

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06291

研究課題名(和文) アーク加熱とコロナ帯電を併用したコンパクト型過熱水蒸気生成法の開発

研究課題名(英文) Compact-type superheated steam generator using arc and corona discharge

研究代表者

杉本 俊之 (SUGIMOTO, TOSHIYUKI)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10282237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：液体の水の状態から一気に過熱水蒸気を生成することができるコンパクトな装置を実現するため、アーク加熱とコロナ帯電を併用した方法を新たに実現した。外径40mmの円筒電極の一端にアーク放電を末端させ、他端から液体の水を供給することで、円筒電極内を移動する蒸気が出口に向かう間に加熱されるようにした。その加熱空間にコロナ放電電極を配置し、コロナ放電を起こすことで、円筒電極側面に蒸気を駆動し、効果的に加熱できるようにした。このような仕組みにより、350℃の過熱水蒸気を瞬時に生成できるシステムの構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過熱水蒸気の発生は、従来、液体の水を一旦飽和蒸気まで加熱し、その後加熱することが必要であったため、断熱の配管等が必要となり、コンパクトでフレキシブルな装置にすることが困難であった。本方式では、水から一気に350℃の過熱水蒸気が生成できるようになったため、ロボットアームの先端に取り付けて、場所を移動させながら加熱できるシステムが構築できる点で、大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：Conventional superheated steam generating apparatus is divided into steam generation and steam heating. The apparatus intrinsically becomes large setup, and there are disadvantage in terms of efficiency and cost. The final goal of this research is to develop a compact and highly efficient superheated steam generator using arc heating along with corona discharge. An outlet of a cylindrical copper electrode is heated by arc discharge to generate superheated from saturated steam. A high voltage needle electrode is inserted in the center axis of the cylindrical electrode to transport steam to the hot cylinder wall by corona ion. The steam temperature of 350 degree was obtained by this system.

研究分野：静電気工学

キーワード：過熱水蒸気 アーク加熱 コロナ放電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

過熱水蒸気は、高い伝熱性と乾燥力を持つことや無酸素処理が可能であることから、食品の殺菌乾燥を含めた熱処理、廃棄物の処理、その他材料の乾燥や脱脂等、様々な用途に利用されている[1]。過熱水蒸気の生成方法としては、ボイラ(一次加熱)で発生させた飽和水蒸気を蒸気配管の途中で加熱器(二次加熱)により昇温させるのが一般的である。加熱器には、電熱器型、ガス燃焼加熱型、誘導加熱型など様々で、熱処理の目的等を考慮し選択されてきた。ただ、この生成方法には熱源が2つ必要になるため装置規模が大きくなり配管途中での熱損失で起動が遅く熱効率が悪くなるなどの欠点がある。近年、誘導加熱によって水から一気に過熱水蒸気を生成する装置が開発された[2]。この装置では、飽和水蒸気を過熱水蒸気にする際に使用する誘導加熱による熱を、水から飽和水蒸気にする際の熱としても利用するため効率が良くなっている。しかし、誘導加熱には高周波電源が必要となり高コストで装置規模が大きくなる。装置規模が大きいと生成装置から加熱対象物に過熱水蒸気をおくるための中間装置も必要となる。そのため、過熱水蒸気の生成効率は良くても加熱対象物に蒸気を送るまでの全体の効率は良いとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、少量生産において期待されるコンパクトかつ低コストの装置で被加熱物を一つずつ加熱するような加熱方法の確立を目的とし、アーク加熱とコロナ放電を併用する過熱水蒸気生成装置を試作し、加熱対象物の温度を測定することでその性能を評価した。

3. 研究の方法

アーク加熱・コロナ放電併用型過熱水蒸気生成装置の概念図を図1に示す。水の供給口が設けられた銅製の円筒状電極を加熱電極として用いる。蒸気生成が行われる水供給部付近の温度が100℃以上となるとライデンプロスト現象が発生し蒸気の生成効率が低下することが分かっており、水供給部付近の温度を100℃程度に抑制することが必要である[3]。そこで、加熱電極の端部にアーク放電を終端することで電極の加熱を行う。これにより、加熱電極のアーク加熱部付近では最大約600℃、水供給部付近では約100℃と、水供給部方向に近づくにつれて温度が低下するような温度勾配を持たせることができる。

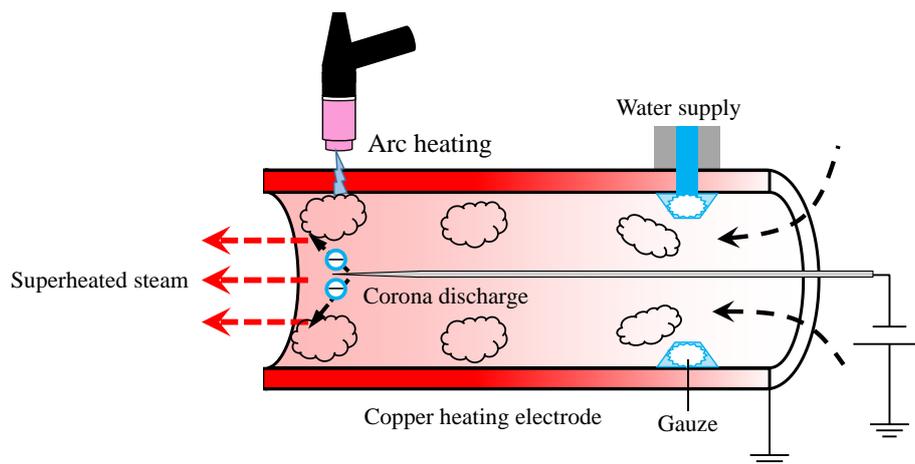


図1 過熱水蒸気生成装置の装置図

加熱電極内に液体の状態の水を供給すると、加熱電極の内壁の熱により気化され、飽和水蒸気となる。加熱電極の中心にはコロナ放電電極が挿入されている。直流高電圧を印加するとコロナ放電電極先端でコロナ放電が発生し、イオンが放出される。このイオンは加熱電極の内壁や出口方向へ向かうと考えられ、内部で水供給口側からアーク加熱部側への気流が発生する。水供給で生成した飽和水蒸気は気流に乗りアーク加熱部付近へ流れ、コロナ放電電極先端からのイオンによって高温の内壁へ駆動し、さらに加熱されることで過熱水蒸気となる。

効率良く高温の過熱水蒸気を生成するためには、水供給部による蒸気生成、アーク加熱部による蒸気加熱の各加熱工程において水や蒸気と高温な銅製加熱電極内壁との接触面積を大きくすることや、加熱電極自体が高温に加熱されるような工夫が必要である。コロナ放電電極への印加電圧、加熱電極の形状やアーク電流等のパラメータが加熱温度に与える影響について調査した。

4. 研究成果

(1) コロナ放電電極の最適化

試作した実験装置の外観を図2に示す。装置は加熱電極、コロナ放電電極、アーク溶接機(マイト工業株式会社製 MT-200FDP)、直流高圧電源(春日電機株式会社製 DH-3010PN)で構成されている。加熱電極(長さ200mm、外径40mm、内径34mm)の先端に直流アーク放電を終端

させることで加熱を行った。それと反対側の端にノズル(外径 5 mm, 内径 1 mm, ステンレス製)を介してシリコンチューブを接続し、定量送液ポンプ(東京理科機械製 MP-1000)を用いての水の供給を行った。水が供給される加熱電極の内壁にはガーゼを貼り付けている。これはガーゼに水を含ませることで水と加熱電極内壁との接触面積を大きくすることや、供給された水が直流高電圧を印加したコロナ放電電極に直接滴り落ちることを防ぐ役割がある。加熱対象物としてステンレス板を加熱電極の端から 10 mm 離れた位置に設置し、過熱水蒸気を当てた時の温度上昇を調べた。



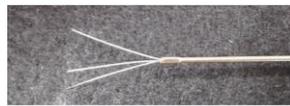
図2 実験装置

アーク電源の設定電流を 70 A, 流量を 150 $\mu\text{l/s}$, アーク加熱部は装置先端から 15 mm の位置とし、その真下がコロナ電極の先端となるように配置した。加熱対象物としてステンレス板(縦 20 mm \times 横 20 mm \times 厚さ 0.5 mm)を加熱電極の端から 1 cm の位置に設置し温度の時間変化を 240 秒間 K 型熱電対でデータロガーに記録した。コロナ放電電極として図 3 (a) のような針電極, (b) の Y 型電極, (c) の二連式 Y 型電極を試作し過熱水蒸気生成を試みた。なお、二連式 Y 型電極の一段目と二段目との距離は 2 cm としている。

図 4 は図 3 の 3 つのコロナ放電電極を用いて過熱水蒸気を生成し、ステンレス板に当てたときの温度変化である。針型コロナ放電電極では印加電圧が -6 kV 程度で最も効率良く加熱可能で、約 160 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱することができた。-6 kV から印加電圧を上昇させると加熱温度が低下する。この原因については先行研究により印加電圧を上昇させることで、高温の加熱電極内を通過する蒸気の流速が速くなり、十分に加熱されないことがわかっている。対して、Y 型コロナ放電電極では印加電圧が高いほど加熱温度が高くなり、印加電圧 -9.5 kV で約 200 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱することができた。印加電圧を -9.5 kV 以上にする 것도試みたが、コロナ放電電極先端と加熱電極内壁間で火花放電が発生し蒸気を出口へ駆動することが困難な結果となった。針電極と異なり Y 型電極で印加電圧が高い方が高温に加熱できた原因は、電極先端の向かう方向が影響していると考えられる。二連式 Y 型電極では一連式と同様、-9.5 kV が印加可能最大電圧となり、4 分間の加熱で約 245 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱することが可能となった。Y 型電極を二連式にすることで加熱電極内壁と蒸気が接触する面積が大きくなり、高温に加熱されたと考えられる。過熱水蒸気の温度の上昇には先端の形状の最適化が重要であることが示唆された。



(a) 針電極



(b) Y 型電極



(c) 二重 Y 型電極

図3 円筒電極の内部の電極形状

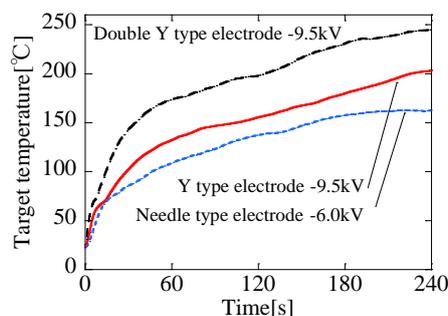


図4 過熱水蒸気を当てたステンレス板の温度変化と内部電極の形状の関係

(2) 円筒電極の最適化

加熱円筒電極内でのコロナ放電の発生ヶ所をアーク加熱部付近にすることで高温な過熱水蒸気の生成が可能であることが明らかになった。そこで、加熱電極先端の温度をさらに高くすることができれば、より効果的な加熱ができるのではないかと考え円筒電極の先端の形状を最適化する方法について検討した。

説明を省略するが、円筒電極の径が小さいほど同じ投入電力での円筒電極の温度が上昇できることが理路的に分かっていたので[4]、図5に示すように、アーク加熱部側の先端から100 mmを外径20 mm、内径16.5 mmの加熱電極に改良した。図12はアーク電源の設定電流を70 Aでの加熱開始から3分後の装置先端の温度分布をサーモカメラで撮影した様子である。測定スポット1~3はそれぞれ先端から1.5 cm、3.0 cm、4.5 cmの位置としている。改良前の先端付近の温度は434°C、対して改良後の装置では677°Cとなり局所的に温度を上げることができた。このような高温状態のまま、円筒電極の内部でコロナ放電を起こすことができれば、水蒸気を効果的に加熱することができると考えた。

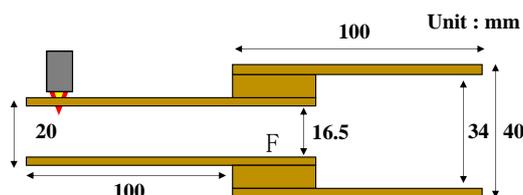
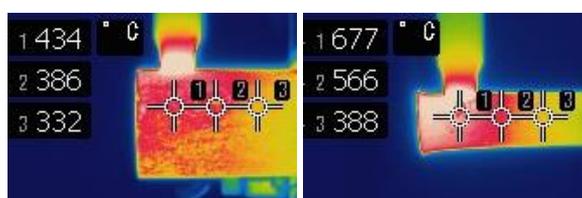


図5 改良した円筒電極の形状



(a) 改良前 (b)改良後

図6 改良前後の円筒電極での発熱状況

しかしながら、改良後の装置で過熱水蒸気を生成していると、アーク電源の設定電流、加熱電極先端と針電極先端の距離 d によって、針電極と加熱電極内壁との間で火花放電が発生し、過熱水蒸気を出口から排出することができない条件があることがわかった。図7は設定アーク電流と火花放電開始電圧の関係である。距離 d が短く設定電流が大きいほど低い電圧で火花放電が発生する傾向が見られた。このような傾向が見られたのは、距離 d や設定アーク電流の大きさによってコロナ放電電極先端の温度に大きな差が出るためと考えられる。特に先端温度が高い条件では、火花放電開始電圧が低下した。加熱電極内壁からの熱電子放出を抑制するために内壁を耐熱離型剤でコーティングした状態で電圧を印加した結果を図7の点線で示した。コーティングがない場合と比較しても火花放電電圧にほぼ差がない結果となり、加熱電極からの熱電子放出が火花放電開始電圧の低下の原因でないことが分かった。火花放電電圧の低下の原因として考えられるのは放電領域における気体分子の電離係数と平均自由行程の増加である[5]。電離係数の増加に伴い電子などが増加して電子密度が大きくなるとともに、平均自由行程が長くなることで電界による電子の加速も促進する。高温空間でコロナ放電ではなくバリア放電などを利用することで電子密度の増加を抑えることができる可能性がある。

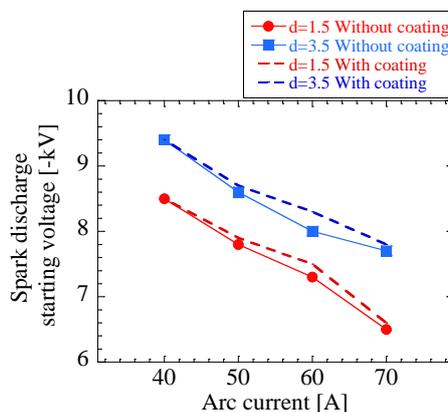


図7 アーク電流とその時の放電開始電圧

改良後の加熱電極を使用して過熱水蒸気を生成し、加熱対象物の温度特性を調査した。アーク電源の設定電流を 40~70 A、流量を 150 $\mu\text{l/s}$ 、コロナ放電電極として針電極を使用し、印加電圧を -6.5~-9.5kV とした。アーク加熱部は装置先端から 15 mm の位置とし、加熱電極の端からコロナ放電電極先端までの距離 d を変化させながら過熱水蒸気生成を行った。

図 8 はアーク電源の設定電流と加熱温度の関係である。蒸気の駆動はコロナ放電電極への印加電圧が -6.5kV から確認された。印加電圧を上げていくと各条件において火花放電に移行する電圧が異なるため、図 7 の火花放電開始電圧を印加可能最大電圧として -6.5kV 印加時の加熱温度との比較をおこなっている。同じアーク電源の設定電流では、高い印加電圧で距離 d を短くするほど高温に加熱することが可能となり、加熱対象物の温度を最大で 340°C にまで上昇させることができた。特に、設定電流が 60A 以上では $d=3.5\text{cm}$ で高い電圧を印加するよりも、 $d=1.5\text{cm}$ で最低電圧の -6.5kV を印加する方が高い加熱温度となった。このような傾向が見られた原因は、距離 d が短いほど加熱電極内壁の温度が高くなり、コロナ放電発生ヶ所では高温の加熱内壁に接触する蒸気量が多くなるためと考えられる。このように、加熱温度を高くするには加熱電極先端の高温空間で安定したコロナ放電を発生させることが効果的であることが明らかになった。

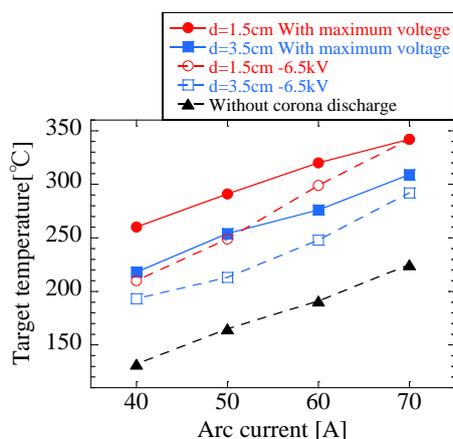


図 8 アーク電流と対象物の温度

このように、円筒電極の直径を小さくするだけで、1 台のアーク電源で約 350°C の過熱水蒸気を瞬時に生成することに成功した。さらに高い温度にしようとするには、高温に加熱する位置にまでコロナ放電電極の先端をもってあげればよいが、内部でコロナ放電が火花放電に移行しやすくなることが分かった。したがって、円筒電極の温度を高めつつ、安定したコロナ放電を起こすためには、円筒の直径を小さくせずに、複数のアーク電源から 1 つの円筒電極に向けて同時にアーク放電を飛ばす対策が必要であることが明らかになった。このような方法に筋道をつけることができたのは、大きな成果であったと考えている。

参考文献

- [1] 鈴木寛一 他：過熱水蒸気技術集成，2005，pp.1-16
- [2] 牧村雄基 他：小型過熱水蒸気発生器，パワーエレクトロニクス学会誌，2011，pp96-102
- [3] 成田優斗 他：静電気学会講演論文集，2017，p93
- [4] 吉田敏臣：熱のつたわり方，Vol.11 No4，1978，pp232-238
- [5] Pei Yan, Chenghang Zheng, Gang Xiao, Xi Xu, Xiang Gao, Zhongyang Luo, Kefa Cen : "Characteristics of negative DC corona discharge in a wire-plate configuration at high temperatures", Separation and Purification Technology 139 (2015) 5-13, pp2-10

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 姉崎直人 杉本俊之
2. 発表標題 アーク加熱式過熱水蒸気生成に適したコロナ放電電極の検討
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成田優斗 杉本俊之
2. 発表標題 アーク放電とコロナ放電を併用したイオン化過熱水蒸気発生装置の開発
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 姉崎直人 杉本俊之
2. 発表標題 アーク加熱式過熱水蒸気生成に適したコロナ放電電極の形状と配置の検討
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室URL <https://toshi677.wixsite.com/mysite>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----