

技術資料



Technical Data

IH 調理器具用溶射ワイヤの開発

山田慎之介*, 南川裕隆*

Development of Arc Spraying Wire for IH Cookwares

Shinnosuke Yamada and Hirotaka Minamikawa

Synopsis

Recently, in terms of weight reduction for IH cookwares, twin wire arc spray process has been applied to manufacturing of the cookwares. However, material properties (especially electric and magnetic properties) of the arc sprayed coating are different from the original wire material due to the large amount of oxides and porosities in the coating produced during the spray process. In this paper, we have investigated the effect of Si content of the original material on the electric and magnetic properties of the sprayed coating and developed the sprayed coatings, which have high heating efficiency for the induction heating cooker. As a result, the followings were clarified:

The increase of Si content of the original wire material has the following effects on the sprayed coatings.

- 1) Reduction of the oxidization in the sprayed coating.*
- 2) Decrease of electric resistance of the sprayed coating.*
- 3) Increase of the permeability of the sprayed coating.*

The above improvements on electric and magnetic properties of the sprayed coating lead to higher heating efficiency for the induction heating cookers than Al clad pots..

1. 緒言

近年、日本国内の一般家庭におけるエネルギー需要はガスから電気へと大きく変化している。東日本大震災の影響により多少の鈍化が見られるものの、オール電化住宅の普及率は2012年度見込みで10.2%、累計511万戸となっており、2020年度には16.2%、累計824万戸と予測されている¹⁾。オール電化住宅の普及拡大に伴い、ガス機器に比べ高い安全性と利便性を持つIH(Induction-Heating:誘導加熱)調理器の一般家庭での使用が進んでいる。

IH調理器の加熱原理は以下の通りである。加熱コイルに高周波電流を流し、磁場を発生させて電磁誘導により調理器の底面に渦電流が流れ電気抵抗によりジュール熱に変換、材料内部より加熱される²⁾。被加熱材すなわち調理器具には導電性を有する磁性材料が最適であり、鉄、鉄ほうろう、フェライト系ステンレス鋼などが一般的に用いられる。

近年ではアルミや銅といった非磁性材料に対して、IH調理器の駆動周波数を高周波化させ、表皮効果により渦電流が材料表面に集中することで電気抵抗の低い非磁性金属(比透磁率 $\mu \doteq 1$)でも加熱可能となっているものの、鉄系材料に比べ、発熱効率は下がる^{2), 3), 4)}。

IH調理器具には、鉄鍋や鉄ほうろう鍋などの上述した磁性材料単体の他に、アルミ鍋や銅鍋などの非磁性材

料による調理容器の底面に磁性材料をコーティングしたものが挙げられる。コーティング方法としては、圧延クラッドおよび溶射法などがある。

IH調理器具に対する溶射としては主に鉄系合金を用いた高速フレイム溶射やアーク溶射、最近ではコールドスプレーが用いられる⁵⁾。特にコールドスプレーは原料粉末を数百℃の低温で高速衝突させ成膜するため、溶射材料の電磁気特性を損なわずにコーティングが可能であるが、粉末を用いるため生産性(溶射速度)が低く、設備費および運転経費が高いなどの課題がある。一方、アーク溶射は他溶射法に比べ、溶射速度が高く、設備費および運転経費が安いという利点から、IH調理器具に対する溶射法として選択される場合があるものの、熱変質や酸化・窒化が生じやすいという欠点があり、磁性材料の成膜時に電磁気特性の低下が課題である。

以上の背景から生産能力の高いアーク溶射の利点を活かすためには、アーク溶射した場合でも誘導加熱に必要な電磁気特性を確保することが必要である。そこで本研究にてIH調理器具に適した高効率加熱が得られる磁性発熱体皮膜を成膜可能なアーク溶射ワイヤの開発を行った。

2. アーク溶射

アーク溶射の原理図をFig. 1に示す。アーク溶射は、連続的に送給される2本の溶射材料(金属ワイヤ)の先端で直流アーク放電させ、熔融した金属を後方より空

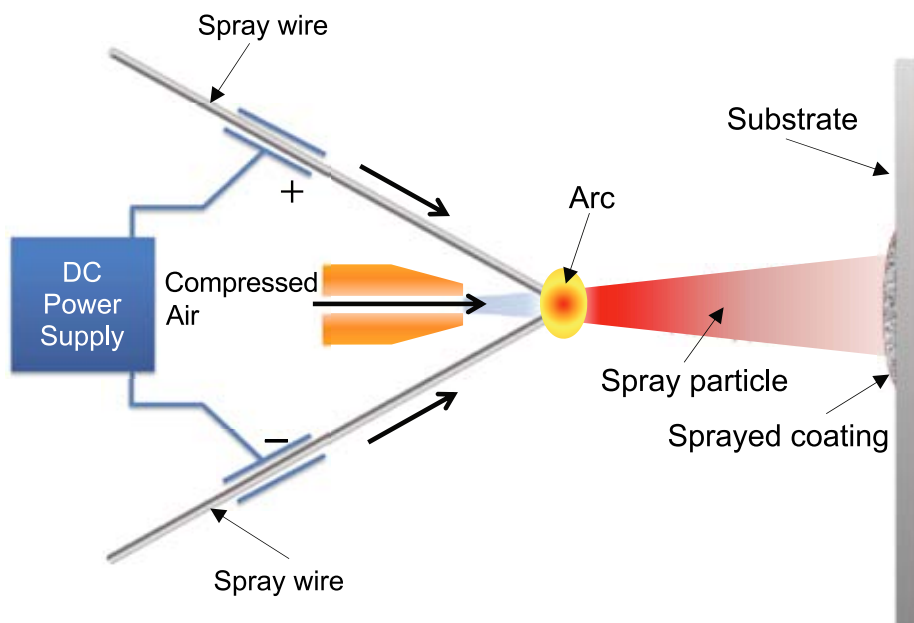


Fig. 1. Schematic diagram of arc spray.

気ジェットに乗せて、基材に吹き付ける溶射法である。アーク溶射の主な特徴は以下の通りである⁶⁾。

- 1) 導電性の金属ワイヤであればほとんどの材料が溶射用線材となる。
- 2) 溶射速度が高い。アーク電流を大きくすることで 30 ~ 40 kg/h の金属を溶射可能。
- 3) フレーム溶射に比べ密着強度が高い。材料が高温で熔融するため、高温でのラメラ構造形成により基材と金属、ラメラ間で金属の拡散層が生じることによる。
- 4) 組成変化が生じる。熔融金属の温度が高く、皮膜とワイヤに組成変化が生じる。また、溶射材料の酸化・窒化により、皮膜内に酸化物や窒化物が混入する。
- 5) 擬合金皮膜を形成可能。2本のワイヤを異種金属にすることで混合材料や擬合金化した皮膜が得られる。
- 6) 設備費、運転経費が安い。

3. 実験方法

3. 1 供試ワイヤ

本実験で用いた溶射ワイヤの化学成分を Table 1 に示す。一般鋼相当の化学成分である Fe-0.3 mass%Si ワイヤをベースに電磁気特性（電気抵抗率、比透磁率）に寄与する Si 量の異なる 4 種類の溶射用ワイヤを用いた。いずれも溶射ワイヤは線径 ϕ 1.6 mm である。

Table 1. Chemical compositions of spray wire (mass%).

Spray Wire	C	Si	Mn	N	O
Fe-0.3 mass%Si	0.1	0.3	0.5	0.005	0.004
Fe-0.8 mass%Si	0.1	0.8	0.5	0.004	0.004
Fe-1.2 mass%Si	0.1	1.2	0.5	0.005	0.003
Fe-1.5 mass%Si	0.1	1.5	0.5	0.006	0.003

3. 2 皮膜諸特性の評価

基材としてアルミ合金板（JIS H4040 規定の A6061、寸法：幅 100 mm、長さ 250 mm、板厚 8 mm）を用いた。基材全面に対し、溶射被膜の密着強度を上げるため、前処理として基材の溶射施工面に対し、Table 2 に示す条件でブラスト処理を行った。アーク溶射はアーク溶射機（PRAXAIR-TAFA 社製 CoArc Model 998）を用いて

Table 3 に示す溶射条件で実施、以下の評価 1) ~ 4) を行った。

1) 組織観察

溶射後の試験片を切出し、皮膜断面を鏡面まで研磨した後、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）で観察した。

2) 成分分析

溶射皮膜に対し JIS 湿式化学分析および JIS ガス分析にて化学成分を分析した。

3) 電気抵抗率測定

溶射皮膜単体試験片（幅 10 mm、長さ 100 mm、皮膜厚さ 0.5 mm）を作製し、皮膜の電気抵抗率を JIS C2525「金属抵抗材料の導体抵抗及び体積抵抗率試験方法」に準拠して、直流四端子法により測定した。比較のため、バルク材でも測定を行った。

4) 比透磁率測定

溶射皮膜単体試験片（幅 3 mm、長さ 60 mm、皮膜厚さ 0.5 mm）を作製し、比透磁率を測定した。測定は LF インピーダンスアナライザ（横河ヒューレットパッカー社製 4192A 型）を用いて、ソレノイドコイル（2層ソレノイド巻）に対して試験片を挿入する時のインダクタンス値の変化分より透磁率を算出した。測定周波数範囲は 100 Hz ~ 100 kHz とした。比較のため、バルク材でも測定を行った。

Table 2. Blast conditions.

Material	Al ₂ O ₃
Particle size	#20
Pressure	0.45 Pa
Distance (between specimen and nozzle)	20 mm

Table 3. Arc spray conditions.

Arc current	100 A
Arc voltage	28 V
Air pressure	0.41 MPa
Spray distance	165 mm
Traverse speed	100 mm/s
Coating thickness	500 μ m

3. 3 加熱特性の評価

加熱特性の評価のため、基材として業務用アルミ鍋（中尾アルミ社製半寸胴鍋 KINGPOTS, 寸法：内径 180 mm, 深さ 130 mm, 板厚 3 mm）を用いた。

鍋底面に対し、溶射対象外の領域をマスキングした後、前処理として Table 2 に示す条件でブラスト処理をした後、Table 3 に示す条件でアーク溶射を実施した。加熱特性評価用試験鍋を Fig. 2 に示す。加熱特性試験の概略を Fig. 3 に示す。試験鍋に水 1 L を入れた後、3 kW 卓上電磁誘導加熱調理器（Tanico 社製 TIH-S3N, 3 kW, 200 V）を用いて、20 °C から沸騰するまでの時間を測定した。比較のためにアルミクラッド鍋 [内径 180 mm, 深さ 70 mm, 板厚 2.5 mm (アルミ層 1.9 mm, SUS430 層 0.6 mm)] でも測定を行った。

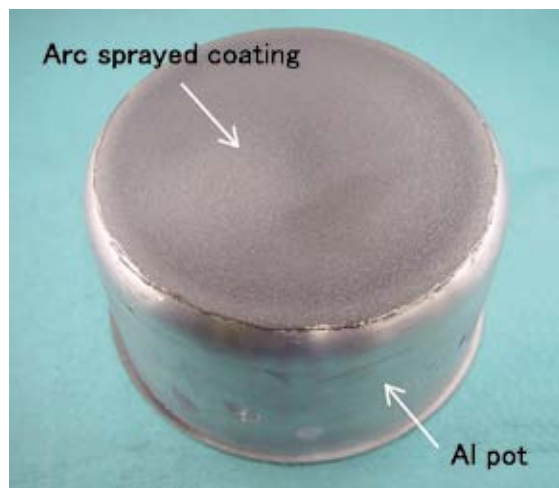


Fig. 2. Bottom of Al pot with sprayed coating.

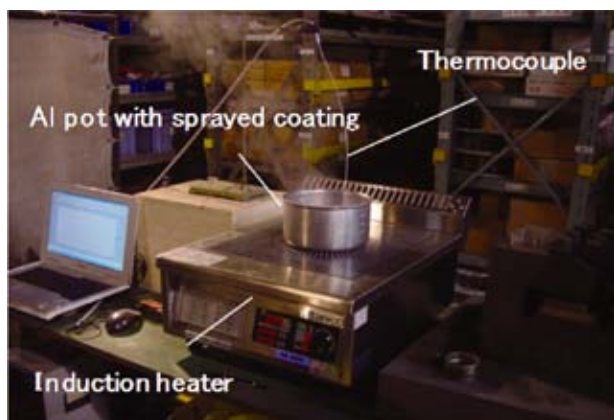


Fig. 3. Boiling test using induction heater.

4. 実験結果および考察

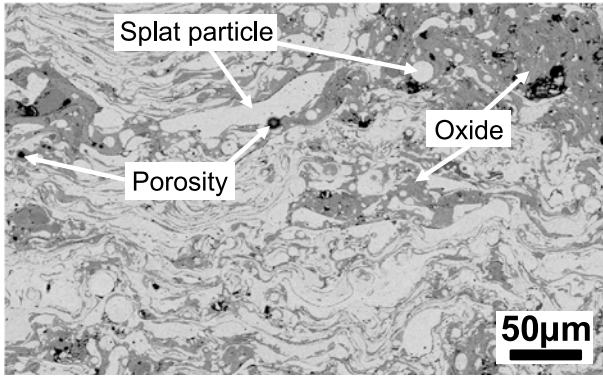
4. 1 溶射皮膜組織および溶射皮膜成分

溶射皮膜組織の一例として、Fe-0.3 mass%Si および Fe-1.5 mass%Si ワイヤで得られた溶射皮膜の断面組織を Fig. 4 に示す。いずれも溶射皮膜は偏平した溶射粒子が堆積したスプラット構造となっており、皮膜内部には気孔と酸化が生じている。

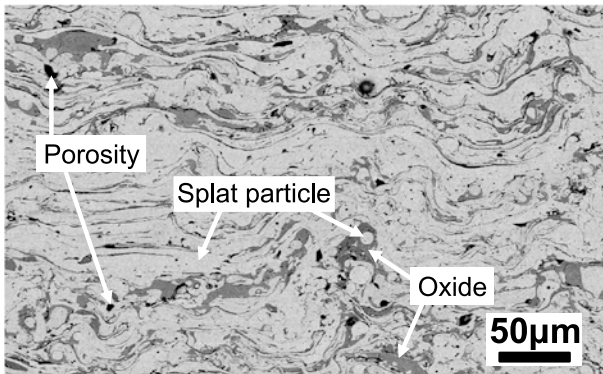
ワイヤと皮膜の組成を Table 4 に示す。皮膜はいずれも O, N が増加しており、また C, Si, Mn はほぼ 1/2 ~ 1/3 程度になっている。一般にアーク溶射は高温で熔融されるため、脱炭や酸化、窒化により C, Si, Mn が減少しやすいとされており⁶⁾、本研究でも同様の傾向を示した。また Table 4 よりワイヤに含有する Si 量の増加に伴い、皮膜の O 量が減少していることが分かる。大気プラズマ溶射法において、純鉄に Si などの酸化物生成エネルギーが小さい元素を添加して溶射した場合に、皮膜の酸化が抑制されるとの知見があることから⁷⁾、溶射法は異なるものの、本質的には本研究でも同様の傾向を確認している。すなわち、ワイヤに含有する Si 量の増加に伴い脱酸反応が進み、皮膜の酸化が抑えられることで、皮膜中の O 量が低減したと推察される。

4. 2 電気特性

電気抵抗測定結果を Fig. 5 に示す。バルク材に比べ、皮膜は電気抵抗率が大幅に高くなっている。この要因としては、いずれも皮膜化した場合に Fig. 4 や Table 4 で見られる皮膜特有の組織や酸化等の熱変質に起因して電気抵抗が高くなったためと推察される。また Fig. 5 よりバルク材では Si 量の増加により電気抵抗率が高くなるが、皮膜では電気抵抗率の上昇が抑制されることが分かる。皮膜とワイヤの O 含有量の差による電気抵抗率への影響を Fig. 6 に示す。皮膜中の O 量増加により電気抵抗率が増加していることが分かる。本来、バルク材においては Si 量増加に伴い電気抵抗が高くなるが^{8), 9)}、皮膜における Si 添加は電気抵抗に対する寄与よりも、4.1 節で述べた皮膜の脱酸効果の方が支配的に作用し、電気抵抗の増加を抑えられたと推察される。



a) Fe-0.3 mass%Si



b) Fe-1.5 mass%Si

Fig. 4. SEM micrographs of cross section of sprayed coatings.

Table 4. Chemical compositions of spray wires and sprayed coatings (mass%).

Spray wire		C	Si	Mn	N	O
Fe-0.3 mass%Si	Wire	0.1	0.3	0.5	0.005	0.0035
	Coating	0.055	0.12	0.28	0.1	8.8
Fe-0.8 mass%Si	Wire	0.1	0.8	0.5	0.009	0.0036
	Coating	0.066	0.35	0.24	0.13	6.9
Fe-1.2 mass%Si	Wire	0.1	1.2	0.5	0.005	0.0034
	Coating	0.059	0.63	0.28	0.1	6.1
Fe-1.5 mass%Si	Wire	0.1	1.5	0.5	0.006	0.0034
	Coating	0.068	0.7	0.24	0.09	5.1

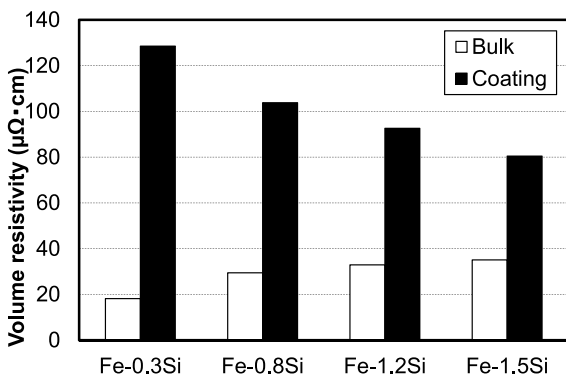


Fig. 5. Volume resistivity of spray wires and sprayed coatings.

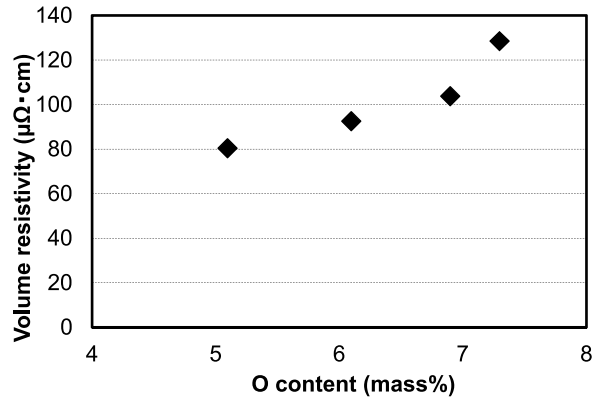


Fig. 6. Effect of O content in sprayed coatings on volume resistivity.

4. 3 磁気特性

比透磁率の測定結果一例 (Fe-0.3 mass%Si ワイヤ) を Fig. 7 に示す. バルク材では実部透磁率 μ' および虚部透磁率 μ'' は周波数増加とともに減少傾向を示す. 一方, 皮膜では実部透磁率 μ' および虚部透磁率 μ'' のいずれも測定周波数全域でほぼ一定である. この要因として表皮効果が挙げられる.

一般に外部磁界の周波数が高くなると, 物体内部で生じた渦電流が反作用磁束を発生させ, 磁束密度は物体内部に行くほど小さくなる, いわゆる表皮効果が生じ, 磁気抵抗が増加すると言われている¹⁰⁾. 表皮効果の発生により, 渦電流は物体表面に集中して流れ, この渦電流の流れる表面からの深さ (表皮深さ δ) は, 式 (1) で算出できる¹¹⁾.

$$\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで ω は角周波数 ($2\pi f$), μ は比透磁率, ρ は電気抵抗率である.

表皮深さにおける周波数特性の一例 (Fe-0.3 mass%Si ワイヤ) を Fig. 8 に示す. バルク材の表皮深さは皮膜に比べ浅く, 5 kHz 以上では試験片の板厚 (0.5 mm) 以下を示す一方, 皮膜では試験周波数全域で試験片の板厚以上の表皮深さを示している. このようにバルク材では試験片の板厚に比べ表皮深さが浅いため, 周波数増加による表皮効果の影響により, Fig. 7 で見られるように実部透磁率 μ' および虚部透磁率 μ'' が低下した可能性が高い. 従って, バルク材において正確な透磁率を測定するためには試験片を表皮深さ以下の板厚にする必要がある.

一方, 皮膜では電気抵抗率の急激な上昇, および気孔などの皮膜内部の欠陥に起因した透磁率の低下により, 表皮効果の影響を受けず, 結果的に一定した周波数特性

を示した可能性がある。アモルファス合金粉末の成形体において、気孔やボイドの増加により磁気特性が低下するとされており¹²⁾、皮膜でも同様の作用が生じ、試験周波数全域において低い比透磁率を示したと推察される。

次に、IH調理器の加熱周波数である20 kHzにおける皮膜の虚部透磁率測定結果をFig. 9に示す。磁気損失項である虚部透磁率 μ'' はSi含有量増加とともに増加していることが分かる。皮膜のO含有量による虚部透磁率 μ'' (20 kHz)への影響をFig. 10に示す。皮膜中のO量増加により虚部透磁率 μ'' が低下していることが分かる。皮膜の電気抵抗率による虚部透磁率 μ'' (20 kHz)への影響をFig. 11に示す。電気抵抗率が低くなるほど、虚部透磁率 μ'' が増加していることが分かる。一般に磁性材料における μ'' の発現に関して、一因として渦電流損が挙げられ、金属磁性材料では電気抵抗が低いため、高周波域では渦電流損失が急増し、 μ'' が著しく増加す

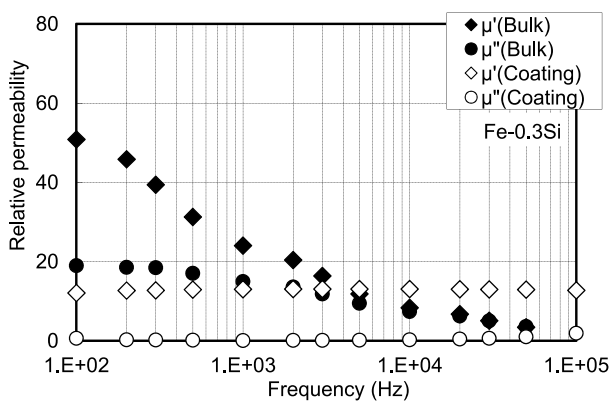


Fig. 7. Results of relative permeability of spray wires and sprayed coatings at different frequencies.

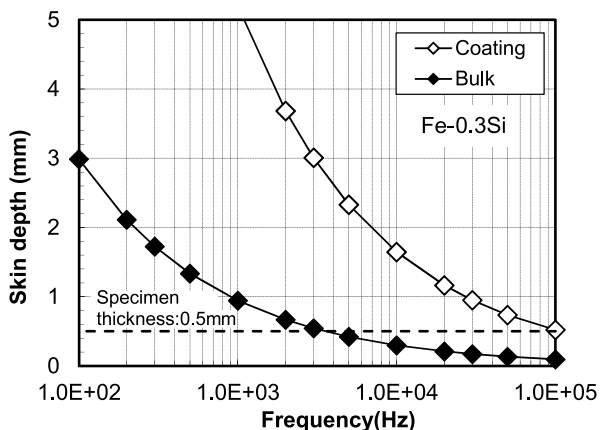


Fig. 8. Results of skin depth of spray wires and sprayed coatings at different frequencies.

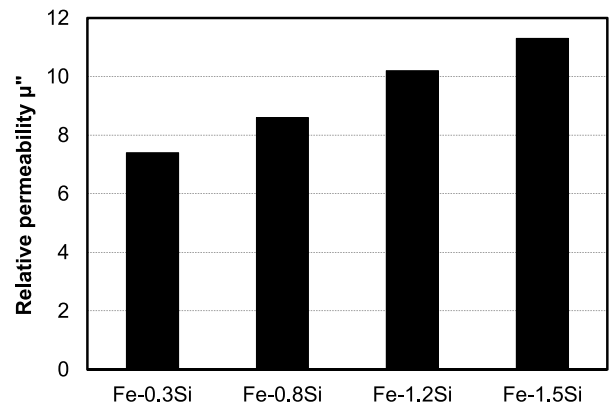


Fig. 9. Relative permeability μ'' of sprayed coatings at 20 kHz.

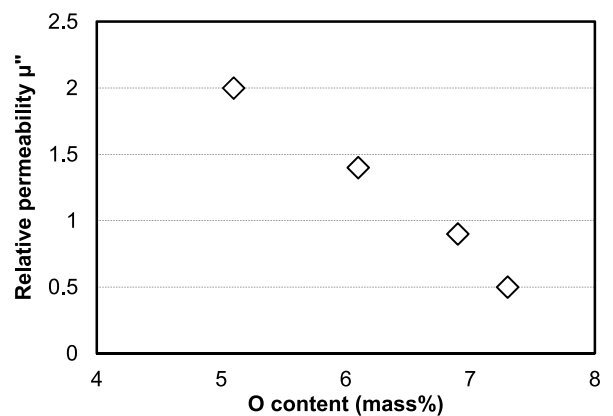


Fig. 10. Effect of O content on relative permeability μ'' of sprayed coatings at 20 kHz.

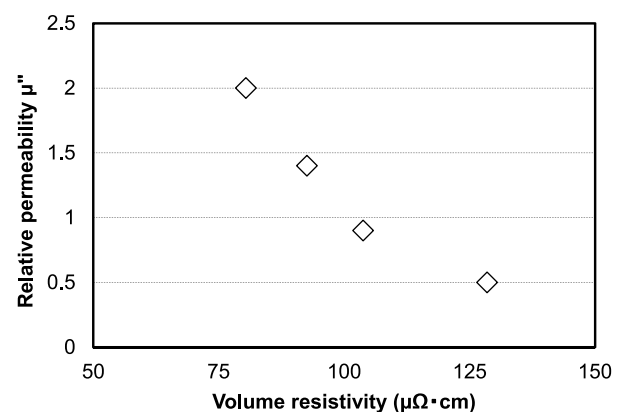


Fig. 11. Effect of Volume resistivity on relative permeability μ'' of sprayed coatings at 20 kHz.

るとされている¹³⁾。4.2節で述べたように皮膜におけるSi添加は、脱酸剤として作用し、皮膜の電気抵抗率を減少させるため、高周波域での渦電流損が増加し、虚部透磁率 μ'' が増加したと推察される。

4. 4 加熱特性

加熱特性結果を Fig. 12 に示す。アルミクラッド鍋に対し、Fe-0.3 mass%Si ワイヤ以外の試験鍋は沸騰時間が短く、中でも Fe-1.5 mass%Si ワイヤが最も短かった。沸騰時間と電気抵抗率、および比透磁率の関係をそれぞれ Fig. 13, Fig. 14 に示す。Fig. 13 および Fig. 14 から分かるように、電気抵抗率が低く、虚部透磁率 μ'' が高い方が沸騰時間は短くなっている。溶射前後の O 増加量による加熱時間への影響を Fig. 15 に示す。皮膜とワイヤの O 含有量の増加により加熱時間が増加していることが分かる。

IH は被加熱材料の渦電流損とヒステリシス損（材料が磁性体の場合）を利用した加熱法であり、これらの損失を高めることで高加熱効率を得られる。一般に鉄損 W は式 (2) で表される¹⁴⁾。

$$W = W_h + W_e = k_1 B^{1.6} f + k_2 B^2 t^2 / \rho \dots\dots\dots (2)$$

ここで W_h はヒステリシス損、 W_e は渦電流損 k_1 および k_2 は定数、 B は磁束密度、 f は周波数、 t は板厚、 ρ は電気抵抗率である。

式 (2) より、渦電流損は、磁束密度（比透磁率）が高く、電気抵抗率が低くなるほど増加するため、4.3 節でも述べたように Si 添加による皮膜の脱酸作用により、電気抵抗率増加が抑えられ、高周波域での磁気特性が改善することで渦電流損が増加した可能性が高い。

ヒステリシス損は、バルク材において Si 量増加により結晶磁気異方性定数や磁歪定数が減少するため保持力が減少することから、ヒステリシス損が減少するとされており⁸⁾、今回は B-H 曲線を測定していないが、皮膜中の Si 量増加により溶射皮膜におけるヒステリシス損の減少は十分に考えられ、今後詳細な調査が必要である。

鉄系合金ワイヤに対する Si 添加は、皮膜の脱酸作用により、電気抵抗が低くなると同時に透磁率が高くなることで、結果的に加熱特性を向上させると推察される。それゆえ、高 Si 添加ワイヤを用いて溶射することで、汎用的なアルミクラッド鍋と比較しても高加熱特性が得られる IH 調理器具の作製が可能となる。加えて、溶射の特徴である薄膜化を行うことで、高加熱特性に加え、軽量化の点でも、アルミクラッド鍋に対して一層の優位性を示す。

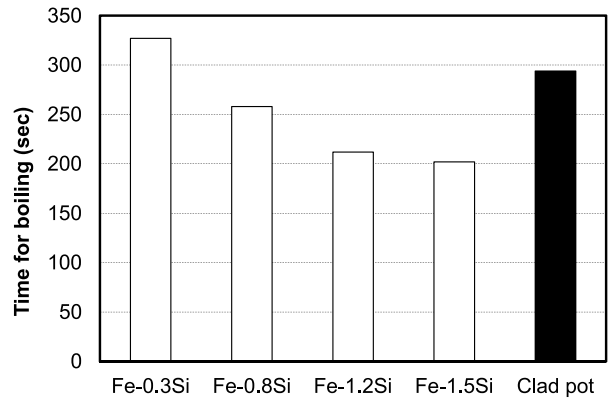


Fig. 12. Time for boiling in Al pots with wire sprayed coatings.

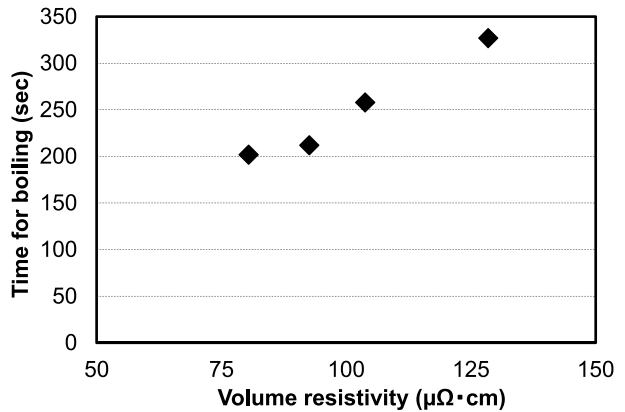


Fig. 13. Effect of volume resistivity on time for boiling.

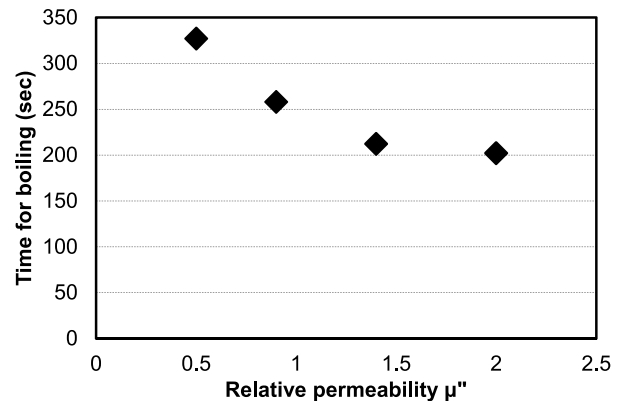


Fig. 14. Effect of relative permeability μ'' on time for boiling.

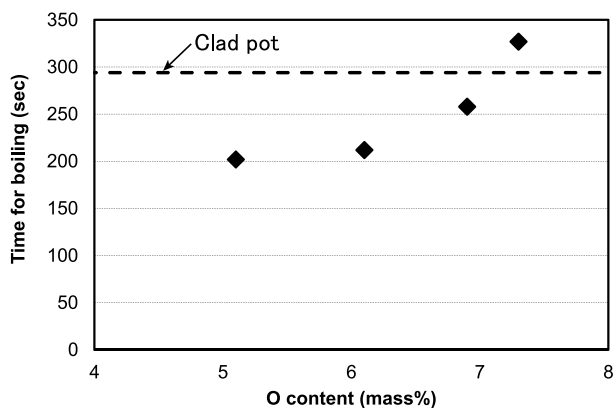


Fig. 15. Effect of O content of spray coatings on time for boiling.

5. 結 言

IH 調理器具の高効率加熱に適した磁性発熱体皮膜用アーク溶射ワイヤを開発するべく、Fe-0.3 ~ 1.5 mass% Si 溶射ワイヤを用いて溶射皮膜を作製し、誘導加熱特性に及ぼす Si 量の影響を調査した結果、Fe 基溶射ワイヤに対する Si 添加は形成される溶射皮膜に対し、以下の効果があることが分かった。

- (1) Si量増加により、溶射皮膜成膜時の皮膜酸化が抑制される。
- (2) Si量増加により、電気抵抗は低減する。
- (3) Si量増加により、透磁率は増加する。

上記 (1) ~ (3) の効果により、溶射皮膜の電磁気特性が改善されるため、高い誘導加熱特性を有する溶射皮膜が得られ、汎用的なアルミクラッド鍋と比較して高加熱特性を有する IH 調理器具が得られる。

(文 献)

- 1) 株式会社富士経済: エネルギー需要家別マーケット調査要覧 2012 住宅分野編
- 2) 弘田泉生, 藤田篤志, 片岡 章, 相原勝行, 藤井裕二, 宮内貴宏, 榎尾信芳: 独創性を拓く先端技術大賞, 第 17 回優秀論文産経新聞社賞 (2003)
- 3) 庄司浩幸: 電気学会誌, 132(2012), 545
- 4) 米盛弘信: 工学院大学研究報告, 109(208), 191

- 5) Keith Murray, Martin Kearns and Andrew Coleman: HVOF Colloquium 2009 paper final, (2009), 3.
- 6) 日本溶射学会編: 溶射技術入門 (改訂版), (一社) 日本溶射学会, 2012, 7.
- 7) 曾珍素, 黒田聖治, 川喜多仁, 小松誠幸: 日本溶射協会全国講演大会講演論文集, 88(2008), 51
- 8) 山本達治: 磁性合金, 修教社書院, (1941), 70.
- 9) 武本聡: 電気製鋼, 82(2011), 62
- 10) 東京電機大学編: 入門電磁気学, 東京電機大学出版局, 2006, 231.
- 11) 太田恵造: 磁気工学の基礎 II, 共立全書, 1973, 310.
- 12) 鴨志田武, 齊藤和哉, 高萩奏, 折笠哲夫: 茨城県工業技術センター研究報告 第 23 号, 1994.
- 13) 深瀬美紀子, 武本聡: 電気製鋼, 82(2011), 24
- 14) 筒井唯之: 日立化成テクニカルレポート, 54(2011), 18