小型過熱蒸気発生器

牧村 雄基* 富田 英雄* 吉村 信三** (東京電機大学)

Small Type Superheated Steamer

Yuki Makimura* Hideo Tomita* Shinzou Yoshimura** (Tokyo Denki University)

Abstract- Induction heating is an effective method for metal heating. As of the unique applications of induction heating, there is a superheated steamer. We have proposed a novel superheated steam generator having both advantages for cooling of induction coil and for warming of water in advance. However its steamer wasn't satisfactory for temperature rising of superheated steam. In this paper, we propose a heating up method with improvement of heated metal shape and a cooling method of induction coil with air and water. Therefore the practicability of our steamer is proved.

キーワード: 過熱水蒸気, 誘導加熱, 高周波インバータ, 食品加工, 高温殺菌

Keywords: Superheated steam, Induction heating, High frequency inverter, Food processing, High temperature sterilization.

1. まえがき

昨今、電磁誘導加熱 (Electro-magnetic Induction heating; 以下、IH と略す) は、高い熱効率、安全性、清潔などの理由で、家電用電磁調理器など民生機器にまで取り入れられている^[1]。著者らは、これまで小型 IH の産業応用として、建築・建設・機械分野への接着工法(Allover method)^[2]や過熱水蒸気発生装置(Superheated Steamer: 以下、SHS と略す)^{[3][4]}の研究を進めてきた。SHS は、現在も殺菌、滅菌、食品加工など、比較的大型装置として多用されているようであるが^{[5]-[8]}、著者らはその中型化(本研究では大型 SHS に対して小型と称することにする)を模索している。そこで、本研究では中型化における課題として、Litz 線誘導コイルの過熱対策と蒸気の高温化のための誘導負荷について検討したので報告する。

図 1. 過熱水蒸気プロセス
Fig.1. Process for superheated steam.

2. 過熱水蒸気発生原理

過熱水蒸気とは、Fig.1 に示すように、常圧において 100℃ の水蒸気を IH によりさらに加熱して、100℃以上にしたものを用いる。著者らは、始め 100℃蒸気発生器と本体である 100℃以上の蒸気加熱部分を一体化した SHS を研究したが、充分な 100℃蒸気を発生するためのリザーバを本体に組み入れると SHS 装置全体が大型化する懸念があり、さらに研究する必要があった。そこで、本報告では、100℃蒸気発生器を切り離して、100℃以上の蒸気加熱部分、すなわち SHS 本体のみについて検討するものである。SHS 本体の IH による示意图を描くと Fig.2 のようになる。外側に巻いたソレノイドコイルの中間に、電磁誘導による渦電流が生じる金属導体があり、コイルに高周波電流を流すと金属中の渦電流によりジュール熱が発生する。そして、Fig.3 のようにジュール熱で加熱された金属に 100℃水蒸気が触れることによって、水蒸気は温度を上げ過熱水蒸気となっていく、理論的には容易なものである。

図 2. 電磁誘導加熱の原理
Fig.2. Principle of Induction heating.

* 東京電機大学大学院理工学研究科デザイン工学専攻

** 東京電機大学理工学部研究員

〒350-0311 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂

* Graduate school of science & engineering, Tokyo Denki University.

** Research associate, School of science & engineering.

図 3. 過熱水蒸気の生成
Fig.3. Generation of superheated steam.

3. IH 過熱器本体

始めに本研究で試作した SHS 本体の概要を述べて、工夫・改良点を明らかにしたい。蒸気が触れて過熱される電磁誘導体には、磁性を有するステンレス(SUS430) が有効である。誘導体は、必要蒸気温度以上に加熱するので、かなり高温となる。例えば、蒸気温度 700℃を必要とすれば、誘導体温度はそれ以上、800℃程度以上には加熱されなければならない。したがって、加熱された誘導体およびそれに触れる過熱蒸気を通す筒は、Fig.4 のように耐熱性のある厚さ 3mm の石英ガラス管を用いることにする。試作した石英ガラス管の寸法を Fig.5 に示す。ガラス管内は誘導体の熱により高温となるので、このままでは管外への熱放射が大きい。そこで熱放射を防ぐために、Fig.6 に示す円筒状の陶製絶縁材(Heat insulator)で覆い断熱をする。しかし、それでも誘導体からのかなりの放熱を防ぐことができない。もし、この断熱筒の周りに Litz 線による誘導コイルを施すと、コイル自体が熱損傷してしまう。

そこで、著者らはコイルの熱損傷を防ぐために、コイルの冷却システムを取り入れた。Fig.7 に本体内部を表す概略図を示す。また、Fig.8 は本体筒の断面寸法図を示す。著者らは2つの冷却システムを取り入れた。1つ目は水冷である。陶製断熱筒の周りにシリコンホースを巻き(直径:4 mm、31 turn)、その中にポンプで汲み上げた常温の水を通すことで、誘導体からの熱放射を吸収する。熱を吸収し温められた水は、そのまま 100℃蒸気発生ボイラーに送り込まれる。すなわち、ボイラーに送る水の予熱を兼ねた冷却システムである。試作に使用したポンプの概観と仕様をそれぞれ Fig.9 と Table 2 に示した。

以上の冷却法により、陶製断熱筒に巻いたシリコンホースの上に誘導コイルを巻いて実験したが、それでもコイルが過熱してしまった。すなわち、シリコンホースの水のみでは熱放射を吸収できなかった。そこで、空間層を設けることで断熱効果を高めることにした。シリコンホースの周りは 10mm の空ぼうとし、空ぼう層にはファンによって風を送り込む空冷を行った。空ぼう層の外側には、コイルを巻く芯として木材を加工した土台を被せ、その周りに Litz 線(7/33/0.14)をソレノイド状に 134turn 巻いて誘導コイルとした。コイルの外側周囲には、磁束の通り道を作り出すために短冊形フェライトを張り付けた。Fig.10 はその試作 IH 本体の写真である。

図 4. 石英ガラスの内部
Fig.4. Inside of quartz glass tube.

表 1. 材料の耐熱性

Table 1. Heat resistances of materials.

石英ガラス管	陶製断熱筒	シリコンチューブ	コイル
2000 [°C]	1600 [°C]	200 [°C]	150 [°C]

図 5. ガラス管の寸法
Fig.5. Measure of glass tube.

図 6. 断熱セラミック
Fig.6. Cylindrical ceramic for heat insulation.

図 7. 概要図
Fig.7. schematic diagram.

4. 試作 SHS の実験

〈4・1〉実験方法 Fig.11 は、試作 SHS 装置全体図である。インバータは、従来から IGBT フルブリッジによる 20kHz 方形波インバータを用いてコイル電流を供給する。

なお、コイルインピーダンス最小化のために、共振コンデンサを直列に接続している。コンデンサの値は、加熱負荷によって異なるので、それぞれ Table3, Table4 に示した。

著者らは、加熱負荷として次の 2 種類の形状を選び、温度上昇実験を行い比較検討した。はじめの加熱負荷は Fig.12 のような厚さ 0.3mm の円盤状ステンレス(SUS430)とした。これを同図(b)のように中心軸に 47 枚連ねて加熱負荷とした。もう一方の加熱負荷は、Fig.13 のように円盤と同じ厚さのステンレスを自由に二重螺旋形としたものを負荷とした。2 つの誘導体は比較のために同じ加熱面積とした。なお、磁性ステンレス(SUS430)を用いたのは、非磁性の SUS304 と比較して加熱効率が良かったためである。

Fig.11 により水と蒸気の流れを示そう。始めに常温の水をポンプによりシリコンホースに送る。水量はポンプ入力電圧によって制御できる。一方、インバータ電源を入れ、誘導コイルに高周波電流(20kHz)を印加すると、誘導加熱によって加熱負荷金属が高温化する。シリコンホースの水は別の加熱ボイラーにより 100℃の水蒸気を作り、ホースを通して IH 本体の石英ガラス筒の入口に送る。送られた水蒸気は、高温化した加熱負荷金属に触れながら徐々に温度上昇を続け、最終ガラス筒出口で所望の温度蒸気を得ることができる。

実験においては、二つの加熱負荷の特性比較を行うため、コイル電流を約 12A 一定に制御した。また、装置の各温度測定には熱電対を用いた。測定時間は 1500sec までとした。

〈4・2〉100℃蒸気の加熱実験 Table 3 は、一次誘導コイルから見た円盤状加熱負荷時の入力電流を 12A としたときの電気的特性とパラメータを示す。ただし、 C_s は負荷に直列な共振コンデンサ容量である。同様に、Table4 は二重螺旋形加熱負荷の電気的特性とパラメータを示す。それぞれの電気的特性条件における過熱蒸気温度特性結果を Fig.14 および Fig.15 に示す。

円盤状負荷の蒸気温度は、じわじわと温度上昇を続け、1500sec ほどで最高 420℃まで達した。一方、二重螺旋形負荷では立ち上がり時間がすこぶる早く、50sec ほどで円盤状負荷とほぼ同じ蒸気温度に達し、600sec (10 分)ほどで最高蒸気温度 580℃付近まで上昇し飽和する。以上の結果によれば、二重螺旋形負荷の方が高温蒸気を選ぶのに優れていることが分かる。次に、重要である加熱コイルの温度が著者らの冷却手法で上昇を抑えることができたかを検証する。Fig.14 と Fig.15 中の Coil が温度変化を表し、どちらも 130℃ほどで温度上昇が抑えられていることが見てとれる。したがって、コイルの熱損傷を防ぐための水冷、空冷双方の効果が確認できた。

図 8. 断面図
Fig.8. Cross section.

図 9. ポンプとモーター
Fig.9. Configuration of water pump and motor.

表 1.ポンプ仕様
Table 2. Specifications for a pump.

	特性
モータ	シンクロモータ 5W
ヘッド回転数	60 rpm (50/Hz)
吐出圧力	0.05Mpa
使用チューブ	高強度シリコン 4.0×6.0 (mm)
耐熱	高強度シリコン ~200℃
電源	単相100V
寸法・重量	60W×60D×100H (mm) ・ 200g

図10. 装置
Fig.10. device.

図11. 過熱水蒸気発生装置概要図
Fig.11. Schematic diagram of SH-Steamer.

表 3. 円盤状負荷の電気特性

Table 3. Electric characteristics of heated circle metal.

円盤状負荷			
電流 I[A]	11.99	Z [Ω]	5.66
電圧 V[V]	67.83	Rs [Ω]	5.66
電力 P[W]	663.5	Ls [μH]	24.13
力率 p.f.[%]	82.10	Cs [μF]	2.57
周波数 f[kHz]	20.18	水量 [ml/min]	40.00

表 4. 二重螺旋負荷の電気特性

Table 4. Electric characteristics of heated spiral band metal.

二重螺旋形負荷			
電流 I[A]	12.03	Z [Ω]	7.06
電圧 V[V]	84.89	Rs [Ω]	7.06
電力 P[W]	828.70	Ls [μH]	9.36
力率 p.f.[%]	81.12	Cs [μF]	7.74
周波数 f[kHz]	18.66	水量 [ml/min]	40.00

図12. 円盤状誘導体

Fig.12. (a) Heated stainless steel disk (b) and stacked 47fins.

図13. 二重螺旋状誘導体

Fig.13. (a) Heated stainless steel band (b) and double spiral shape.

＜加熱負荷の温度分布＞ 次に、加熱負荷の温度分布をサーモグラフィーにより記録した。この場合、石英ガラス筒を開放し、無蒸気状態での IH 特性を測定した。

始めに、円盤状負荷に IH 加熱開始から 300sec 後の温度分布を Fig.16 に示す。同図によれば、円盤の外縁部分 (a 点) が高温になっている。また、蒸気が通過する穴 (b 点) なども高い。最高温度は 461℃に達しているが、誘導コイルの温度は 100℃程度である。円盤状負荷では、全体に高温加熱範囲が狭いことがわかる。

一方、二重螺旋形負荷では Fig.17 に示すように、加熱開始から 120sec で全体的に高い温度分布を呈していることが分かる。最高温度は 600℃に達しており、しかも 120sec と速い立ち上がり特性を示す。熱電対による温度上昇計測に続き、サーモグラフィーによる温度分布測定でも、二重螺旋形負荷の方が最高到達温度、短時間温度上昇において優位性が確認できた。

図16. IHによる円盤状負荷の熱分布

Fig.16. Thermal distribution of stainless steel disk by IH.

図17. IHによる二重螺旋負荷の熱分布

Fig.17. Thermal distribution of stainless steel band by IH.

図14. 過熱水蒸気の温度特性（円盤状負荷）
Fig.14. Heating characteristics of superheated steam (Circle metal).

図15. 過熱水蒸気の温度特性（二重螺旋負荷）
Fig.15. Heating characteristics of superheated steam (Spiral metal).

5. 有限要素解析

今までの実験で、螺旋形に巻いたステンレス帯が誘導加熱負荷として優位であることが証明できたが、本来は各種の負荷形状についてコンピュータ解析により最適な加熱負荷を導出する必要がある。著者らは、有限要素法を用いて形状の違いによる負荷の熱分布を解析して検証したい。始めに行う円盤状負荷は、形状をモデル化しやすい。しかし、次の螺旋形負荷では、形状に規則性がなく、かつ、立体的複雑形状であることから、解析が難しい。そこで、本研究では始めの円盤状負荷時の解析を行い、実験結果と照合するに止めることにした。なお、螺旋形負荷についての解析は、今後の課題としておく。

負荷として円盤状薄板ステンレスをサンプルとし、I 型フェライトをコイルの外側に配置した解析 2 次元モデルを Fig.18 に示す。フェライトから出る矢印は、電流の向きを示す。また、各素材の解析パラメータを Table 5 に示す。

有限要素法解析ソフトは、「ANSIS (Academic Teaching Introductory ライセンスバージョン)」を使用し、渦電流、ジュール発熱解析を行うことで、サーモグラフィー観察結果と比較をする。解析を行った渦電流分布(a)、ジュール発熱分布(b)を Fig.19 に示す。同図から渦電流が外縁に集中し、それに伴う発熱分布も同様に外縁が高くなっている。また、蒸気の通る穴付近に渦電流が集まり、発熱も生じている。

以上の解析結果と Fig.16 の比較において、解析および実験結果の高い信頼性が確認できた。

図 18. FEM 解析モデル

Fig.18. FEM analysis model.

表 5. 解析条件

Table 5. Analysis condition.

負荷	円盤状
抵抗率 [Ωm]	10.8E-8
入力電流 [A]	10
周波数 [kHz]	20
巻数 [turn]	134
フェライト 寸法	15W×40D×8H
フェライト 比透磁率	5000
空間の比透磁率	1
ギャップ(coil-metal) [mm]	17.5

(a) Eddy current density (b) Joule heat

図 19. FEM 解析結果

Fig.19. FEM analysis result.

6. まとめ

著者らの過熱蒸気発生装置を紹介し、その過熱蒸気温度特性について検討した。1500sec までの測定では、二重螺旋形誘導体で 580℃の蒸気を得ることができ、かつコイルの温度上昇を 100℃強に抑えることが出来た。また、温度の立ち上がり時間が短いことも分かり、二重螺旋形誘導負荷の優位性が確認できた。コイルの温度上昇は、空冷、水冷、双方の効果によって、熱損傷を防ぐことができた。

本稿では、有限要素法解析ソフト「ANSIS」により、円盤状負荷の渦電流、ジュール発熱分布の解析を行ったが、二重螺旋形負荷では形状が複雑なため、解析の手法を見いだせなかったのが課題として残った。また、本稿では 100℃の水蒸気を作り出す別置ボイラーについて言及しなかったが、過熱蒸気発生器にボイラーを含ませた一体型との比較検討は、稿を改めて言及したいと考えている。

文 献

- [1] 大森:「家庭用 IH クッキングヒータ用ソフトスイッチング PFC コンバータにおける DCM 制御と CCM 制御の実証的比較評価」パワーエレクトロニクス学会誌 JIPE-35-10 (2009)
- [2] 富田:「熱可塑性・熱硬化性接着剤を用いた解体性接着手法」日本接着学会誌,Vol.1.39,No.7(2003)
- [3] T. Maruyama, H. Tomita, S. Yoshimura, "Superheated vapor generator by induction heating", MEATRONICS 2008, #178, May 2008, France.
- [4] H. Tomita, T. Maruyama, S. Yoshimura, N. Takahashi, "Superheated steam generator by induction heating", EPE -Barcelona 2009, Spain.
- [5] <http://www.econos.co.jp/english/products.html#2>
- [6] G.Rodriguez, J.Vasseur, F.Courtois, "Design and control of drum dryers for the food industry. Part1. Set-up of a moisture sensor and an inductive heater", Journal of Food Engineering, Vol.28, Issues 3-4, pp.271-282, 1996.
- [7] O.Yamada, "Generation of hydrogen gas by reforming biomass withsuperheated steam", Thin Solid Films, Vol.509, Issues 1-2,pp.207-211, 2006..
- [8] A.S.Mujumdar, L.X.Huang, "Global R&D needs in drying", Drying Technology, Vol.25, pp.647-658, 2007.

(2010 年 8 月 7 日発表)

【質疑】

指定討論者 ヤンマー株式会社・茂木進一氏

【質問1】温度の上昇曲線（図14,図15）に変曲点が出るようですが原因は为什么呢？

【回答1】数度の実験では、送風や水滴などの条件の変化により、測定値は多少変動し、幾度か変曲点が見えます。特性図は比較的良好結果のものです。

【質問2】実験では負荷に入力する電流を同一条件としておりますが、電力を同一条件とした場合は如何でしょうか？

【回答2】実験条件として、入力電流値を一定にする理由は、起電力を一定にするためです。こうすると、負荷形状により加熱電力が変わり、発熱が比較できると考えました。ただ、ご指摘の通り、入力電力を一定にして比較すると、加熱電力が同一になるので、負荷形状による温度上昇の差異が見られるものと思われます。

【質問3】周波数を約20[kHz]としておりますが、その設定理由があればご教示下さい。また、最適な周波数はあるのでしょうか？

【回答3】研究では、当初からIGBTによるインバータを試作し実験に供しておりましたので、IGBTのスイッチング周波数限界を考慮して、周波数を20[kHz]としました。解析結果や実験でも確認しておりますが、周波数が高い方が負荷の発熱には適していると考えております。最適な周波数は把握しておりません。

山口大学・平木英治氏

【質問1】コイル発熱の原因は、自己発熱よりも誘導体からの放射熱が主であるとのことですが、その理由を教えてください。

【回答1】誘導コイルは、当然、電流による自己発熱をしておりますが、やはり主なのは誘導体からの放射熱が大きいです。当初、クーリングホースのみで放射熱を吸収できていましたが、誘導体温度が高くなると放射熱が上昇し、風冷を伴う空間層が必要になりました。そうした場合、コイルは130[℃]ほどの上昇で飽和します。

正会員・木下繁則氏

【質問1】誘導加熱コイルをパイプ状にし、この中に水を通すことによって蒸気が発生させることが出来るのではないのでしょうか？

【回答1】従来から、大中型誘導加熱装置は誘導コイルに中空銅パイプを使い、中に冷却水を流す構造でした。我々の研究では、家電IHのようにリッツ線を用いた空冷方式としましたので、コイル過熱対策が必要となります。

パナソニック株式会社・大森英樹氏

【質問1】二重螺旋負荷は何故性能がよくなるか？

【回答1】誘導体形状は、種々工夫してみましたが、多くはすでに特許で明らかにされておりました。この螺旋形状は加熱理論から導き出されたものではありません。今後、解析して効果を証明したいと考えます。ただ、形状が複雑なのでFEM解析が困難です。課題とさせていただきます。

東京工業大学・嶋田隆一氏

【質問1】発熱体の定数、電気抵抗が大幅に温度によって変化するはず、そのことで発振器に問題は起きないか？

【回答1】各パラメータの値は、電源を入れてから多少変化していきます。インバータ特性に影響を与えるほどではありませんでした。しかし、実験では入力電流を一定として比較検討しております。いまのところ、常に手動にて入力値を合わせて実験しております。

名古屋工業大学・小坂卓氏

【質問1】円盤状負荷で外周側に電流が集中しているのは、表皮効果で、螺旋形負荷はキャンセルリッツワイヤのようなイメージになっているのではないのか？

【回答1】ご指摘のように、円盤状負荷の外周側に電流が集中しています。解析的に検討してみますと、電流周波数、負荷鋼板の透磁率と抵抗率が微妙に関係して、円周上に渦電流が集中していきます。総合結果として表皮効果の影響であると考えますが、上記のパラメータが電流集中にどのような相乗効果を持つのかは、さらに解析を進める必要があります。この結果をみて電気回路的に考えますと、キャンセルリングワイヤが相互インダクタンスMを介して円盤の外周に想定されると考えられます。なお、負荷鋼板は一般の圧延材料で磁気材料目的でないため、上記パラメータが明らかでなく、解析を困難にしております。

一方、螺旋型負荷では、サーモグラフを見れば明らかなごとく、どの場所でも一様に加熱されております。負荷形状が複雑なため、解析を困難にしています。これを解明するために、モデル形状などさらに解析を進めたいと思います。