

平成21年5月26日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560197
 研究課題名（和文） 含水多孔質を用いた過熱水蒸気の急速生成
 研究課題名（英文） Rapid generation of superheated steam using a porous material containing water
 研究代表者
 奥山 邦人（OKUYAMA KUNITO）
 国立大学法人横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：60204153

研究成果の概要：

高温の過熱水蒸気を迅速かつ高効率で発生させる方法として、含水多孔質体ブロックに設けた中空部の内面をこれに接するコイルヒータにより強加熱した際の、過熱水蒸気の生成特性に与える多孔質材料の影響並びに過熱水蒸気生成のメカニズムについて実験的に検討した。その結果、毛管力などの特性の大きく異なる多孔質材においても過熱水蒸気の迅速生成が可能であること、また加熱により形成する乾燥域を蒸気が流れる際のマイクロチャンネル熱伝達が過熱水蒸気の迅速かつ高効率生成に寄与していることが示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：過熱水蒸気生成、含水多孔質、急速蒸発、熱・物質移動

1. 研究開始当初の背景

飽和温度以上に加熱された水蒸気である過熱水蒸気は、乾燥、殺菌、洗浄、食品加工、調理などに広く利用されている[1,2]。過熱水蒸気を生成するには、一般に、投げ込みヒータで水を沸騰させ、過熱器で蒸気を昇温する方法がとられるが、この場合、装置が大がかりとなり、また水槽の水および発熱部の大きな熱容量のため、電子レンジ並（秒単位）の迅速さで効率よく過熱水蒸気を発生させることは困難である。

本研究代表者は、Waynerら[3]が1973年に

提案した多孔質を利用した冷却方法である「Inverted meniscus type evaporator」に想を得て、熱容量の小さいヒータで含水多孔質の表面を強く加熱すれば、細孔内メニスカス部で直ちに蒸発が起こり、さらに細孔内で過熱が速やかに行われて高温の水蒸気を得られるものと考えた。蒸発により失われた液体はメニスカスの毛管力で自動的に補われるため、ポンプなどの液供給機器を必要とせず、かつ多孔質内に拡散した熱は加熱面に供給される液の予熱に利用されるこ

とから、エネルギー効率の極めて高い過熱水蒸気発生装置が構成できる可能性が考えられる。実際、本研究代表者らは、細い電熱コイルを多孔質体に設けた中空部内面に接するように配置し、接触部付近を強加熱することにより、常温の水から僅か数秒で過熱水蒸気を生成できること、また定常状態で90%以上の高いエネルギー利用効率を得られることを実験的に明らかにした[4]。

(引用文献)

- [1] 鈴木寛一 他 25 名, 過熱水蒸気技術集成 (その特性と広がる最新利用および装置開発の現状), NTS (2005).
- [2] 門馬哲也 他 3 名, “過熱水蒸気による健康調理技術の開発”, シャープ技報, Vol.91, (2005), pp.40-44.
- [3] R.J. Raiff and P.C. Wayner, Jr., Evaporation from a porous flow control element on a porous heat source, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol.16, (1973), pp.1919-1929.
- [4] 森昌司, 奥山邦人, 含水多孔質を用いた過熱水蒸気の急速生成, Thermal Science and Engineering, Vol.15, No.1, (2007), pp.39-42.

2. 研究の目的

本研究は、中空部を有する多孔質体ブロックに水を含浸させ、中空部内面をこれに接するよう配置した電熱コイルにより強加熱した際の、過熱水蒸気の生成特性に与える多孔質材料の影響、並びに過熱水蒸気生成のメカニズムについて実験的に検討することを目的とする。

3. 研究の方法

図1に示すように、幅50mm、高さ50mm、長さ80mmの市販の耐熱断熱レンガ(イソライト社製、型式B5及びC1、主成分:SiO₂55%、Al₂O₃41%、各部材の特性値は表1参照)の50mm×50mm面の中央に直径8mmの中空

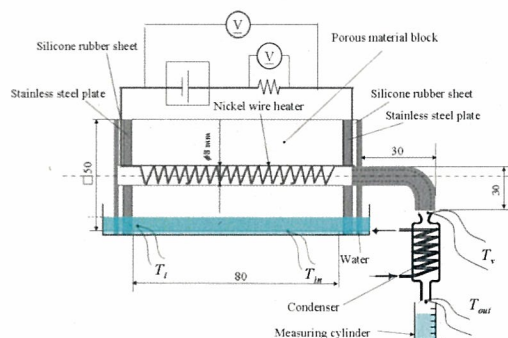


Fig.1 Schematic diagram of experimental Apparatus

Table 1 Properties of test porous materials

Test materials	B5	C1
Thermal conductivity at 600°C [W/(m·K)]	0.33	0.44
Equivalent pore size r_{men} [μm]	280	49
Permeability $K \cdot 10^{10}$ [m ²]	0.507	0.0551
Average pore size [μm]	10	7
Mode diameter [μm]	90.6	18
Porosity ϵ [%]	62.3	56.0

部を設け、直径0.6mm、長さ1mのニッケル線をコイル状に曲げたものをばね作用による広がりにより中空部内面に接するよう配置し、片端を閉じた後、多孔質体の下面を蒸留水の浅いプール中に浸し含水させる。ニッケル線は、直流電流を印加することで加熱ヒータとして用いると同時に、抵抗温度計としても使用し、平均温度を測定する。中空部出口よりエルボ管を通して下流60mmの位置に素線径0.08mm(時定数:0.2s)のK型熱電対を設置し、ヒータからの放射の影響が小さいことを確認のうえ蒸気温度 T_v を、また多孔質体の下面および凝縮器出口部に直径1mmのK型シース熱電対を設置し、それぞれの位置での温度を計測した。凝縮器出口温度(T_{out})が飽和温度以下であることを確認の上20分間の凝縮水量をメスシリンダで計測し、これより定常状態における蒸気生成速度 \dot{m} を算出した。なお表1には、別途測定した多孔質の透過係数 K 並びに水柱引き上げ高さより算出した有効毛管半径 r_{men} も示してある。

起動特性を調べる際は、予め多孔質体および水槽中の水温が室温(約25°C)であることを確認の上、加熱を開始した。定常状態になったのち、各部の温度を計測し、式(1)で定義されるエネルギー変換効率 η を算出した。

$$\eta = Q/P \quad (1)$$

$$Q = \dot{m} c_{pl} (T_{sat} - T_{in}) + \dot{m} h_{fg} + \dot{m} c_{pv} (T_v - T_{sat}) \quad (2)$$

$$P = I \cdot V \quad (3)$$

ここで、 c_{pl} : $(T_{sat} + T_{in})/2$ における水の定圧比熱[J/(kg·K)], c_{pv} : $(T_{sat} + T_v)/2$ における水蒸気の定圧比熱[J/(kg·K)], h_{fg} : 蒸発潜熱[J/kg], I : 加熱電流[A], \dot{m} : 水蒸気の生成速度[kg/s], T_{in} : 多孔質体下面の温度[K], T_{sat} : 飽和温度[K], T_v : 多孔質中空部出口より60mm下流の蒸気温度[K], V : コイル両端間電位差[V]である。

4. 研究の成果

図2はコイルヒータを300Wでステップ状に発熱させた際の、多孔質体B5とC1における、蒸気温度 T_v 並びにヒータ温度 T_h の時

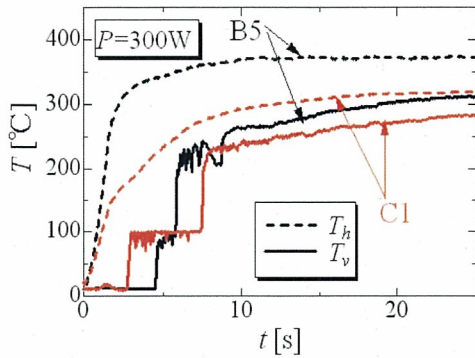


Fig.2 Time changes of evolved vapor and heater temperatures at stepwise powering of coil heater contacting with porous material containing water

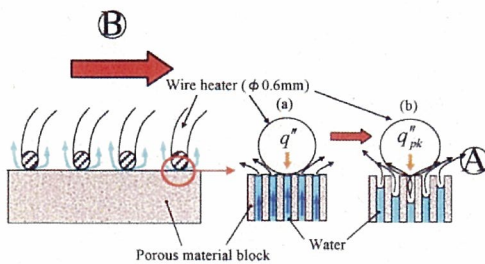


Fig.3 Schematic view of superheated steam evolution from inside of water-containing porous material block heated by a coil heater

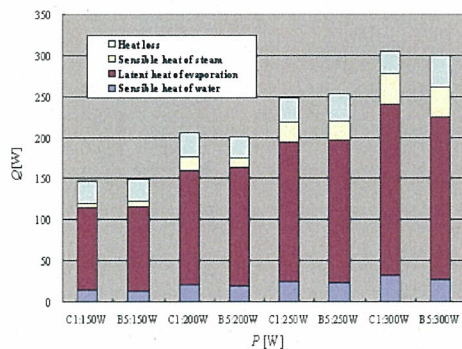


Fig.4 Sensible heats of steam and liquid, and latent heat of evaporation corresponding to evolution rate of superheated steam at steady heating for porous materials B5 and C1

間変化例をそれぞれ示す。\$T_h\$ は、速やかに高温に上昇し、その後緩やかに定常値に近づいていくのに対し、蒸気はやや遅れて出始め、100°Cを数秒程度保ったのち急に高温になり、その後はヒータと同様に緩やかに上昇する。

このように常温の含水多孔質体から加熱開始後、短時間で過熱水蒸気が発生する過程は

以下のように考えられる。図3はコイルヒータ接触部周囲の多孔質断面を、また右図は接触部付近で生じる現象の概念図を示している。

- ① 発熱体の熱容量が小さいため加熱開始後短時間でヒータ温度が100°C以上になる。
- ② 発生した熱は、主にヒータと含水多孔質体の接触部から伝わり、図3拡大図(a)に示すように、多孔質表面の細孔部に形成するメニスカス部で直ちに蒸発が起きる。
- ③ ヒータ接触部付近の細孔内部に乾き領域ができると(拡大図3(b))、ヒータ温度はさらに上昇する。発生した蒸気は細孔内部の乾き領域Aと中空部Bを流れる過程で過熱されながら流出する。

なお、図2で、C1では飽和蒸気(100°Cの蒸気)の発生時間がB5に比べ長い、C1はB5に比べて細孔径が小さいため毛管力が強く、コイルによる強い加熱に対して乾燥が生じにくいと考えられる。

図4は、定常状態における過熱水蒸気生成量に対応した熱量のうち、水の顕熱量(式(2)第1項)、蒸発潜熱量(式(2)第2項)そして水蒸気の顕熱量(式(2)第3項)を示す。B5とC1のいずれにおいてもコイルによる加熱量のうち約2/3が蒸発潜熱分として消費されており、過熱水蒸気の生成量は主に加熱量に応じて変化することがわかる。また同じ加熱量における式(2)各項の熱量は、B5とC1では多孔質の細孔径や透過係数が大きく異なっているにもかかわらず、あまり大きな相違は見られない。ただし、水蒸気の顕熱量(過熱水蒸気温度に対応)については、各試験体ごとにコイルの多孔質への接触状態(押し付け力など)によりばらつきが見られた。

図5は、式(1)で定義したエネルギー変換効率 \$\eta\$ 並びに多孔質体下面の温度 \$T_m\$ の加熱量に対する変化を示したものである。加熱量の増加と共に \$\eta\$ が増加し、最大で約0.9まで達

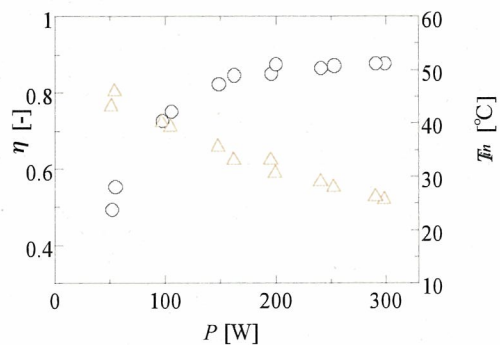


Fig.5 Energy utilization efficiency for evolution of superheated steam and bottom temperature of water-containing porous material block

していること、さらに加熱量の増加にも関わらず下面の温度 T_m は低下していることがわかる。これは多孔質体の加熱部(中空部)からの放熱の方向と毛管力による蒸発面への液体供給の方向が逆になっていることに起因している。すなわち、ヒータから多孔質体に伝わる熱(放熱)の一部は、蒸発面に向かって流れる液体を飽和温度まで予熱するために使われる。この熱回収の効果は、加熱量を増加させ、蒸発量が増加するほど大きくなるため、結果として、多孔質体の下面温度が低下し、 η の値が増加したものと考えられる。

図 6 は定常状態におけるヒータ温度 T_h と蒸気温度 T_v をコイルによる加熱量に対して示したものである。 T_h は加熱量の増加とともに単調に上昇するのに対し、 T_v は加熱量が 100W 以下では 100°C を保ち、100W 以上で 100°C を越え、加熱量とともに上昇していく。また T_v について B5 と C1 で大きな差は見られないが、ヒータと蒸気の温度差($T_h - T_v$)は、いずれの加熱量においても C1 の方が B5 より顕著に小さくなっている。つまりより小さい温度差で同程度の温度の過熱水蒸気を生じていることがわかる。このとき蒸気の生成速度は、図 4 より、B5 と C1 でほぼ同程度であることを考えると、多孔質内に形成した乾燥領域におけるマイクロチャネル熱伝達の蒸気昇温への寄与が顕著であることが推察される。

このことについて、以下に考察する。図 3 で説明したように、多孔質体のコイル接触部付近は、コイルからの強い加熱により乾燥して高温となり、多孔質内で発生した蒸気はこの乾燥域における良好なマイクロチャネル熱伝達ならびに大きな固気接触面積により速やかに加熱されて多孔質表面より流出し、さらに中空部内を流れながらコイルにより加熱され流出すると考えられる。蒸気の加熱量を Q_v とすると、 Q_v と温度差($T_w - T_v$)の関係は、

$$Q_v = A \times h(T_w - T_v) \quad (4)$$

と表される。ここで、 A はヒータと多孔質細孔部を含む固気接触面積、 h は熱伝達率、 T_w は蒸気の接触する固体面温度である。中空部を流れる際のヒータからの熱伝達率並びにヒータと蒸気の接触面積は同じ蒸気流量であれば B5 と C1 で大きな差はないと考えられるが、多孔質の微細構造内では、細孔径の小さい C1 では熱伝達率は大きい毛管力が大きい形形成する乾燥域が小さく、反対に細孔径の大きい B5 では、熱伝達率は C1 よりも小さい毛管力が小さいためより大きな乾燥域が形成されると考えられる。図 6 の場合、C1 では、熱伝達率 h と乾燥域の固気接触面積 A の積 $A \times h$ が B5 より大きくなったため、温度差($T_w - T_v$)が小さくなり、またその小さい温度差で B5 と同程度の蒸気の昇温が可能となったものと思われる。図 6 の結果を得たのと異なる試験体で実験したところ、図 6 の結果とは逆に C1 の方が、温度差($T_w - T_v$)が B5 より顕著に大きくなる場合もあった。一見再現性のない現象のように思われるが、コイルの接触状態(接触の強さ)によっても多孔質内の乾燥域の大きさが変わることは容易に想像されることから、形成した乾燥域の大小により、B5 と C1 とで積 $A \times h$ の大小関係が逆転することもありえると考えられ、上述のモデルにより結果を矛盾なく解釈することができる。そして、B5 と C1 で同じ温度 T_v を得る温度差($T_w - T_v$)に顕著な相違が生じるということは、多孔質内の微細構造による蒸気の加熱が過熱水蒸気の生成(蒸気の昇温)に大きな役割を演じていることを表しているといえる。

以上まとめると、高温の過熱水蒸気を迅速かつ高効率で発生させる方法として、含水多孔質体ブロックに設けた中空部の内面を、熱容量の小さなコイルヒータを接触させて強加熱するというシンプルな方法を提案し、過熱水蒸気の生成特性に与える多孔質材料の影響並びに過熱水蒸気生成のメカニズムについて実験的に検討を行った。本方法では、コイルヒータの接触部が高熱流束となり、ヒータ直下に乾燥領域が形成され、その領域がマイクロチャネル熱交換器として機能するために迅速かつ効率よく過熱水蒸気を生成できること、また多孔質材の特性によらず過熱水蒸気の迅速生成が可能であることが示された。

最後に、本研究の実験に協力いただいた、本学大学院生岸倫人君に謝意を表す。

5. 主な発表論文等

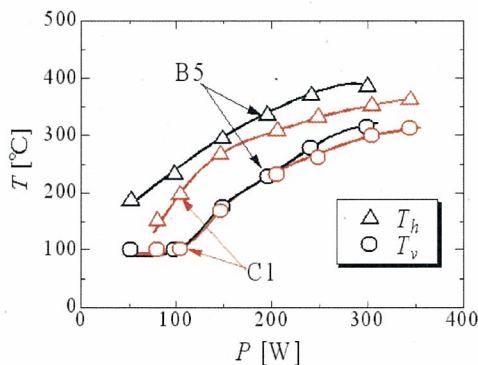


Fig.6 Heater and evolved steam temperatures plotted against heating power

[学会発表] (計3件)

- ①奥山邦人ほか2名, 含水多孔質を利用した過熱水蒸気の生成過程, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009年6月2日, 京都.
- ②奥山邦人ほか1名, 含水多孔質を利用した過熱水蒸気の急速生成過程, 日本機械学会2008年度年次大会講演論文集, No.08-1, pp.33-34, 2008年8月6日, 横浜.
- ③奥山邦人ほか1名, 含水多孔質を利用した急速過熱水蒸気生成装置, 第44回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D319, pp.701-702, 2007年5月25日, 長崎.

6. 研究組織

(1)研究代表者

奥山 邦人 (OKUYAMA KUNITO)
国立大学法人横浜国立大学・大学院工学
研究院・教授
研究者番号: 60204153

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし