍での伝熱が沸騰熱伝達を支配している」という沸騰熱伝達機構の仮説が妥当であることを実験的に明らかにした[1]。

3. 今後の展望

高密度かつ高速度で伝熱面温度・熱流束同時計測技術の確立および沸騰熱伝達機構の解明により、沸騰伝熱を利用する沸騰水型原子炉、火力発電所、化学プラントなどの工業機器の設計の高精度化に広く寄与できる。今後は、データ数を増やし、統計的な手法を利用し、各パラメータの沸騰熱伝達の影響を調べ、高機能伝熱面の開発に繋がっていきたいと考えている。

4. 参考文献

(1) Wei LIU, Taku NAGATAKE and Kazuyuki TAKASE, Proceedings of 8th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, (2012)

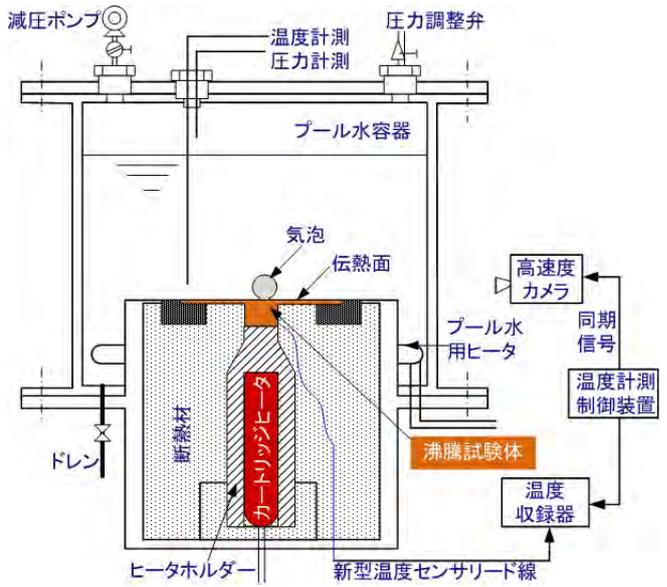


図 3 プール沸騰実験装置

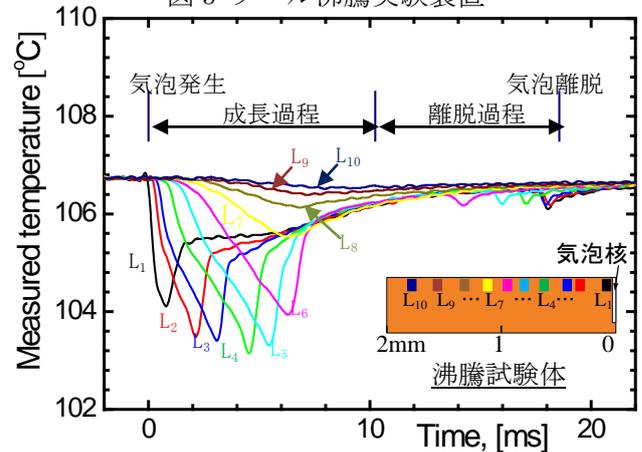


図 4 計測した温度の時間変化 (圧力=0.1MPa)

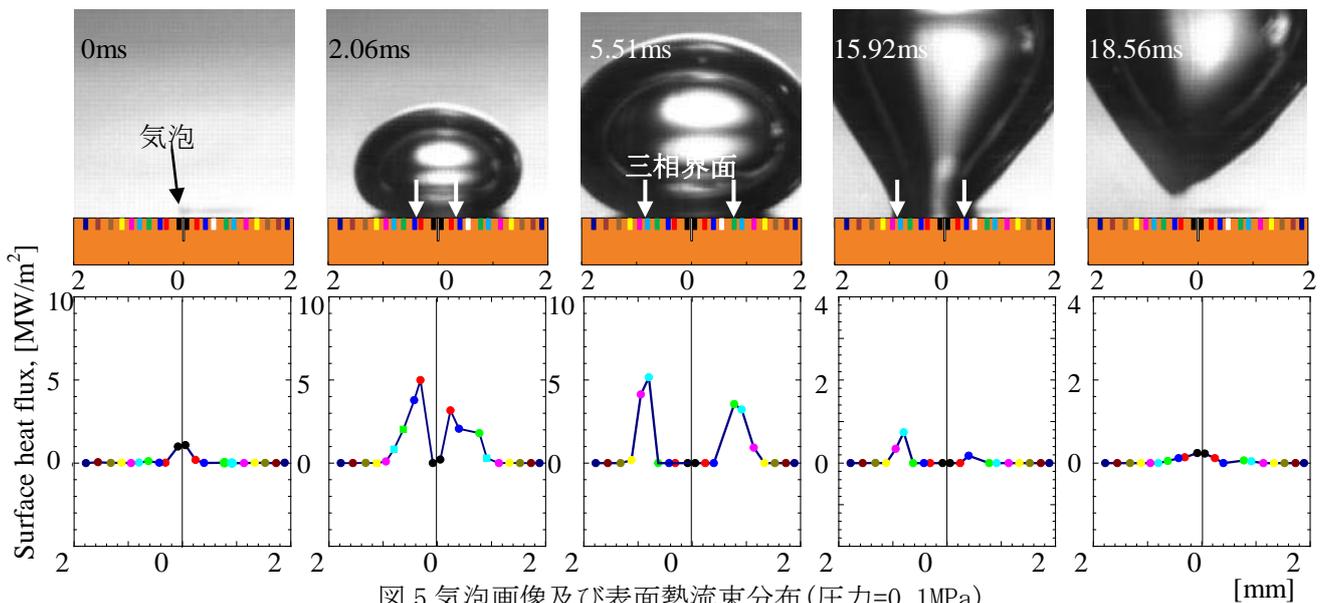


図 5 気泡画像及び表面熱流束分布 (圧力=0.1MPa)