

鉄球および黒鉛二層充填層の 高周波誘導加熱実験とそのパラメータ解析

牛 明愷*・秋山 友宏*²・高橋 礼二郎*²・八木 順一郎*²

Experimental and Parametric Analyses of Heat Transfer within Two-layered Packed Beds of Iron and Graphite in a High-frequency Induction Furnace

Ming kai NIU, Tomohiro AKIYAMA, Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

Synopsis : This paper describes an experimental and theoretical study on heat transfer within two-layered packed beds of iron and graphite in a high-frequency induction furnace. An unsteady, two-dimensional mathematical model for the induction furnace was developed in cylindrical coordinates and was verified by the experimental results. Temperature dependence of physical properties of packing materials such as magnetic transformation of iron was needed to be taken into account in the model. The experimental results showed that iron spheres near the wall were heated most quickly.

Parametric analysis was performed by using this mathematical model to investigate optimum operation conditions. The influence of supplied current, induced frequency, voidage and diameter of graphite particles and layer height ratio of iron and graphite on the heating rate of iron spheres was assessed. As a result, the heating rate of iron spheres was found to be significantly dependant on the supplied current, the frequency and the layer height ratio. Interestingly, small graphite particles were well heated although their diameter is less than the skin depth in the furnace. These results suggest the possibility of dense packing of graphite near the wall in the high-frequency induction furnace for efficient heating.

Key words : ironmaking ; high-frequency induction ; heat transfer ; iron ; graphite ; scrap ; packed bed ; mathematical model.

1. 緒言

高品位鋳物鉄製造プロセスとして、鉄ダライや電磁鋼板屑のような微細スクラップを原料とするコークス充填層型高周波誘導加熱炉はコークス充填層を発熱体および溶湯濾過器として利用することにより、従来単独の誘導加熱・溶解は不可能とされていた安価な材料を利用できるなどの特徴を持っている。さらに、投入された材料とコークス層に適切な比率で負荷を与えることにより、必要な温度の溶湯が連続的に得られることも特徴となっている。

電磁誘導の原理は溶解、製錬および凝固等の様々な分野¹⁻⁴⁾に応用されている。しかし、誘導加熱を目的とした充填層型高周波誘導溶解炉における伝熱および流動に関する移動現象論的研究は行われておらず、スクラップおよびコークスを加熱して上部のスクラップを溶解するプロセスの解析にはいくつかの重要な課題が残されている。

前報⁵⁾では複雑な炉内現象のうち最も重要な加熱のメカニズムを基礎的に解明するため、単一充填物のサイズや物性、充填構造および印加電流によって加熱特性がどのように変

化するかを実験的に検討し、伝熱現象論や電磁気学に基づき、二次元非定常伝熱に関する数学的モデルによる数値解析を行い、実験結果と比較検討した。このモデルにより操業の改善および炉の設計に関して必要な電流分布および温度分布などの知見が得られた。

本研究ではこの誘導炉の伝熱特性に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、実炉の炉内状況を模擬して鉄球および黒鉛球の二層充填層を対象にして誘導加熱実験を行った。すなわち、一定の高周波電流下における鉄球層および黒鉛層の温度変化を鉄球の溶融温度以下の範囲で測定した。一方、本報においては、前報⁵⁾で実験的に検証された数学的モデルを発展させ、特に、伝熱特性に大きく影響を及ぼす鉄の磁気変動の特性を考慮した数学的モデルにより、高周波誘導加熱現象の数値シミュレーションを試み、温度の測定結果と比較した。また、数学的モデルに含まれている諸パラメータの感度を調べるため充填層内の温度変化に影響を及ぼす印加電流、印加周波数、黒鉛層の粒径および充填率、鉄球層と黒鉛層の充填高さの比を変えたケーススタディを試みた。

平成7年8月24日受付 平成7年11月29日受理 (Received on Aug. 24, 1995; Accepted on Nov. 29, 1995)

* 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980-77)

* 2 東北大学素材工学研究所 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University)

2. 実験装置および実験方法

実験装置として金属の溶解を目的として設計製作されたサイリスタ式高周波誘導溶解炉を使用した。Fig. 1は誘導炉の概略を示す。コイルは直径38cm, 高さ40cmで8巻きしてあり, 内挿されているアルミナ坩堝は内径25cm, 高さ40cmである。高周波の定格出力は100kW, 3kHzであり, 出力電圧は30~100%の範囲で連続可変できる。

実験試料として使用した充填粒子は平均粒径2.3mmの黒鉛および1.7mmの鉄球で, 高さ12cmずつ二層に充填した。上層が鉄球, 下層が黒鉛である。上下それぞれの空間率は0.372および0.426であった。数本の白金熱電対(PtRh40%-PtRh20%, 直径0.5mm)を炉の高さ方向と半径方向に配置し, 室温から実炉用のスクラップ溶解が可能な温度までの高周波誘導加熱実験を行い, 充填層内各位置における温度の経時変化を測定した。熱電対への導通および浸炭を低減するため, 外径3.5mmのアルミナ製保護管を付けた。そ

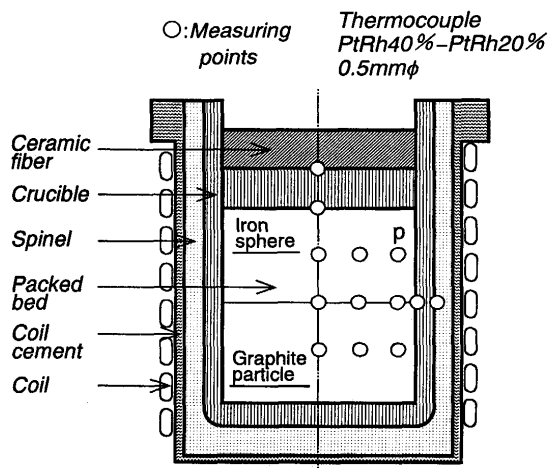


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental induction furnace.

Table 1. Experimental conditions of the packed bed.

Coil	Current (A)	1000
	Frequency (Hz)	2950
	Diameter (cm)	38
	Height (cm)	40
	Turns (-)	8
Packed bed (Crucible)	Diameter (cm)	25
	Height (cm)	24
Iron sphere	Diameter (mm)	2.06
	Shape Factor (-)	0.820
	Density (kg/m ³)	7500
Graphite particle	Diameter (mm)	4.04
	Shape Factor (-)	0.576
	Density (kg/m ³)	1694

のほか, 熱伝達による壁からの熱損失を評価するため, この誘導炉の側壁および上蓋の表面温度も測定した。誘導炉による加熱実験の実験条件はTable 1にまとめて示している。

3. 理論

3.1 伝熱の基礎式

鉄球および黒鉛の二層充填層における温度の経時変化は(1)式の二次元円筒系座標における非定常熱収支式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i C_i T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_i r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_i \frac{\partial T}{\partial z}) + J_i^2 \omega_i \quad (1)$$

ここで, ρ は固体の見かけ密度[kg/m³], C は比熱[J/kg·K], T は温度[K], k は熱伝導率[W/m·K], J は電流密度[A/m²], ω は電気抵抗率[Ω·m]である。下付き*i*はその位置に対応して鉄球, 黒鉛, 坩堝, スピネル, コイルセメント, セラミックファイバーを表す。また, 充填層内における誘導電流の経路は黒鉛層および鉄球層をそれぞれ独立に経由し, 各層内の誘導電流は円周方向成分のみであると仮定し, 上式に含まれる電流密度*J*を計算した。前報⁵⁾で詳しく記述したように, 電流密度*J*は透磁率 μ , 周波数*f*および電気抵抗率 ω によって変化する。特に鉄の透磁率 μ はキュリー点を境にして急激に変化するので, 鉄球層はその影響を強く受けることになる。

3.2 充填粒子の物性値

解析の際にはTable 1に示した実験条件に加えて, 黒鉛の物性値は前報⁵⁾と同じ値を使用した。一方, 鉄球試料に関する比熱⁶⁾, 熱伝導率, 透磁率⁶⁾および電気抵抗率についてはFig. 2に示す値を使用した。鉄球はキュリー点で強磁性を失い, 比熱, 熱伝導率および電気抵抗率も大きく変化する傾向を有する。

充填層の有効熱伝導については国井-SMITHの式⁷⁾で評価した。本実験用試料の粒径は浸透深さより小さいため, 誘導電流はあたかも充填層が単一粒子であるかのように外周断面を流れると考えられるので, 多孔質体の有効電気抵抗率を推算するEUCKENの式⁸⁾より評価した。

充填層の有効透磁率については, 磁気量と電気量の対応関係⁹⁾により磁気回路を電気回路と同様に扱うことにより(2)式により有効透磁率を計算した。

$$\mu_{eff} = \epsilon \mu_0 + (1 - \epsilon) \mu_s \quad (2)$$

ここで, μ_s は固体(黒鉛, 鉄球)の透磁率[H/m], μ_0 は真空の透磁率[H/m], ϵ は充填層の空間率[-]である。透磁率 μ の値は温度依存性を考慮し, 数値解析に使用した。

3.3 数値解析

解析のアルゴリズムとして, 伝熱の基礎式を差分して

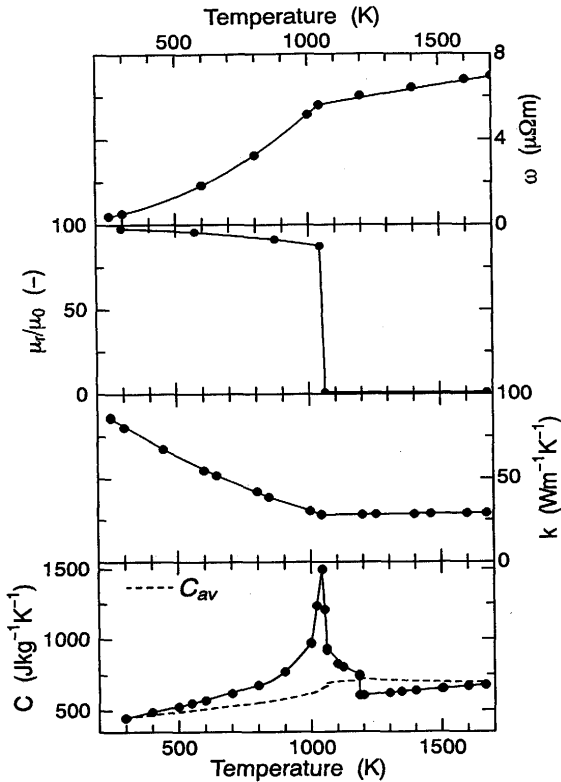


Fig. 2. Temperature dependence of specific heat, thermal conductivity, relative magnetic permeability and electrical resistivity for iron.

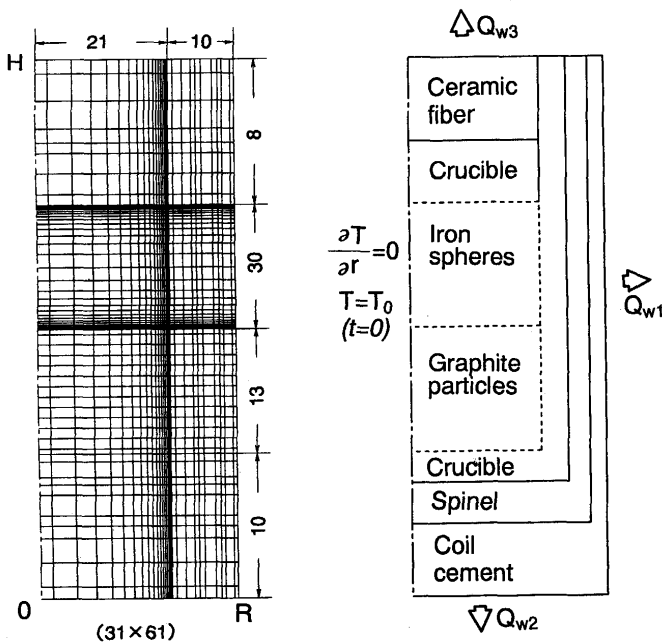


Fig. 3. Mesh structure and boundary conditions for numerical analysis.

得られた代数方程式の繰り返し計算をTDMA法¹⁰⁾で行い、所定の収束基準値 10^{-3} が満たされた時に計算を終了する。解析用のメッシュは鉄の磁気変態前の大きな表皮効果を考慮して、Fig. 3に示すように、鉄球層の周辺部のメッシュを小さくした。半径方向には鉄球層、黒鉛層ともに21個のメッシュ、高さ方向には黒鉛層に13個、鉄球層に30個のメッシュ

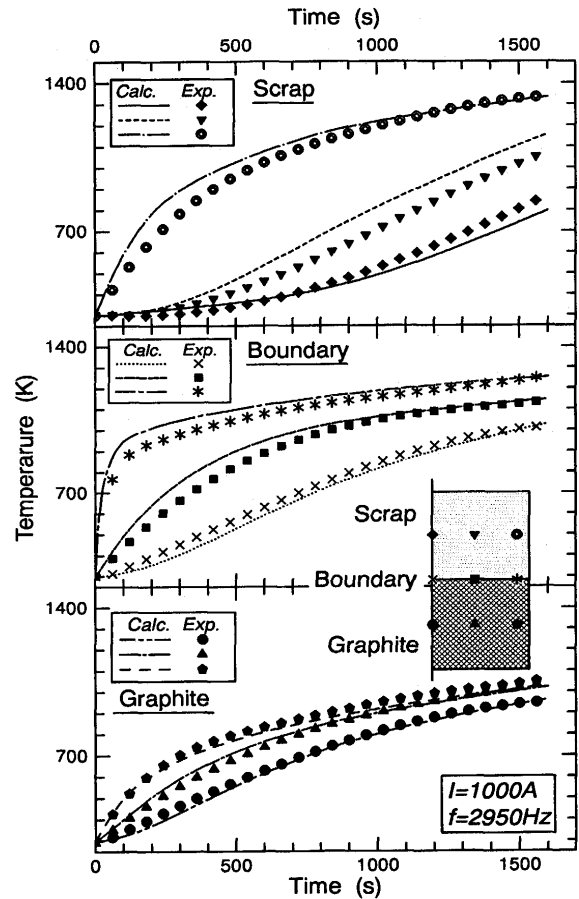


Fig. 4. Comparison between measured and calculated temperature histories in the packed bed of iron and graphite with time.

ユを取り、各断熱材を3個あるいは4個のメッシュに分割した。また、計算時間の間隔は60秒とした。

数値解析のための初期条件、境界条件もFig. 3に示してある。鉄球層と黒鉛層の電磁誘導はそれぞれの固体物性値を使用して計算した。計算領域における温度の初期値は300Kで、中心軸の温度勾配は0と仮定している。層底部および上部からの熱損失 Q_{w2} 、 Q_{w3} は垂直円筒の上、下面からの熱損失を評価するミハイエフの方法¹¹⁾により求めた。側壁からの熱損失は断熱材外表面とコイル内の冷却水間の対流熱伝導によると仮定した境界条件を設定して、森ら¹²⁾による整理式を用いた。この初期、境界条件は前報⁵⁾にも示されている。

4. 結果

4.1 測定値と解析値の比較

Fig. 4は印加電流を1000Aとしたとき、充填層内の鉄球黒鉛層およびその境界における温度の経時変化の測定値と解析値を示している。黒鉛層の温度より鉄球層が早く昇温したのは鉄球層の電気抵抗が小さく、印加電流が集中するので、ジュール熱の発生が大きくなったためと考えられる。また、鉄球層の誘導電流の表皮効果が大きいため、加熱初期には二層の境界での温度が最高で、加熱時間の増加と

もに最高温度域が鉄球層の炉壁近傍に移動した。鉄球，黒鉛層およびその境界においては各位置における温度の測定値と計算値がほぼ一致したので，この伝熱モデルが妥当であると判断した。

4・2 数学的モデルによる各種操業条件の検討

(1) 操業条件の範囲および基準条件での数値解析結果

伝熱モデルの構成因子が誘導炉内の温度変化に及ぼす感度を調べるため，Table 2 に示す条件下で，数値解析を行った。

Fig. 5 は基準のケーススタディ (Table 2 の下線付き) の解析結果で，誘導炉内における100K刻みの等温線の変化を示す。表皮効果によって壁近傍の昇温速度が中心部の昇温速度より速いが，充填層外周部の温度が高くなっている。時間の経過とともに壁近傍から温度がキュリー点 (1042K) を超え，鉄の融点温度 (実炉スクラップの融点は1700K) に近づいていく。約360s後，最高温度点が鉄の融点温度に到達し，600s以降は鉄球層の大部分の領域で温度がキュリー点を超え，層内半径方向の温度勾配が大きくなっている。また，鉄球層よりも黒鉛層のほうが最高温度が高くなっている。したがって，炉下部から連続出湯する誘導炉においては，黒鉛層は炉内の温度分布を均一化させる働きがあり，スクラップ層と黒鉛層の量の比率を変えることにより出湯温度を制御出来ることが推察できる。

充填層における磁気変態前後の急激な半径方向の誘導電流密度の変化はFig. 6 に示されている。0sと1600sはそれぞれ磁気変態の前と後である。この図からわかるように，いずれの場合においても誘導電流は表皮層 (るつぼ内壁) で最大になり，中心部にいくにしたがって小さくなる。これは前報⁵⁾の単一円柱試料の場合と類似の表皮効果によるもの

Table 2. Operating parameters used for the simulation.

Current (A)	Frequency(Hz)	Voidage (-)	Diameter (mm)	Height (cm:cm)
<u>2000</u>	<u>2950</u>	<u>0.426</u>	<u>2</u>	<u>12:12</u>
1300	1000	0.500	5	6:18
1000	500	0.600	20	18:6

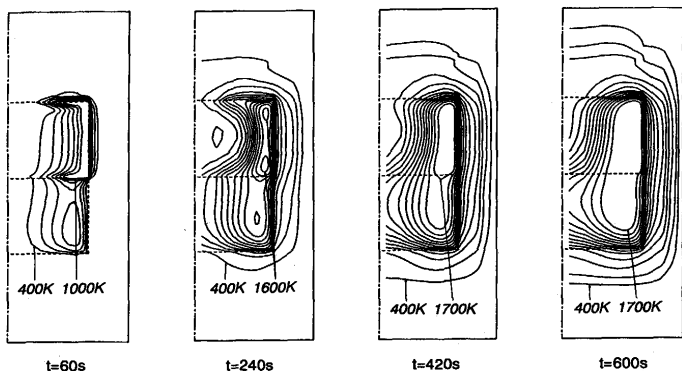


Fig. 5. Calculated isotherms in the packed bed at different time. (I=2000A, f=2950Hz)

と考えられる。ただし，鉄は低温で強磁性体であるため，磁気変態前に極めて大きな表皮効果によるものと考えられる。ただし，鉄は低温で強磁性体であるため，磁気変態前に極めて大きな表皮効果を示している。しかし，いったん磁気変態点を超えると常磁性体になるため，誘導電流密度の分布は黒鉛層内の分布とはほぼ同様になっている。このような傾向はFig. 4 に示した温度の変化にも現われている。つまり，鉄球層は磁気変態前に急激に昇温するのに対して，磁気変態後の昇温はゆるやかであった。

(2) 印加電流の影響

コイルの印加電流は充填層内で発生する熱に変換される。その挙動を検討するため，印加電流を2000Aから1300Aおよび1000Aに減少させ，数値解析を行った。Fig.1に示す鉄球層壁付近に設定した基準点，p点の温度の経時変化をFig. 7 に示す。急激に昇温する基準ケースに比べて，1300Aの昇温速度はかなり遅く，1000Aのときはさらに遅くなった。ここでは鉄の溶解温度 (1700K) を到達温度の目安としたが，印

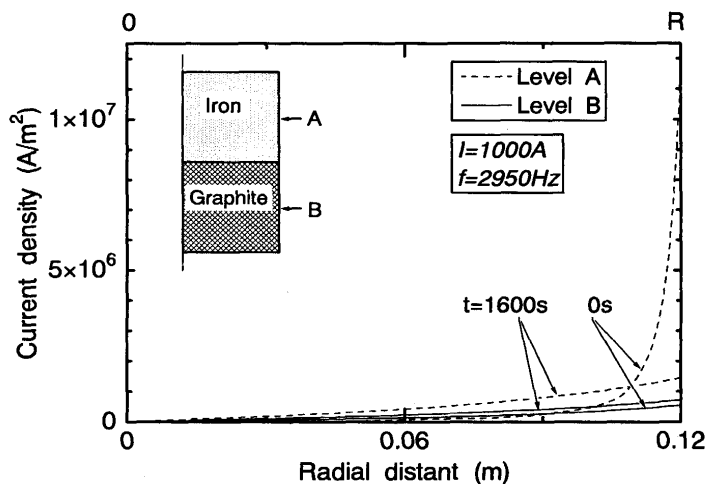


Fig. 6. Radial distribution of induced current density for the packed bed with graphite and iron.

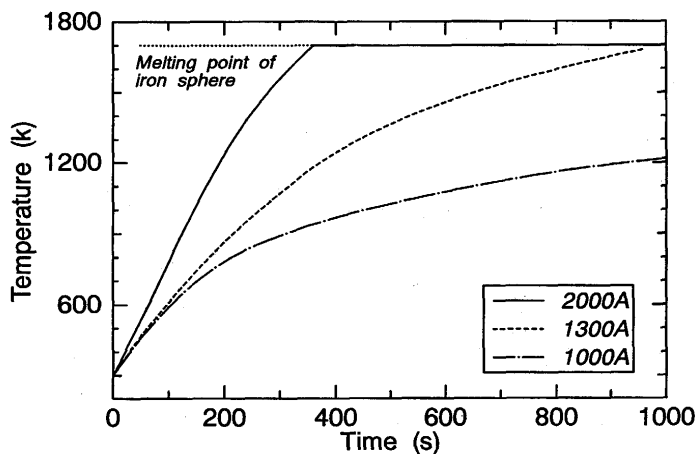


Fig. 7. Influence of supplied current on heating rate in the packed bed of iron spheres under the frequency of 2950Hz.

加電流の減少とともに溶融温度に到達する時間がかかり遅れている。コイルの印加電流が低くなると誘導電流も減少し、加熱速度が著しく低下することが明らかになった。各ケースにおいて誘導電流の分布形は類似しているが、印加電流が低いほど、層内の温度分布が比較的均一に近づいていた。

(3) 印加周波数の影響

印加周波数は誘導電流密度の分布に大きく影響すると予想される。ここで、2000Aの印加電流で、周波数を2950Hzから1000Hzおよび500Hzに低下させた場合の数値解析を行った。Fig. 8は印加電流の周波数のみを変えた場合の解析結果である。加熱初期には周波数の低いほど基準点の昇温速度が速く、キュリー一点前後で逆転され、遅くなる結果が得られた。これは加熱初期に周波数の低下に伴い誘導電流の浸透深さが厚くなり、基準点自身の発熱速度が壁近傍からの熱の伝わる速度より速くなったためであると考えられる。実炉を設計する場合、均一な層内温度を得るため誘導電流の表皮効果を考慮して誘導炉の直径が大きいほど周波数を低くしておく必要がある。

(4) 空間率の影響

誘導炉の下部に充填された黒鉛充填層の作用を調べるため、黒鉛充填層の空間率を変えた場合の鉄球層内の温度変化を検討した。黒鉛層の空間率が増加するにつれて鉄球層の温度がわずかに増加している。黒鉛層の空間率が鉄球層の温度変化に及ぼす影響は小さいものの、黒鉛充填層の最高温度を示す領域が変化している。これは空間率の増加とともに黒鉛層の有効電気抵抗が大きくなり、二層間の電気抵抗の比が変化し、黒鉛層で発生する熱量が少なくなったためである。

(5) 粒子径の影響

実操業においては黒鉛層の浸透深さ δ (10cm弱) よりやや小さい粒子を使用している。黒鉛粒子の粒径を5mmおよび20mmとして数値解析すると、この範囲内では黒鉛粒径を

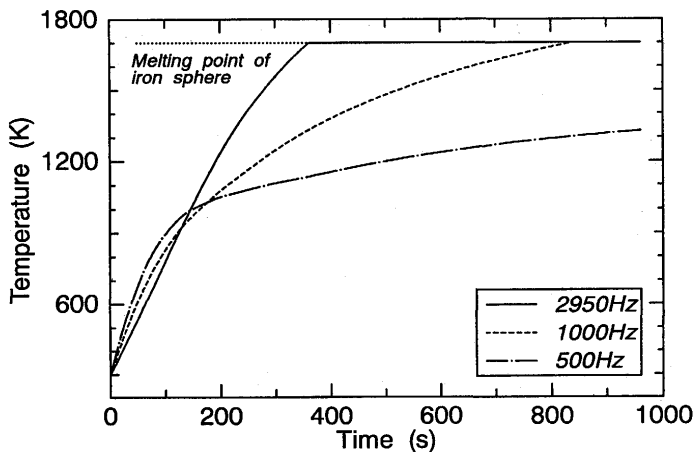


Fig. 8. Influence of frequency of coil on heating rate in the packed bed of iron spheres under the supplied current of 2000A.

減少させても、鉄球層の昇温速度は低下せず、ほとんど同じであった。これは従来の「黒鉛粒子内に発生するうず電流は大粒子ほど大きくなるので加熱に有利である。」¹³⁾という見解と異なっており、実際には個々の粒子内に独立にうず電流が発生するのではなく、粒子間の接点を介して円筒るつぽ内に同心円状に通電しているためである。しかしながら、この数学的モデルは充填する際に、時として生じる壁近傍での不連続性(Fig. 9 (b))は考慮していない。そのため、実操業においては壁近傍に比較的小粒子や非球形粒子を使用し、粒子間の接点数を増加させ空間率を低下させ連続性を高めること(Fig. 9 (a))が重要であるといえる。これにより、黒鉛粒径が浸透深さより小さい範囲でも誘導加熱でき、黒鉛充填層が発熱剤および溶湯濾過器の機能することが期待できる。

(6) 充填層高さの影響

実操業においては、黒鉛層とスクラップの量の比率を調整することによって銑鉄温度および出銑速度を制御してい

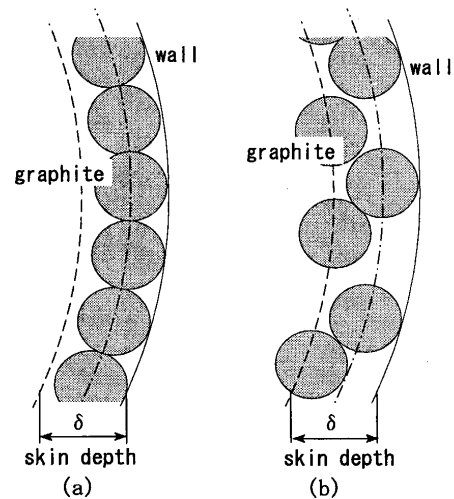


Fig. 9. Schematic diagram of dense packing and sparse packing.

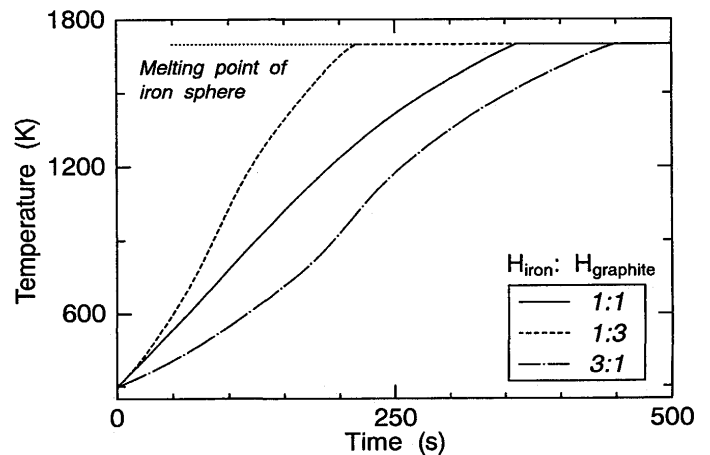


Fig. 10. Influence of the ratio of iron bed height to graphite one on heating rate in the packed bed.

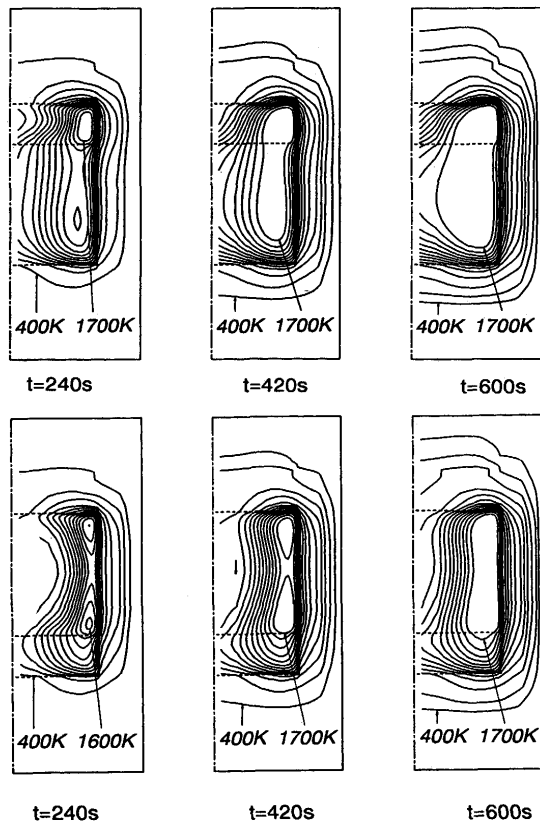


Fig. 11. Calculated isotherms in the packed bed with the different ratio of layer height of iron and graphite.

る。ここでは、両者の比を変えたケーススタディを行った。Fig.10に示すように、鉄球層の高さが低いほど昇温速度が大きく、短時間で鉄の融点温度に到達する。Fig.11は鉄球層と黒鉛層の層高比が1:3と3:1の場合の等温線の時間変化を示す。加熱時間の増加とともに鉄球層の溶解領域が大きくなっている。600s後黒鉛層内の温度分布は層高比が1:3の場合、黒鉛層までにはほぼ全領域が1700Kに達しているのに対して、3:1の場合は遅れている。したがって、黒鉛層の充填高さが高いほど鉄の溶解が速くなるとともに、溶湯が黒鉛層でも加熱される。また、他の操業条件を一定に保ちながら鉄球層と黒鉛層の層高比を変化させることにより充填層の温度分布を制御することができる。

(7) 炉内温度変化に及ぼす操業条件の影響のまとめ

炉内温度に及ぼす操業条件の影響をまとめてみると、層内全体の温度に大きく影響を及ぼすのは印加電流、周波数さらに鉄球層と黒鉛層の層高比であったが、黒鉛層の空間

率および粒径が発生熱量および伝熱速度に影響することが明らかになった。したがって、この数学的モデルに基づいて操業条件を検討することが可能である。

5. 結言

コークス充填層型高周波誘導溶解炉に関する基礎研究として、鉄球および黒鉛層充填層の誘導加熱実験ならびに円筒座標系二次元数学的モデルによる鉄球および黒鉛二層充填層の伝熱の数値解析を行い、次の結果が得られた。

(1) 充填層内の温度変化について、鉄の磁気変態を考慮した数学的モデルによる計算値を測定値と比較することにより、伝熱モデルの妥当性を確認した。

(2) 構築した数学的モデルにより数値実験を試みた。このモデルによりコークス充填層型誘導炉の誘導電流分布、温度分布およびその経時変化を推定した。その結果、鉄球層の加熱速度に及ぼす影響は印加電流、印加周波数および鉄球層と黒鉛層の層高比の影響が大きかった。

(3) 提案した黒鉛充填層の密充填によって、コークス充填層型高周波誘導炉における誘導加熱の効率を向上することが予想できる。

本研究に使用した鉄球ならびに黒鉛粒子は(株)日立製作所栃木工場より提供されたものである。記して謝意を表す。また、この研究は一部、文部省科学研究費補助金(平成7年度試験研究(B)07555537)によって行われたものである。

文 献

- 1) E.D.Tarapore and J.W.Evans: Metall Trans., **7B** (1976), 455.
- 2) J.L.Meyer, N.El-Kaddah, J.Szekely, C.Vives and R.Ricou: Metall Trans., **18B** (1987), 529.
- 3) C.Vives and R.Ricou: Metall Trans., **16B** (1985), 377.
- 4) J.Sakane, B.B.Li and J.W.Evans: Metall Trans., **19B** (1988), 397.
- 5) 牛 明愷, 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **81** (1995), 111.
- 6) Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials, The TPRC Data Series, ed. by Y.S.Touloukian, Thermophysical Properties Research Center, Purdue Univ., (1972), 578.
- 7) D.Kunii and J.M.Smith: AIChE J., **16** (1960), 97.
- 8) A.Eucken: VDI-Forschungsheft, **B3** (1932) 353.
- 9) 高橋秀俊: 電磁気学, 裳華堂, (1980), 183.
- 10) S.V.Patankar and D.B.Spalding: Int. J.Heat Mass Trans., **15** (1972), 1787.
- 11) ミハイエフ著, 内田秀雄, 鎌田重夫訳: 基礎伝熱工学, 東京図書, (1966), 56
- 12) 森 康夫, 中山 恒: 日本機械学会論文集, **31** (1965), 1521.
- 13) 橋田榮夫: 工業加熱, **2** (1991), 23.