

〔論 文〕

# 水およびアンモニアの沸騰熱伝達とその経年変化に及ぼす 界面活性剤と PEEK 樹脂コーティングの影響

井上 利明\*・黒田 光\*・真鶴 哲郎\*

Effect of a Surface-Active Agent and PEEK Resin Coating on Nucleate Boiling  
Heat Transfer and its Secular Change in Water and Ammonia

Toshiaki INOUE\*, Hikaru KURODA\* and Tetsurou MAZURU\*

Nucleate pool boiling heat transfer coefficients have been measured when a surface - active agent was added into water. Those have been measured on a heated wire that PEEK (Poly Ether ·Ether ·Keton) resin was coated in ammonia. The experiment has been carried out using a thermosyphon with a plain heated surface and a pool boiling vessel with a heated fine wire. The effect of the surface - active agent and PEEK resin coating on the nucleate boiling heat transfer coefficient and time variation of the nucleate boiling heat transfer coefficient were investigated experimentally for the surfactant concentration,  $C_s=0$  and 1000 ppm. The result shows that the nucleate boiling heat transfer coefficient never changes for more than a month in pure water and in ammonia with the heated wire coated by PEEK resin. On the other hand, the boiling heat transfer coefficient decreases gradually till the end of operation in water with the surfactant.

**Key Words** : Nucleate Boiling, Heat Transfer, Surface-Active Agent, Secular Change, PEEK Resin Coating

## 1. まえがき

Inoue ら<sup>①</sup>はアンモニア／水混合媒体に界面活性剤を添加することによってアンモニアの低濃度域および低熱流束域において、沸騰熱伝達が促進されることを報告した。一方、界面活性剤を混合することによって、伝熱面の性状が時間の経過とともに変化して沸騰熱伝達率が変化することが考えられる。また、アルミニウムは熱伝導率が良いので、熱交換器の材料として広く用いられている。しかし、アンモニアがアルミニウムを腐食させることはよく知られている。

そこで、本研究ではアンモニアに対して腐食を避けるために、加熱面の表面に PEEK (Poly Ether ·Ether ·Keton) 樹脂をコーティングして、また、沸騰熱伝達率を促進させるために水に界面活性剤を添加して沸騰熱伝達率を測定した。そして、界面活性剤と PEEK 樹脂コーティングが水とアンモニアの沸騰熱伝達率と、その経年変化に及ぼす影響を実験的に明らかにした。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置** 本研究では2台の実験装置を用いて沸騰熱伝達データを採取した。図1に熱サイフォンを利用した上向き平板加熱面を持つ実験装置を示す。本実験装置は凝縮部、断熱された連結管（断熱部）および蒸発部で構成された下端加熱型熱サイフォンである。加熱面①で発生した蒸気が連結管⑤の中を上昇して凝縮部へ達し、凝縮器⑦によって凝縮させられることによって試験容器内は飽和状態に保たれる。したがって、連結管の中は管の中央を蒸気が上昇し、周囲を液が下降する気液対向流になる。図2に蒸発部加熱面の詳細を示す。蒸発部には直径  $D_h=25$  mm の銅製の平板加熱面①が装着されている。加熱面へは銅ブロック②の最下部に取り付けられたプレートヒータ③から熱が供給される。周囲への熱損失を防止するために銅ブロック②の周囲にバークライトを取り付け、さらにその周りを断熱材で覆っている。また、図2に示すように銅ブロックには3本の熱電対温度計 ( $T_1$ ,  $T_2$ および  $T_3$ ) が加熱面から1.3, 5.7および11.4 mm の位置に埋め込まれている。これら3箇所の温度から加熱面温度と熱流束を求める。連結管は蒸気の上昇中に凝縮

\*機械システム工学科  
平成25年11月14日受理

しないように断熱されており，その内径は4 mm 長さは250 mm である．凝縮部の水は補助ヒータ⑥で系の圧力0.1 MPa に対する飽和温度（98–100 °C）に保たれている．また，凝縮部の気液界面は連結管上端より約250 mm 上方に設定した．

図3は水平細線加熱面上のプール沸騰熱伝達を測定するための実験装置である．高熱流束および高温に耐えるために加熱面にはアルミニウムの替りに融点の高い直径0.3 mm の白金線②を用い，ブリッジ回路に組み込まれて抵抗温度計としても利用される．PEEK 樹脂コーティングの厚さは100  $\mu\text{m}$  である．試験容器①は恒温槽③内に沈められており，恒温液循環装置④からの恒温液によって一定の温度に保たれ，周囲の温度の影響を受けないようになっている．発生した蒸気は凝縮器⑥で凝縮させられてバルク液の中に戻り，試験容器内は飽和状態に保たれる．

**2.2 実験方法** 試験流体を飽和温度に保った後，加熱面への熱流束を段階的に上昇させ，サイフォン型では熱流束が100 kW/m<sup>2</sup>，プール沸騰型では1000 kW/m<sup>2</sup>に達したことを確認して約1 か月間以上連続運転を行った．運転中は1時間間隔で過熱度と熱流束を測定した．実験装置と実験方法の詳細および測定の精度については細線加熱面上のプール沸騰については Inoue and Monde<sup>(4)</sup>および熱サイフォンを用いた平板加熱面上の沸騰については Inoue and Monde<sup>(5)</sup>によって述べられているので，ここでは省略する．使用した水は超純水である．

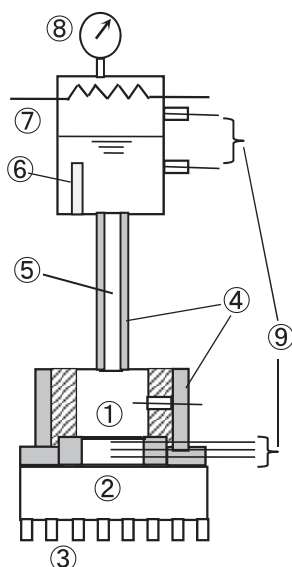


Fig.1 Experimental apparatus (Thermosyphon Type)

- ① Heated surface ② Copper block ③ Heater
- ④ Insulator ⑤ Connecting pipe ⑥ Auxiliary heater
- ⑦ Condenser ⑧ Pressure gauge ⑨ Thermocouples

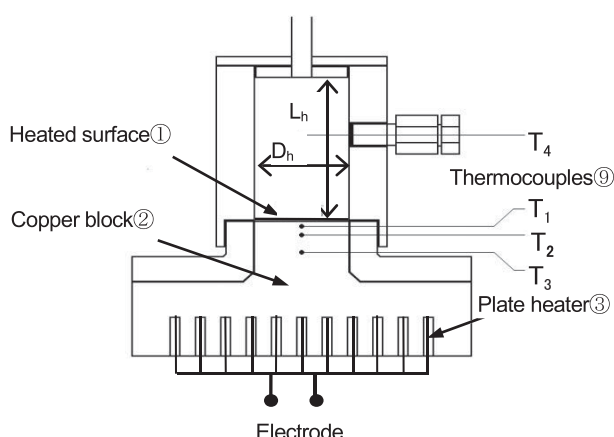


Fig.2 Cross-sectional view of the evaporator section

**2.3 界面活性剤** アンモニア水溶液の場合，アンモニア水溶液よりも解離定数の大きい活性剤またはイオンに解離しない活性剤を使用する必要がある．この理由については Inoue et al.<sup>(2)</sup>によって詳しく述べられている．本研究ではアンモニア水溶液は使用しないけれども，非イオン系のフッ素系界面活性剤を使用した．その成分は30%の Perfluoroalkyl 化合物で，溶媒として30%のイソプロパノールおよび40%の水の混合溶液である．その他の化学物理的な性質については大歳<sup>(3)</sup>によって詳しく述べられている．

### 3. 実験結果

図4はサイフォン型の実験装置で測定された実験データであり，圧力0.1 MPa において100 kW/m<sup>2</sup>一定の熱流束で約一ヵ月間連続運転したときの水の沸騰熱伝達率の時系列変化を示す．界面活性剤濃度  $C_s = 0$  ppm の場合は一ヵ

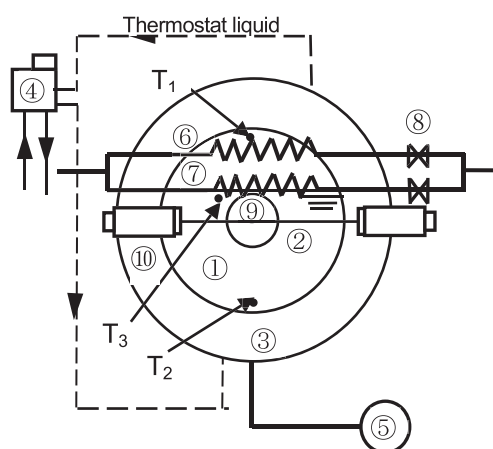


Fig.3 experimental apparatus (Pool boiling type)

- ① Pressure vessel ② Heated wire(Platinum)
- ③ Thermostat bath ④ Thermostat bath with pump
- ⑤ Pressure gauge ⑥ Condenser ⑦ Cooling pipe
- ⑧ Valves ⑨ View Window ⑩ Electrode
- T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>. Thermocouples

月の間に沸騰熱伝達率は運転開始直後から約 $10\sim 13\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の変動内ではほぼ一定であった。一方、 $C_s=1000\text{ ppm}$ では運転開始直後から沸騰熱伝達率が低下し始め、実験終了まで次第に低下し続け、実験終了時の約450時間後には約13%低下した。また、図4より界面活性剤の添加によって沸騰熱伝達率が上昇することが分かる。この界面活性剤添加による沸騰熱伝達率上昇のメカニズムについては Inoue et al.<sup>(6)</sup>によって詳細に述べられている。また、界面活性剤を添加すれば、沸騰熱伝達率のバラツキの範囲が広がることも分かった。これは界面活性剤の濃度分布を持つ水の対流によって加熱面の温度分布が生じ易くなるからであると思われる。

図5は水平細線上のプール沸騰熱伝達率の測定データであり、アンモニアの沸騰熱伝達率の時間変化と PEEK コーティングの影響を示す。コーティングを施さない場合は実験開始後約200時間後に熱伝達率が上昇し、その後約300時間後までは多少変動しながら熱伝達率はほぼ一定で経過した後、300時間後からは熱伝達率が次第に低下し始め、約700時間後に実験開始直後から約12.5%低下した後、運転終了の800時間後まで12.5%以上低下することはなく一定の熱伝達率が持続した。これは加熱面が200時間後にアンモニアで適度に汚されて発泡し易くなったために熱伝達が増加し、300時間後には徐々に汚れが進行して熱伝達が低下したものと思われる。一方、コーティングを施した場合は、実験開始直後からほぼ一定の熱伝達率が続き、実験終了時の約2.7ヶ月後まで熱伝達率はほとんど変化しなかった。また、加熱面に $100\text{ }\mu\text{m}$ の PEEK 樹脂を被膜することによって、熱伝達率が約120%低下することが分かった。さらに、実験終了後、加熱面の PEEK 樹脂被膜の剥がれが観察された。

以上の結果は1回の実験から得られたデータに基づいているので、再現性を確かめるために、さらなる実験を必要とする。また本研究によって、さらに長時間の連続運転による熱伝達率の低下が懸念されることが分かった。今後の検討課題としたい。

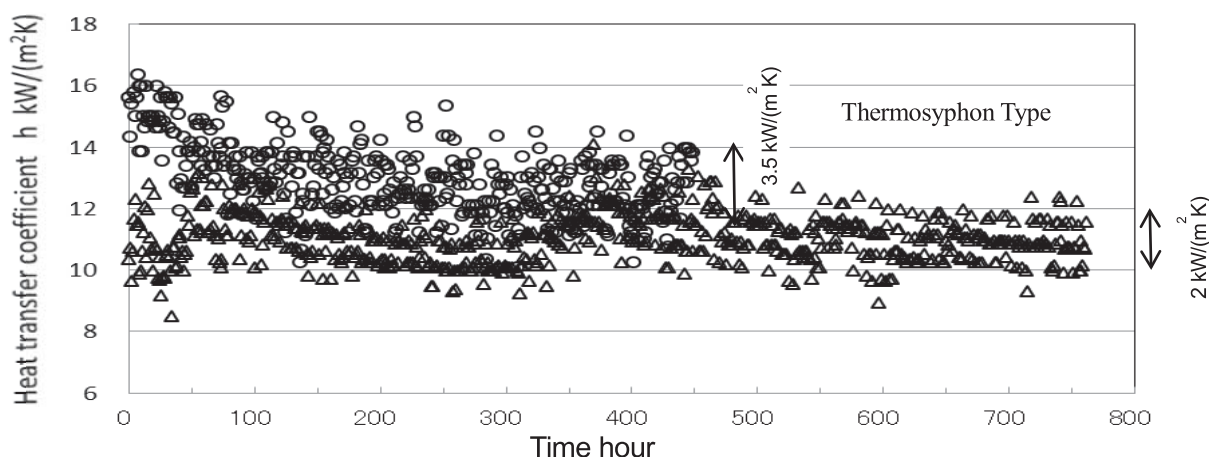


Fig.4 Effect of the surfactant on nucleate boiling heat transfer in water for a long period ( $q=100\text{ kW}/\text{m}^2$ ,  $P=0.1\text{ MPa}$ )  
 $\bigcirc C_s=1000\text{ ppm}$ ,  $\triangle C_s=0\text{ ppm}$

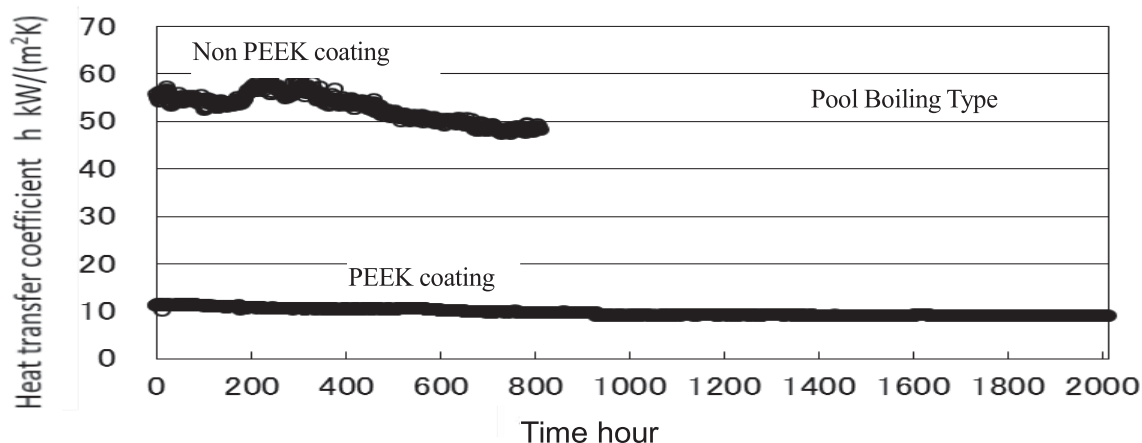


Fig.5 Effect of PEEK resin coating on nucleate boiling heat transfer in ammonia for a long period ( $q=1000\text{ kW}/\text{m}^2$ ,  $P=0.4\text{ MPa}$ )

#### 4. ま と め

約一ヵ月間以上の連続核沸騰運転を行って次の結果を得た.

1. 水の沸騰熱伝達率は連続運転中にほとんど変化しない.
2. 水に界面活性剤を添加すると沸騰熱伝達率が向上するが, 時間の経過とともに次第に熱伝達が低下する.
3. アンモニアの沸騰熱伝達率は運転中200時間後にわずかに上昇し, その後は徐々に低下し700時間後から運転終了の約800時間後まで一定の熱伝達率が持続する.
4. 加熱面に100  $\mu\text{m}$  厚さの PEEK 樹脂を被膜することによって, 沸騰熱伝達率の経年変化は殆どないが, 熱伝達率が大きく (120%) 低下する.

#### 参考文献

- (1) T. Inoue and M. Monde, Int. J. of Heat and Mass Transfer 55 (2012), 3395.
- (2) T. Inoue, M. Monde, T. Kuwahara and Y. Teruya, Heat Transfer – Asian Res. 40(1) (2011), 89.
- (3) 大歳幸男, 石油学会誌, 32- 6 (1989), 277.
- (4) T. Inoue and M. Monde, Wärme-und Stoffübertragung 29 (1994), 171.
- (5) T. Inoue and M. Monde, Int. J. of Heat and Mass Transfer 52 (2009), 4519.
- (6) T. Inoue, Y. Teruya and M. Monde, Int. J. of Heat and Mass Transfer 47 (2004), 5555.