マルチコイル誘導加熱による鍋の温度制御

安藤 彰洋* 羽根吉 寿正* 富田 英雄** 高橋 信雄**

Thermal control of large pot with multi-coil induction heater

Akihiro Ando*, Toshimasa Haneyoshi*, Hideo Tomita**, Nobuo Takahashi**

Abstract - Nowadays, cooking equipment using induction heating is increasing for safety, high efficiency, and low cost. In this paper, a thermal control of large pot for ODEN warming using induction heating is studied. Many of the current products are heated by one induction coil in whole of a pot. However a fine thermal control of segmental area in pot might be difficult because of warming its whole. In this study, we proposed a thermal control of pot water in six segmental areas with six induction coils. Thus an appropriate thermal control of pot for ODEN warming was realized.

キーワード : 誘導加熱, 誘導コイル, 高周波インバータ, 非磁性体金属

Keywords : Induction heating, Induction coil, High-frequency inverter, Non-magnetic metals

1. まえがき

昨今、小型誘導加熱 (Induction Heating :IH) 器が安全で高効率加熱器として様々な家電や産業機器に応用され、需要が高まっている。^{[1][2]}これは高電圧・大電流対応の IGBT 素子に代表される高性能スイッチングパワーデバイスが、より小形、安価に製造される結果といえる。

筆者らは、小型誘導加熱を応用した製品として、業務用のおでん鍋の効率的な温度制御について注目した。^[3]おでん鍋の加熱とは、具材と汁を 60℃～100℃近傍に制御することで、一般におでんウォーマーとよばれている。従来のおでんウォーマーは、シーズヒータやガス着火を用いた加熱器が主であるが、単一コイルによる IH 型加熱器もみられる。^[4]いずれの加熱器も基本的には鍋全体を加熱し、一つの鍋で複数の具材を加熱するおでん鍋は、鍋内に仕切りはあるが具材ごとの温度制御は不可能である。鍋に新たな具材を投入する際や再加熱する場合に、それ以前に入っている具材を必要以上に煮過ぎてしまうことや、鍋全体加熱のために不必要にエネルギーを消費してしまうといった不都合が生じていた。そこで本研究では、複数の誘導コイルを用いて、具材ごとに適切な加熱および温度調節を可能とする方式を提案する。また、具材の出し入れによる外乱が加わり温度低下した際に、速やかに低下した領域に集中加熱する方式を提案する。

本稿では具体的なシステム構成と領域ごとの水温の温度制御について述べるが、おでん鍋に限らず、諸々の流体加熱に応用できるものと考えている。

2. システム構成

〈2・1〉加熱対象物

図 1 に加熱対象物である鍋^[5]、図 2 に鍋底面のコイル配置を示す。材質は非磁性ステンレスである SUS304 であり、底板と中敷きを用いて空間を 6 箇所に分けて使用する。この時の一箇所あたりの領域幅は 13.5cm×12.0cm 程度である。仕切りには隙間があるので具材の区分けは可能であるが流体は相互移動し、完全には区分けできない。

Material:SUS304 Tickness:1.5[mm]

図 1 おでん鍋外観と鍋寸法図
Fig.1 Oden pot and measurement.

* 東京電機大学大学院理工学研究科電子・機械工学専攻
〒350-0943 埼玉県比企郡鳩山町石坂
Graduate Sch. Of Sci. and Engr. Tokyo Denki University,
Hatoyama, Saitama, 350-0394

** 東京電機大学理工学部電子・機械工学系
〒350-0943 埼玉県比企郡鳩山町石坂
Div. of Elec. & Mech Engr, Tokyo Denki University
Hatoyama, Saitama, 350-0394

図 2 鍋底面のコイル配置
Fig.2 IH-coils in segmental area of bottom.

〈2・1〉高周波インバータ回路の構成

表 1 に、本研究で試作したインバータの仕様、図 3 にインバータ主回路構成を示す。インバータは民生での使用を想定し、供給電源は単相 AC100V を用いる。整流ダイオード・平滑化回路を用いて全波整流し、インバータ回路にて高周波方形波交流を共振し、各 6 個の誘導コイルに通電する。インバータは IGBT を用いた一般的なフルブリッジ型のインバータである。本インバータの特徴は、各コイルへの電流分配用 6ch-IGBT アームに対して、下部アーム(回路図右端 IGBT アーム)を共通化してアーム数を削減し、構成をシンプル化した。しかし、共通アームは絶えずスイッチング電流が流れるので、熱設計に注意する必要がある。

インバータによるコイル電流の制御は、鍋の温度検出による ON-OFF 制御とし、細かい導通角制御は行わない。以上は全て mbed マイコン (NXP 社 LPC1768) ^[6]により制御される。なお、IGBT スwitchングデットタイムは 2μsec とした。

表 1 インバータの仕様

Table1 Specification of inverter.

Output Voltage	100V
Output Current	9A
Frequency	50kHz
Channel	6ch

〈2・3〉誘導コイルの説明

図 4 に製作した誘導コイルを示す。コイルの直径は鍋底を 6 分割した際の 1 領域 13.5cm×12.0cm 角の中に納まり、

かつコイルを固定する耐熱樹脂容器直径 9cm に納まるようなスパイラルコイルを製作した。フェライト (30×11×6[mm]:JFE フェライト製) はコイル底面に放射状に 6 個配置し、磁束が対向させる金属鍋に均等に届くよう配慮した。各コイルは 20 ターン×2 層の 40 ターン程であるが、2 層にした理由は巻き始めと終わり端子をコイル外に出すためと、共振を用いない回路構成で所望の仕様の電流となるようコイルインピーダンスを高めたためである。表 2 は、製作したコイル 6 個の無負荷時 (鍋が乗っていない状態) の平均特性であり、表 3 はおでん鍋をギャップ 1.5mm 開けた (鍋底面とコイルとの間隔) 際に、製作したインバータによるコイルの電気特性 (本稿では有負荷特性とよぶ) である。図 5 は製作したコイル 6 個を設置した図である。

図 4 コイル形状
Fig.4. Trial IH-coil.

表 2 誘導コイルの諸元特性 (平均)

Table 2 Electric data of induction coil.

Litz Wire	0.14mm x 12 x 7
Turn	40 turns
Z (Impedance) 50kHz	24.48 Ω
R (Resistance)	175.16 mΩ
L (Inductance)	77.92 μH

図 3 6ch コイル電流分配型インバータ回路図
Fig.3 6ch inverter circuit.

表 3 コイルの有負荷特性

Table3 Electric characteristics of coils.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5	Coil 6	Average
Voltage [V]	91.41	89.3	92.45	88.57	90.12	90.08	90.32
Current [A]	9.40	9.32	9.88	9.16	9.12	9.80	9.45
Power [W]	318.2	270.3	347.7	355	287.6	346.1	320.8
Power Factor	37.04	32.48	38.05	43.7	34.76	39.23	37.54

図 5 コイル配置図

Fig.5 Arrangement of induction coils.

図 8 コイル、温度センサ配置図

Fig.8 Position of induction coil and sensor.

〈2・4〉 温度測定方法

鍋内の水温を測定するために、図 6 の赤外線式温度センサ MLX90614 (Melexis 社製) を 6 個使用し、図 8 のように鍋の外側面の温度を測定して、水温を推定した。その理由は、食品を扱う観点から、水温を直接測定するセンサは不適と判断したためである。また、鍋に直接接触して鍋温度を測定するサーミスタなどでは、鍋の取り外し時に不便であると想定し、測定距離を取れる赤外線式とした。鍋側面にセンサを設置した理由は、鍋底部分の金属温度と水温との温度差が激しいため、比較的水温との温度差が少ない鍋側面とした。図 7 は、実際にセンサを配置した時の写真を示す。

図 6 温度センサ(MLX90614)

Fig.6 Infrared thermal sensor.

図 7 赤外線温度センサの配置図

Fig.7 Position of thermo sensor.

〈2・5〉 温度制御方法

図 9 に、プログラムフローチャート(図 9 は紙面の都合上、コイル 1~3 の温度設定、温度計測、加熱のフローチャートであるが実際用いたプログラムはコイル 1~6 までである)を示す。加熱開始前に 6 チャンネルそれぞれの制御温度を 100 度まで 5 度刻みで設定し加熱を開始する。あるコイルのインバータを ON する前に領域(鍋側面)の温度を計測し、設定温度値を下回っている場合にはインバータを設定時間(例えば 1 秒間)ON にして加熱を行う。また、設定温度値を上回っている場合にはインバータを ON せず、直ちに次のコイルに移行して鍋側面の温度計測、設定温度値との比較を行い、インバータを動作させるプログラムとした(図 9 内の T,F 分岐)。この動作をコイル 1 からコイル 6 まで順次行って一巡するものとした。

コイル 1 個あたりの加熱時間は任意に設定可能であるが本実験では基本を 1 秒とし、6 秒かけてコイル 6 個を 1 ループとした。温度計測と加熱のタイムチャートを図 10 (図 10 も紙面の都合上、コイル 1~3 の温度計測、加熱のタイムチャートであるが実際用いたプログラムはコイル 1~6 までである)に示す。もしも、ループにおいてコイル 2 の鍋領域温度が設定温度に達している場合には、コイル 2 の加熱は行わず、直ちに温度センサ 3 に移行するプログラミングである。すなわち、1 ループの時間が 1 秒短くなり、加熱周期が早まり、温度制御応答が改善される。また、温度計測と加熱(インバータ動作時)の時間をずらすことにより加熱中の磁界発生による温度センサの誤動作を防いでいる。

図9 プログラムフローチャート

Fig.9 Program flowchart.

図10 温度計測、加熱のタイムチャート例

Fig.10 Sensing and heating time chart.

表4 入力電気特性(通電30分後)

Table 4 Input electric characteristics (30minutes later).

	Voltage[V]	Current[A]	Power[W]	pf[%]
No-load	103.4	4.2	24.9	5.8
Pot load	90.3	9.5	320.8	37.5

図11 水温、電力-時間グラフ

Fig.11 Temp/Power-Time graph.

3. 検証実験

〈3・1〉加熱効率計算

エアギャップ 1.0mm+天板厚 0.5mm の合計 1.5mm のギャップを設けた状態でおでん鍋の加熱実験を行い、コイルへの入力電気特性を測定し、表 4 に示した。このときインバータは常時 ON である。無負荷はコイルのみに通電した状態、有負荷はギャップ 1.5mm でおでん鍋を載せた時の特性である。それぞれ通電後 30 分後に測定した。

この時無負荷時の電力 W_1 、24.9W の内訳を考えると表 2 からコイルの R 成分 (線抵抗) は $175.16\text{m}\Omega$ であるので無負荷時のコイルの銅損 W_{c1} は電流 I_1 を用いて

$$W_{c1} = I_1^2 \times R = 4.2^2 \times 0.175 = 3.1 [\text{W}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。よって無負荷時電力 24.9W から銅損 3.1W を差し引いた 21.8W がコイルの鉄損 W_{Iron} であると思われる。これを有負荷時に適応すると R 成分は変化しないものとしてコイルの銅損 W_{c2} は電流 I_2 を用い

$$W_{c2} = I_2^2 \times R = 9.5^2 \times 0.175 = 15.8 [\text{W}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。先ほどの鉄損 21.8W と足し合わせて入力電力から引くと二次側で消費された電力 W_2 は

$$W_2 = W_1 - (W_{\text{Iron}} + W_{c2}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$= 320.8 - (21.8 + 15.8) = 283.2 [\text{W}]$$

となる。すなわち、鍋に供給される加熱電力 W_2 は 283 [W] 程度である。

〈3・2〉水の加熱実験による加熱能力の検証及び

2 次側消費電力の検証

コイル 6 個を用いて加熱実験を行った。開始水温は常温水 (27℃) とし、水量は具材を満たした際適量と思われる量として、鍋の容積の約 50% である 6-liter (以下、liter は L とおく) とした。本実験では鍋に仕切りは用いず、鍋全体の加熱を行った。温度測定方法は熱電対 6 本を各領域の中心の水の中に入れ平均値を取りグラフ化した。図 11 は測定結果であり第 1 軸が水温、第 2 軸が水温上昇に使用されたエネルギーから計算した平均電力 (近似曲線) である。

約 120 分で 80℃ 付近まで加熱を確認し、実験を終了した。後半に連れて傾きが下がっていくのは、外気との温度差や水自体の放熱によるものと考えられるので、蓋や外枠などで鍋の周辺の保温を施せば改善できると考える。

次にインバータで消費した電力 (1 次側) がどの程度おでん鍋 (2 次側) で消費されたかを水温の上昇によって求めた。

おでん鍋で消費された電力 W は効率計算に良く用いられる次式

$$W = \frac{mc(t_2 - t_1)}{T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

m: 質量 c: 比熱 t_2 : 加熱後温度

t_1 : 加熱前温度 T: 加熱時間

から求められる。^{[7][8]} 水 6L (6000g)、水の比熱 $4.217\text{J/g} \cdot \text{K}$ 、加熱前温度 t_1 は前述から 27℃ である。加熱後温度 t_2 は 80℃ ではなく図 11 のグラフの傾きがあまり変化していない

30 分の値である 44.5℃とした。よって加熱時間は 30 分となる。これらの値から電力 W を求めると 240W 程度となった。

今回の結果 240W から (3・1) で求めた 2 次側電力値 283.1W と比較すると鍋側で発生した熱量のうち 85%程度が水へ移行したと考えられる。残りの 15%程度は鍋側面の熱放出や水自体の放熱量等を考慮しないための値であり、加熱された鍋の温度から水温に変換される際に生まれた損失と考えられる。なお、詳細な水温や電力の推定は別途行うこととする。

〈3・3〉 水温制御実験

マイコン上で設定した水温（鍋側面）を温度センサで測定し、水温の保持・上昇が可能かの実験を行った。実験は

- 1. コイル 1,2 を 40℃保持
- 2. コイル 1,2,3 を 40℃保持

の 2 パターンとし、各実験において上記以外のコイルは加熱をし続ける設定とした。水量は 2L とした。水温測定の熱電対は温度センサの計測位置付近に設置し、加熱開始時の水温は 30℃付近であった。このとき鍋内に仕切り板を用い温度領域を区切ることとした。上記条件の保持温度領域が 50℃になったところで加熱を終了した。

図 12, 13 に水温制御実験の結果を示す。加熱開始から 40℃に到達した後、設定した領域で保温状態となり温度差を設けた加熱動作が行えた。実際には仕切りの隙間を流体が行き来するので、他のコイルの加熱に伴い温度制御領域もゆっくりと加熱していく温度変化となっている。40℃を過ぎてから温度保持しているコイル以外の温度上昇の傾きが上がっているのは、〈2・4〉で述べたように 40℃温度保持によって加熱しないコイルが発生し、他のコイルの加熱 1 ループの時間が保持している領域分短くなるので加熱サイクルが早まる。これによって通常の加熱サイクル 6 秒よりも時間を短縮した加熱となり、加熱時間短縮に結びついている。

図 12 水温変化（コイル 1,2 を 40℃保温）
Fig.12 Water temperature (coil 1 and 2 keep 40 degrees).

図 13 水温変化（コイル 1~3 を 40℃保温）
Fig.13 Water temperature (coil 1,2 and 3 keep 40 degrees).

〈3・4〉 動作時消費電力量測定実験

加熱時（連続運転）と保温時（適宜 ON-OFF）の積算電力を測定し、保温時における省エネ効果が期待できるか検討した。パワーメーターを使用して、各コイルに印加される電流・電圧から積算電力を求め、常時加熱している場合と設定温度による保温時ではどの程度消費電力量に差があるかを調べた。加熱時は全ての領域が設定温度に達していない状態、つまり 6 個のコイルが 1 秒ずつの加熱状態であるときであり、保温時は設定温度を 6 箇所全て 60℃とした。保温時は前項で説明したように 60℃を下回ったと各センサが判断した時のみ加熱される。両実験とも 1 時間の実験を 3 回行い、その時の平均電力量を表 5 示す。またその内の 1 回の保温時の水温グラフを図 14 に示す。

図 14 水温 60℃制御時の各領域温度変化
Fig.14 Water temperature in each areas keep 60℃.

結果から保温時の 207.6Wh は加熱時（連続運転）の消費電力量 428.5Wh に比べ 48.4%の消費電力量で済む結果となった。また、保温時であるが若干の乱れはあるものの±3℃の

表 5 1 時間あたりの消費電力量
Table 5 Power consumption for 1 hour.

	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	Coil 5	Coil 6	合計
Full power [Wh]	75.4	61.3	82.5	63.9	65.4	80.0	428.5
At warming [Wh]	27.5	27.1	40.0	34.1	35.6	43.3	207.6

中で温度が維持できていることが確認できたので、実用上十分な保温動作ができていると考えている。

〈3・5〉 外乱実験

水量を 2L、水温 60℃一定制御において、一部領域の温度変化を意図した外乱実験を行った。仕切りにて分割した領域 1 箇所のおおよその水量は 2L の 1/6 で 330cc 前後であり、コイル 1 領域に外乱として氷 30g×3 個（想定領域水量の約 3 割）を投入し、熱電対を用いて温度変化を記録した。熱電対の位置は各領域の中心、水位の中央になるよう調整した。

図 15 に外乱を投入した場所、図 16 に温度制御時の水温変化の結果を示す。60℃を下回ったコイル 1, 2 領域が集中的に加熱され設定温度である 60℃まで速やかに復帰していることが確認できる。その他の領域は 60℃付近にて温度維持しているのが見られる。

図 15 外乱投入場所

Fig.15 Disturbance input point

図 16 領域 1 への外乱投入時の 60℃温度制御の水温変化

Fig.16 Water temperature at disturbance in area 1.

4. 結 論

以上の実験検証より以下のことが確認された。

(1) 製作したシステムの水温加熱能力を示すことができた。また、初期加熱にかかる時間であるがプログラムの変更により解決できる。それは、コイルを複数同時に駆動するように変更すれば現状よりも加熱時間を短縮することができる。しかし、コイル 1 個加熱時の電流、電力(本実験では約 9A, 300W)が、複数コイル同時加熱では複数倍の電流・電力を必要とする。ウォーマー(保温器)としての機能ならば本システムのコイル 1 個加熱で十分であると考えられる。

(2) 温度制御実験により、領域別に温度設定して他の領域と温度差を設けて加熱をすることができた。また、加熱しない領域があれば、他の領域の加熱サイクルを早めて、加熱時間短縮に結び付けることができた。

(3) 全動作時と保温状態における電力量を比較し、保温時において 50%以上の低消費電力を確認できた。また保温時では、インバータの単純な ON-OFF 制御でも±3℃と良好な制御結果が得られた。

(4) 保温状態において外乱を投入した際に、設定温度を下回った領域のみ集中加熱し、温度復帰を速やかに行うことが確認できた。

本研究では、マルチコイルを用いた新たなおでん鍋の製作を目標にし、単純な温度制御による領域ごとの温度変化や保温時の低消費電力化、外乱時の速やかな復帰を達成するなど、実用化の目的に近づくことができた。今後は更なる加熱時間やコイル効率の向上、並びにユーザーが使用するにあたっての安全性を確認するための電磁環境解析や試験を行い、総合的な評価に結びつけてゆきたい。

文 献

- [1] 庄司 浩幸：「IH 調理機器における最新技術」、電気学会誌, Vol.132, No.8, P.545-547, 2012.
- [2] 大森 英樹 岩井 利明 中島 昇：「拡大型を迎えた家電・モバイル機器のエネルギーエレクトロニクス」、電学論文誌 D(産業応用部門誌)、Vol.124, No.11, P.1087-1093, 2004.
- [3] 安藤 彰洋, 羽根吉 寿正, 富田 英雄, 高橋 信雄：「マルチコイルを用いた効率的誘導加熱器の研究」、電気学会産業応用部門大会, Y-46, 2013
- [4] http://www.toshiba.co.jp/living/professional/iho_pdn1/：「IH おでんウォーマー IHO-PDN1」
- [5] http://www.eishin-esdk.co.jp/data_files/view/140：「おでん鍋 CVS-6D」
- [6] <https://mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/>：「評価キットマイコン mbed」
- [7] 関根 崇光, 富田 英雄, 小畑 修二, 吉村 信三：「平面の均一加熱のための移動磁界方式誘導加熱」、パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.32, pp137-143, 2006.
- [8] 飴井 賢治 山本 智大 大路 貴久 作井 正昭：「高周波誘導加熱方式の缶飲料加熱装置に発生する加熱ムラの抑制と高効率化に関する検討」、電学論文誌 D, Vol.133, No.1, P.43-49, 2013.

【質疑】

株式会社ダイヘン 服部 将之氏

【質問 1】 電流回路（アーム）をシェアするため、共通アームのみ稼働率が高いと思われる。熱的な対策はなにかしているか。フルブリッジで温度が異なるためデバイス特性が異なるが電流歪み等は発生しないか。

【回答 1】 現状の熱対策はヒートシンクを用いた空冷方式です。IGBT の接合温度は最大 150℃であり、現在の 9～10A 程度での運転では非共通アーム 40～50℃、共通アーム 80～90℃となっています。この状態において連続運転時に問題はないことを確認しております。ご指摘の温度差によるデバイス特性については共通アーム部の冷却を強化し、温度差を少なくすることを検討したいと思います。

【質問 2】 コイルを順番に各コイル 1sec ずつ運転しているが最適な動作となっているのか。

【回答 2】 本報告に先立って各コイルの加熱時間を 1 sec, 2sec, 3sec の 3 種類にて水温加熱実験を行ったところ、加熱時間と水温上昇はほぼ一定の上がり幅を示しました。（図 A）よってコイルを均等な時間（任意）で順次ループさせた場合における加熱上昇に大きな変化はないと判断いたしました。しかし現状のプログラムでは 1 個あたりの加熱時間を長くしすぎてしまうと設定温度を超え過ぎた加熱をしてしまう場合があります。

図 A 加熱時間変化における時間－水温変化グラフ

【質問 3】 氷投入等の外乱を実験されているが各コイル（領域）の温度をフィードバックすることで運転コイル、稼働時間等の最適化ができるのでは。（応答速度、ロバスト性）

【回答 3】 ご指摘どおりプログラムの変更で加熱中において常に加熱領域の温度測定をフィードバックし、設定温度に達した時点で加熱終了とするようなものに変更すれば稼働時間、余剰加熱の低減や消費電力の削減に繋がるものと思われる。現在は設定温度の公差を明確には決めていませんが論文内図 14 の結果から各コイル 1 秒加熱の場合保温時

の公差は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 程度とおもわれるので加熱対象物によって公差を柔軟に変更できるようなシステムを目指したいと考えています。

大阪大学 三浦 友史氏

【質問 1】 共通アームの使用素子については、他のアームの素子に比べ通流率が高いので熱設計は厳しい条件になると思いますが、電流定格については他の素子に比べて大きく設計する必要はないのではないのでしょうか。

【回答 1】 電流定格自体では同じ値で動作に問題はありませんがスイッチング損失は他のアームに比べ増えるのであるべくスイッチング損失が少ない部品選定をしたほうが良いと考えます。これからは共通アームを中心とした熱設計をしていきたいと思います。

【質問 2】 温度センシングを誘導コイル駆動停止時に 6 チャンネル一斉に行い、ソートして最低温度の領域だけコイルを駆動するという制御の方が効率的かと思いますが、そのような制御は可能でしょうか。

【回答 2】 プログラミングの変更により可能です。現在の温度測定法もご提案の方法も計測時間としては数ミリ秒で済むと考えていますが、直近の温度を測る現方式のほうが測定誤差は少ないと思われます。しかしながらソート方式も応用すれば高度な温度制御が可能かと思しますので今後の検討課題としたいと思います。

株式会社安川電機 寺園 勝志氏

【質問 1】 IH クッキングヒータと同様に鍋底にコイルを設置しているのは何故でしょうか？例えば非接触給電技術で損失を大きくしてはいかがでしょうか。

【回答 1】 現状のおでん鍋において鍋底から温める方式が一般的であるため踏襲しました。設置箇所を考えた場合の省スペースにも寄与すると思います。また今回の報告はおでん鍋を領域ごとに分けた部分加熱制御となっております。各コイルの加熱効率を上げることに 대해서는現在検討中であり次回への課題としたいと思います。

木下 繁則氏

【質問 1】 現在の“おでんウォーマー”の加熱性能は氷投入時温度低下 30℃、回復時間 10 分程度とのこと。これは 100V コンセントから電力制御のため。インバータの直流側に EDLC を挿入すれば 100V コンセントの電力制御から開放されて加熱時間の短縮を大幅に短縮できる。更なる“おでんウォーマー”の差別化にできると思われる。検討してみては。

【回答 1】貴重なご意見ありがとうございます。現状の回復時間 10 分程度は市場の要求を満たすレベルであると考えております。加熱効率を向上させる方法といたしまして共振コンデンサを用いた力率改善方法、またはご提案のような EDLC を用いた電流増加方法が挙げられます。今後それぞれのメリット・デメリットを考査の上検討していきたいと考えております。

論文査読委員

【質問 1】図 11 の Power consumption は加熱開始から水に吸収された平均電力を示していると思われるが、300W から 100W まで一様に低下している理由は何ですか。

【回答 1】その解釈で問題ありません。実際には (3) 式で求めた 280W 程度が常に鍋を加熱している状態ですが水温が上昇していくに連れ、常温室内と水温との温度差が広がり、熱流が増えたために水に吸収される平均電力よりも空气中に放熱されてしまう損失が増えたと思われます。今回は鍋側面等の保温対策をしていなかった為損失が大きかったと思われます。論文内にありますように保温対策をすれば改善できると考えております。