

段階ごとに還元した塊成鉱の有効熱伝導率

秋山 友宏*・福谷 隆志*²・太田 弘道*³
高橋礼二郎*・早稲田嘉夫*・八木順一郎*

Effective Thermal Conductivities of Products in the Stepwise
Reduction of Agglomerated Iron Ore

Tomohiro AKIYAMA, Takashi FUKUTANI, Hiromichi OHOTA,
Reijiro TAKAHASHI, Yoshio WASEDA and Jun-ichiro YAGI

Synopsis:

Effective thermal conductivities of fired pellets, nonfired pellets and sinter which were reduced in a stepwise manner to magnetite, wustite and metallic iron by CO-CO₂ or H₂ gas have been measured by the laser flash method in the temperature range from room temperature to 1273 K.

As the reduction proceeded, porosity of the samples changed from 23% to 62%. Measured effective thermal conductivities of the samples were remarkably smaller than those of dense materials. Thermal conductivities of metallic iron and hematite depended strongly on temperature in comparison with wustite. As the samples were reduced, the effective thermal conductivity decreased and reached a minimum value in wustite, but increased to 5~10 times in metallic iron. The treatment of reduction in stepwise at 1273 brought a little difference among the effective thermal conductivities of the three kinds of samples.

The influence of reducing gas, namely; pure CO or H₂, on the temperature dependence of the effective thermal conductivity of metallic iron was observed. This is probably attributed to the generation of different structures of the samples. The data measured were correlated on the basis of the unit cell model. As a result, this model succeeded in explaining the actual bonding condition among neighbor grains and the equations obtained agreed well with the data observed.

Key words: ironmaking; thermal conductivity; stepwise reduction; reduced iron; laser flash method; fired pellet; nonfired pellet; sinter; porosity; unit cell model.

1. 緒 言

直接製鉄用シャフト炉や高炉あるいは溶融還元炉に装入される塊成化製鉄原料の有効熱伝導率は、これらの各種プロセスの伝熱解析のみならず、焼結機やロータリーキルン等の製造プロセスの伝熱解析にとっても重要な値である。しかし、これまで塊成鉱の有効熱伝導率に関する系統的な研究は少ない。著者ら¹⁾²⁾は種々の結合水を含有する非焼成ペレットの有効熱伝導率や新素材の分野でも注目される緻密で純粋な酸化鉄の熱伝導率の測定を行ってきた。

ペレットおよび焼結鉱などの製鉄原料は反応器内では、単に化学組成のみならず気孔構造の変化を伴いなが

らへマタイトから金属鉄まで還元される。そのため、反応器内での有効熱伝導率は温度変化の影響も加わって複雑に変化することが予想される。そこで本研究は、まず、基礎データとして、マグネタイト、ウスタイトおよび金属鉄までそれぞれの段階ごとに還元した各種製鉄原料の有効熱伝導率を測定し、ついで、気孔率および緻密な試料の熱伝導率との関係を明らかにし、最終的に、温度依存性を考慮した実用的な有効熱伝導率推算式を提案することを目的とした。

2. 試 料

2.1 還元試料の作成

還元前の試料の化学組成を Table 1 に示す。焼成ペ

平成 3 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 11 月 6 日受付 (Received Nov. 6, 1991)

* 東北大学素材工学研究所 工博 (Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980)

*² 東北大学大学院 (Graduate School, Tohoku University)

*³ 茨城大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Ibaraki University)

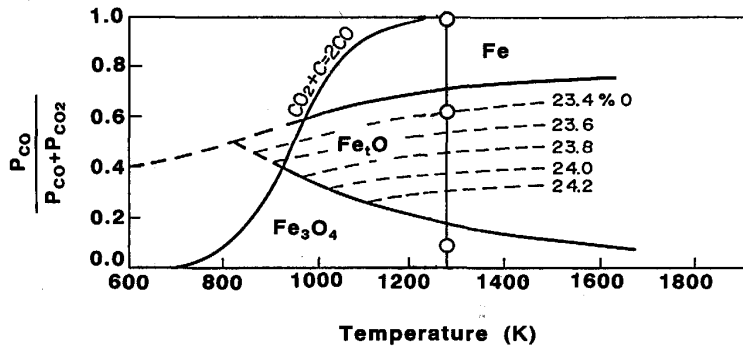


Fig. 1. Equilibrium diagram for Fe-C-O system.

Table 1. Chemical composition of three samples used in this work.

Sample	Chemical composition (mass%)						
	T. Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	C. W.
Fired pellet	66.88	0.25	0.22	2.64	0.50	0.36	—
Non fired pellet	51.46	0.12	4.76	7.00	2.99	0.19	8.43
Sinter	57.97	5.24	8.22	5.62	2.08	1.06	—

C. W.: Combined Water

レットは南米産高品位ヘマタイト鉱を原料に工業的規模のロータリーキルンで製造したもの、非焼成ペレット¹⁾は結合水を含有する豪州産リモナイト鉱を原料としてポルトランドセメント7%添加後ヤードにおいて養生し十分に強度が発現したもの、焼結鉱は各種鉱石を混合し工業的規模の焼結機で製造したものである。熱拡散率の測定にはこれら未還元の試料を直接使用したほか、マグネタイト、ウスタイトおよび金属鉄の各種還元段階まで還元して測定試料とした。これら試料の作成は、Fig. 1に示すFe-C-O系平衡状態図に基づき、1273 KにおいてCOとCO₂のガス組成の比を100/0、60/40、10/90とした。そのほかに同一温度で純水素により金属鉄まで還元したものを含め、合計15種類の試料について熱拡散率の測定を実施した。還元後、直径約10 mm厚さ1 mm程度の円盤状試料を切り出し測定用試料とした。

2.2 気孔率および気孔径

Fig. 2は作成した試料の還元率と気孔率の関係を示している。気孔率はJIS法(JIS M8716)により評価した。いずれの試料も還元進行とともに酸素が除去されるために、気孔率が上昇している。ヘマタイトで20~25%であった気孔率が、マグネタイト、ウスタイト、金属鉄となるにつれて、約30、40~50、50~60数%と上昇した。鉄品位が高く酸素除去量が多い焼成ペレットの気孔率変化が最も大きかった。水素還元とCO還元によって得られた金属鉄の気孔率は、わずかにCO還元の方が大きい傾向が見られるものの、ほぼ同一の値であった。なお、このわずかに認められる差異の原因としては、

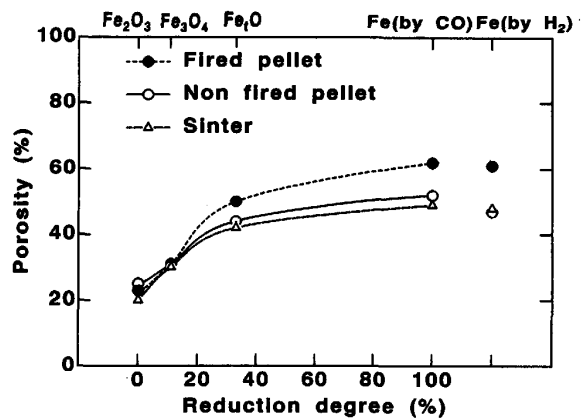


Fig. 2. Change in porosity with reduction degree.

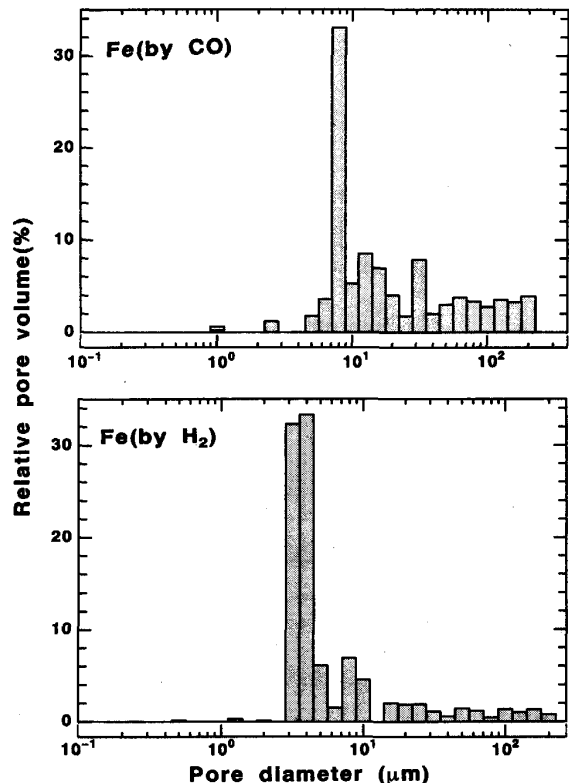


Fig. 3. Distribution of pore diameter of the metallic iron reduced from iron oxide pellet.

CO 還元による膨れの影響が考えられる。

水素および CO ガスによって焼成ペレットを金属鉄まで還元した試料の気孔率はそれぞれ 60% および 62% と同程度であったが、水銀圧入法により求めた気孔径分布には Fig. 3 に示すように両者の間にかんがりの相違がみられる³⁾。すなわち、水素還元による試料は 4 μm 程度の微細な細孔が多いのに対して、CO 還元による試料は 8 μm 程度の気孔径が多い。また、その分布は水素還元の場合狭い範囲に集中しているが CO 還元では広範囲にわたり、100 μm 以上の気孔径も 7% 程度観測されている。

未還元の焼成ペレットと非焼成ペレットの気孔構造に関しても相違が見られた。焼成ペレットは 1573 K で焼き固められるのに対して、非焼成ペレットはセメントを接着材として冷間で養生される。焼成ペレットの組織は鉱石粒子同士の接点が溶融して結合するのに対して、非焼成ペレットは粒子個々が独立に存在していて、鉱石粒子同士の接触部分が少ないと推察される²²⁾。焼成ペレットの圧壊強度が 200 kgf/p 程度であるのに対して、非焼成ペレットのそれが約半分である主原因はこの結合状態の違いと考えられる。焼成および非焼成ペレットの気孔率はそれぞれ 25% と 23% で同程度であるが、前者の気孔径が 3~8 μm の間に集中しているのに対して、後者では 8 μm から 0.01 μm 以下まで広範囲に分布していた⁴⁾。

2.3 熱拡散率測定

測定およびデータ解析法は前報¹⁾²⁾と同じであるので詳細な説明は省略する。一定温度条件下で試料表面に上部よりレーザービームを照射すると、試料温度は数度上昇する。この時の試料表面の非定常温度変化を測定し、最大温度変化の半分に到達する時間 $t_{1/2}$ を求める。熱拡散率 α は放射損失の影響を考慮すると次式で与えられる。

$$\alpha = 0.1388 A l^2 / t_{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 A は放射伝熱損失と伝導伝熱の量的比率によって定まる補正係数¹⁾¹⁴⁾で、放射損失のない断熱状態では $A = 1$ となる。補正係数の値は前報¹⁴⁾²³⁾と同じ値を使用した。

熱拡散率の測定は試料を真空度 6.7×10^{-3} Pa 以下の条件下で室温から 1273 K まで 3 K/min で昇温させ、100 K 刻みで 10 min 各温度に保持して行った。レーザービームの吸収量を向上させるため、あらかじめ試料の表面に高い放射率を持つ黒鉛皮膜形成潤滑剤を塗布した。また、放射温度計の感度を向上させるために、裏面にも塗布した。

焼結鉱の試料の表面状態はペレットの場合と比べ粗いため、最大厚みで評価した場合熱拡散率を過大評価してしまう可能性がある。このように窪みを持つ試料の測定はレーザー光が一部窪みにまで到達するため真の厚さの評価が難しいが、ここでは近似的に最小厚みと最大厚みの平均値を計算に使用した。本研究で使用した焼結鉱の最大厚みと最小厚みの差は最大で 0.3 mm 程度であった。また、試料の作成にあたり貫通するような大きな気孔を有するものは除外した。

3. 測定結果

有効熱拡散率の測定結果を Fig. 4 から 6 に示す。いずれの場合も低温域で高く、高温になるにつれて低下する傾向が見られた。一般に金属鉄およびヘマタイトは強い温度依存性を示し絶対値も大きかった。それに対しマグネタイトとウスタイトの有効熱拡散率は温度依存性が弱く値も小さい。特に、ウスタイトの有効熱拡散率は 2

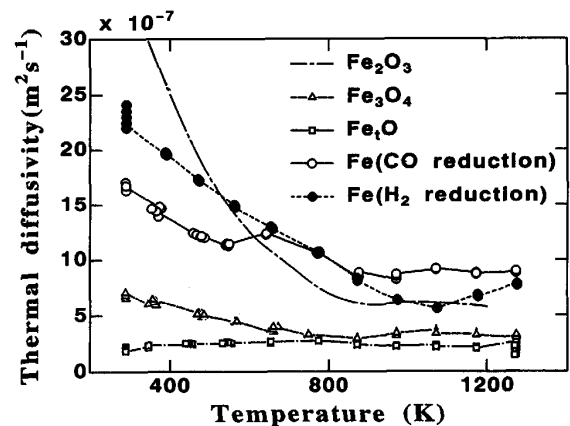


Fig. 4. Temperature dependence of thermal diffusivities of the fired pellets.

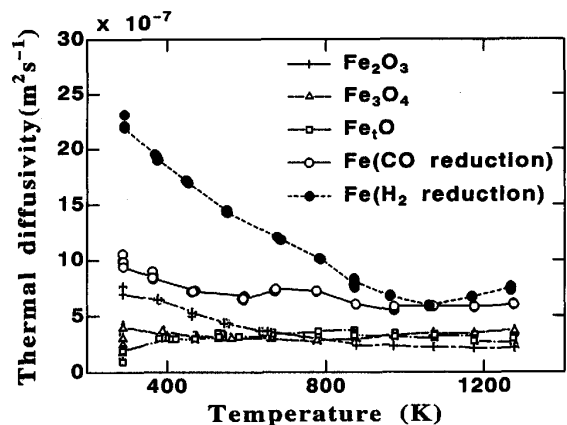


Fig. 5. Temperature dependence of thermal diffusivities of the sinter.

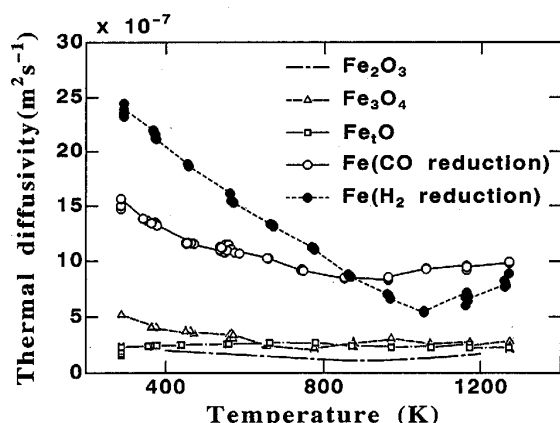


Fig. 6. Temperature dependence of thermal diffusivities of the nonfired pellets.

$\sim 3 \times 10^{-7} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ で、1273 K における鉄の有効熱拡散率の 1/5~1/10 に相当した。これは緻密なウスタイトの熱拡散率自身が他の酸化鉄に比べて極めて小さい²⁾ ことと気孔が存在していることに由来していると推察される。また、いずれの種類製の鉄原料も、ウスタイト、マグネタイト、金属鉄の順に有効熱拡散率が大きくなり、各還元段階における試料の温度依存性は類似していることがわかる。

金属鉄の有効熱拡散率は還元を使用したガス種による差異が明確に現れている。すなわち、水素還元による金属鉄試料の有効熱拡散率は、気孔がない純鉄の熱拡散率と絶対値は異なるものの、焼成ペレット、非焼成ペレット、焼結鉄いずれを還元した場合も 1043 K の磁気転移温度（キューリー温度）で最小値を示す温度依存性が認められた。これに対し、CO 還元の場合はそのような明確な最小値は観測されず、水素還元の試料の熱拡散率に比べ低温域で小さく、高温域でもそれほど低下しない温

度依存性が見られた。

4. 考 察

4.1 緻密な鉄および酸化鉄の熱拡散率との比較

未還元および還元した多孔質試料と緻密で純粋な鉄および酸化鉄の熱拡散率²⁾の比較を 400 K 一定温度における値を例に Fig. 7 に示す。本実験で使用したすべての試料の熱拡散率は HIP（熱間静水圧プレス）法により作成した試料に比べかなり小さくなっている。その割合はヘマタイトで約 4~74%，マグネタイトで約 7~8%，ウスタイトで約 17~20%，CO 還元の鉄で約 6~10%，水素還元の鉄で約 14~16% であった。また、注目すべき点は、ペレットおよび焼結鉄の未還元試料に関しては明確な差が見られるが、それらを還元したマグネタイト、ウスタイトおよび金属鉄の熱拡散率には顕著な差は観測されなかったことである。これは未還元の個々の製鉄原料の試料構造は大きく異なっているが、還元することにより得られる試料は気孔が増大し、同一の熱および反応処理を受けたことにより類似の試料構造へと変化した可能性を示唆している。

本実験で使用した試料と緻密な試料の熱拡散率が異なる原因としては、1) 気孔の影響と 2) 不純物の影響の二つが考えられる。各還元段階における脈石含有量は最少の焼成ペレットで 5% 程度、非焼成ペレットで 20 数% であり量的にかなり異なっているにもかかわらず、試料間の熱拡散率に大きな違いがないことから、2) ではなく 1) の影響が支配的であると判断できる。

4.2 気孔率と有効熱伝導率の関係

4.2.1 簡略な推算式による検討

ここでは脈石成分の影響が最も少ないと考えられる焼成ペレットのデータに関して検討した。有効熱伝導率 k_e は測定された熱拡散率に見かけ密度と加成性を仮定

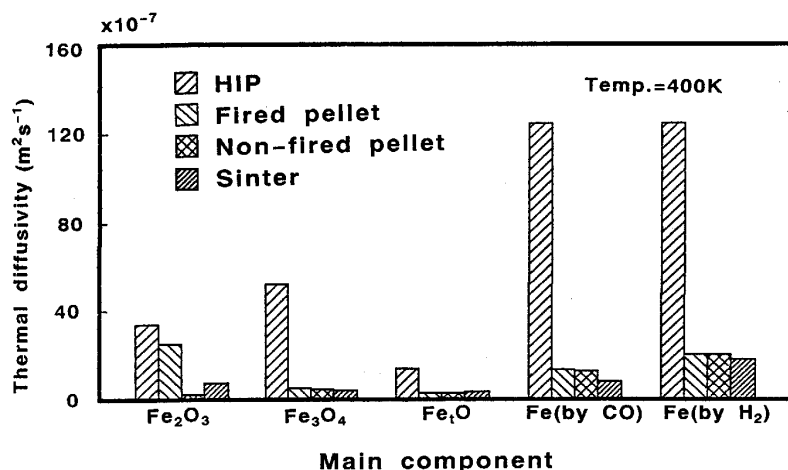


Fig. 7. Thermal diffusivities of dense and porous samples at 400 K.

Table 2. Various empirical equations of effective thermal conductivity proposed.

Equation number	Equation	Comment
(3)	$k_e = ek_g + (1 - e)k_s$	Upper limit (Resistances in parallel)
(4)	$k_e = \{e/k_g + (1 - e)/k_s\}^{-1}$	Lower limit (Resistances in series)
(5)	$k_e = k_s^{1-e}k_g^e$	Geometric mean
(6)	$k_e/k_s = \{1 - 2e(x-1)/(2x+1)\} / \{1 + e(x-1)/(2x+1)\}$	EUCKEN (1932) ¹⁶⁾
(7)	$k_e/k_s = \{e^{2/3} + x(1 - e^{2/3})\} / \{e^{2/3} - e + x(1 - e^{2/3} + e)\}$	RUSSEL (1935) ¹⁷⁾
(8)	$k_e/k_s = (1 - e) + e\{e/(h_r d_p/k_s) + (1 - e)\}$	LOEB (1954) ¹⁸⁾
(9)	$k_e/k_s = 1 - e^{2/3} + e^{2/3}\{(1 - e^{1/3}) + e^{1/3}/\{k_g/k_s + (2/3)(h_r d_p/k_s)\}\}^{-1}$	KUNII (1962) ¹⁹⁾
(10)	$k_e = (2/3)\{e/k_g + (1 - e)/k_s\}^{-1} + (1/3)\{ek_g + (1 - e)k_s\}$	DULNEV (1970) ²⁰⁾
(11)	$k_e/k_s = \{1 + 2e(1 - x')/(2x' + 1)\} / \{1 - e(1 - x')/(2x' + 1)\}$	SAEGUSA (1973) ²¹⁾

$x = k_s/k_g, x' = (k_s/k_g) \exp(-0.2d_p h_r/k_g)$

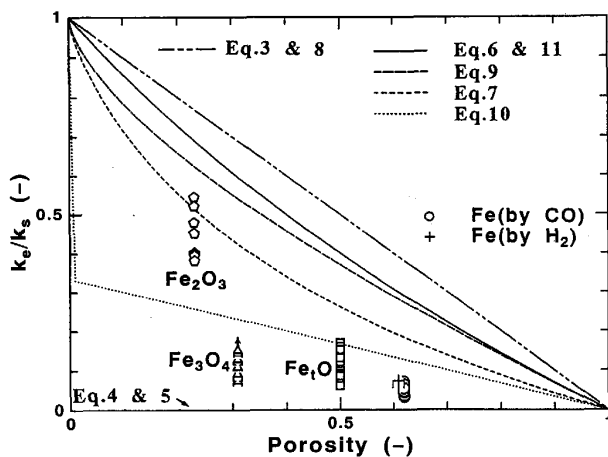


Fig. 8. Relation between porosity and k_e/k_s for the fired pellets.

した比熱⁵⁾を乗じて算出できる。Table 1 に示す焼成ペレットの組成で気孔率 0 の物質の熱伝導率 k_s は次式の多成分系固体の熱伝導率の式⁸⁾により算出した。 k_i および f_i は i 成分の熱伝導率および体積分率を示す。

$$k_e = \prod_{i=1}^n k_i^{f_i} \dots \dots \dots (2)$$

ここでヘマタイト、マグネタイト、ウスタイトおよび金属鉄の熱伝導率は前報²⁾で報告した実験式 (Appendix) を、その他の物質の熱伝導率は文献値⁶⁾を使用した。

Fig. 8 は k_e/k_s と気孔率の関係を示している。気孔率の増大とともに k_e/k_s は低下していることがわかる。高さ方向のばらつきは温度によるこの値が変動していることを示している。

同図には代表的な推算式⁷⁾⁸⁾による推算値もあわせて示してある。評価した推算式を Table 2 に示す。これらの式はいずれも主として気孔率 e の関数として簡略化された形で表現されている。(3)式は入熱方向に対して気孔と固体が完全に並列に存在している場合で、この時熱伝導率は最高値を示す。逆に、気孔と固体が直列に存在している場合は(4)式に示す形で表現でき、この時最小の熱伝導率を示す。(5)式以降の式は何らかの固体

形状を仮定して導出しており⁷⁾、いずれも(3)、(4)式の範囲におさまっている。例えば、(7)式は四角の気泡が固相中に分散した場合⁷⁾、(9)式は円筒形の気孔を仮定した場合である⁹⁾。これらのうち(8)、(9)、(11)の各式は放射の影響を考慮している。

これらの式中で、気孔径 d_p は細孔の平均径を、ガスの熱伝導率 k_g は真空中における測定であるからゼロを代入して有効熱伝導率を推算した。なお、放射伝熱係数 h_r は固体の放射率 ϵ を 0.5¹⁰⁾とし、次式⁹⁾により算出した。

$$h_r = 0.2270 \{ \epsilon / (2 - \epsilon) \} (T/100)^3 \dots \dots \dots (12)$$

$k_s/k_g = 5$ 程度では各式の差は小さいが本実験のように $k_g = 0$ の場合には各式の特徴が明確に現れてくる。実験値と推算値を比較するとヘマタイトに関しては(7)式による推算値が比較的近いが、還元後はこれらの簡単な推算式では満足に説明できない。これらの推算式は均一に気泡が分散した系には実用可能であるが、本実験のように還元により作成した複雑な構造を有する多孔質試料には適用できないことを示唆している。

4.2.2 修正国井の式⁹⁾による検討

気孔率が高くなると固体内の伝導伝熱は、薄くて曲がりくねった固体中を伝わることになる。固体内伝導伝熱において、気孔率が高い場合は熱エネルギーの流れる距離はまっすぐな場合に比べ η 倍に長くなるとして、国井は(9)式を次のように修正した。右辺第1項が固体内伝導伝熱の項、第2項が放射伝熱の影響を考慮した項である。

$$k_e = (1 - e^{2/3})k_s/\eta + e^{1/3}\{1 + (2/3)(h_r d_p/k_g)\} \dots \dots \dots (13)$$

この式においては η は未知パラメーターであり、パラメーターフィティングにより求めることになる。CO還元と水素還元による還元鉄の実験値との比較によればそれぞれ $\eta = 5.67$ および 3.98 とすることで比較的よい一致をみた。計算および実験値の比較を Fig. 9 に示す。この η の値は多泡ガラスの場合の 1.7~2.5⁹⁾に

比べてきわめて大きく、構造が複雑であるために熱伝導率が著しく低下していることを定性的に示している。

また、水素還元比べ CO 還元では高温域において不一致の割合が大きくなっている。この原因として放射の影響が考えられるので、パラメーター値を変更して検討した。放射率 ϵ を 0.5 から 0.9 へ、気孔径を $8\mu\text{m}$ から $500\mu\text{m}$ へと大きく変化させたが、この範囲内では有効熱伝導率が高温域で上昇するような現象は見られず、計算結果に有為な差は見られなかった。これは 1273K 以下で 1mm 以下の気孔に関しては、放射の影響は無視できるとした多泡質アルミナの報告結果⁹⁾と一致した。

4.2.3 単位胞モデルによる構造の検討

修正国井の式における補正係数 η の導入は簡便に実

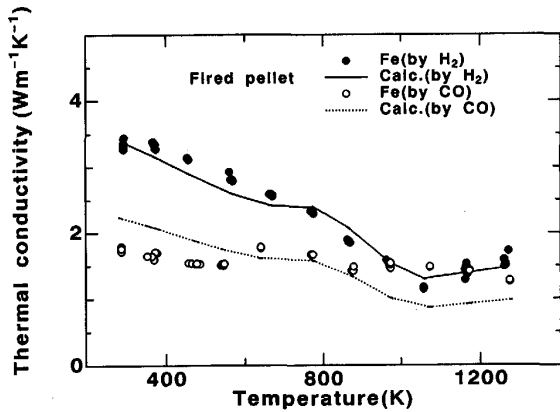


Fig. 9. Thermal conductivities predicted by modified Kunii's equation for the metallic iron reduced from iron oxide pellet.

験データを再現できるという観点からは有効であるが、反面物理的な意味が明確ではないという欠点を持つ。そこで、ここでは単位胞モデル^{11)~13)}により構造を考慮した有効熱伝導モデルの検討を行った。想定した単位胞を Fig. 10 に示す。多孔質体は球状粒子より構成され、同一部分の繰返し部分よりなっていると仮定すると、多孔質体の熱伝導率モデルは単位胞 (ユニットセル) の熱伝導率モデルに帰着して議論することができる。このモデルにおいて、固相は長さ θ の立方体の部分 (核部) と長さ $\xi\eta$, $\xi\eta$, $(1-\theta)$ の直方体の部分 (結合部) で構成される。本試料の場合、核と結合部以外の部分は気孔であることから、気孔率 e との関係は次のようになる。

$$e = 1 - \theta^3 - 3(\xi\eta)^2(1-\theta) \dots\dots\dots(14)$$

$$0 \leq \xi \leq 1 \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 ξ は自由構造パラメーターと呼ばれる。 $\xi=1$ の時は Luikov モデル¹²⁾に相当する。 Fig. 11 に単位胞の伝熱抵抗モデルを示す。この図に示すように、単位胞

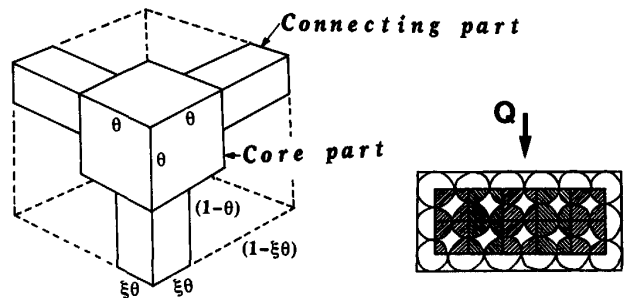


Fig. 10. Schematic presentation of the unit cell model.

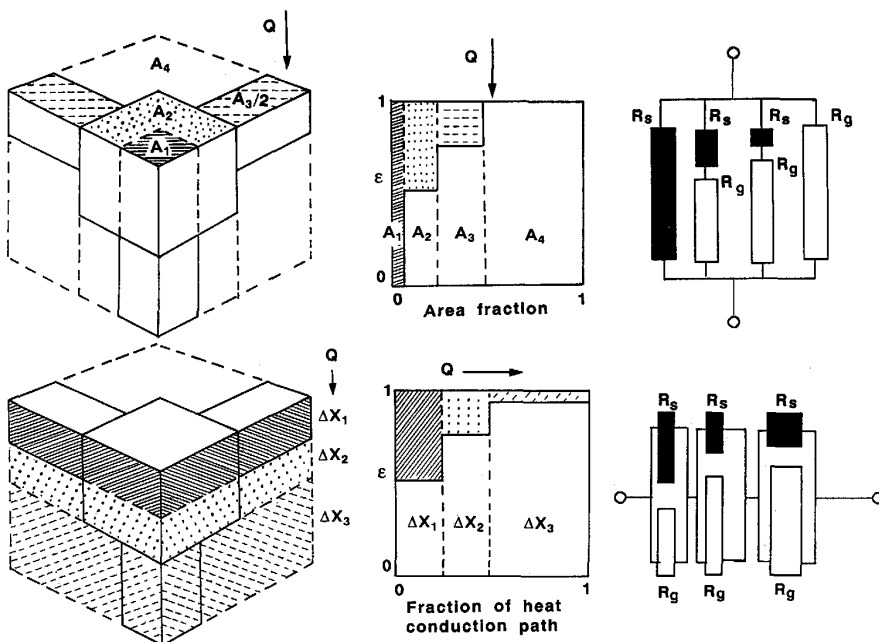


Fig. 11. Porosity distribution and models of heat transfer resistance.

Table 3. Values of θ and $\theta\xi$ for the unit cell model obtained in the work.

	θ	$\theta\xi$	Porosity
Nonfired pellet Hematite	0.906	0.150	0.25
Fired pellet Hematite	0.897	0.395	0.23
Magnetite	0.874	0.181	0.32
Wustite	0.773	0.237	0.50
Iron reduced by CO	0.713	0.143	0.62
Iron reduced by H ₂	0.715	0.200	0.60

の有効熱伝導率は直列抵抗および並列抵抗の二つに
ておのおの次のように導出することができる。ただし、
前節の結果より本実験条件下においては、熱放射の影響
は無視できるほど小さいと仮定した。直列抵抗と見なし
た場合、

$$k_{ser} = \left[\frac{\xi\theta}{k_s + (k_g - k_s)(1 - \theta^2 - 2\xi\theta(1 - \theta))} + \frac{(\theta - \xi\theta)}{k_s + (k_g - k_s)(1 - \theta^2)} + \frac{(1 - \theta)}{k_s + (k_g - k_s)(1 - (\xi\theta)^2)} \right]^{-1} \dots\dots\dots(16)$$

並列抵抗と見なした場合、

$$k_{par} = k_g[1 - 2\xi\theta(1 - \theta) - \theta^2] + k_s(\xi\theta)^2 + k_g k_s [2\xi\theta(1 - \theta) / \{k_s(1 - \xi\theta) + k_g\xi\theta\} + \{\theta^2 - (\xi\theta)^2\} / \{k_s(1 - \theta) + k_g\theta\}] \dots\dots\dots(17)$$

k_e は次式の形状平均により求められ、 $\xi=1$ の時はよい
一致を示すことが知られている¹²⁾。

$$k_e = k_{ser}^e k_{par}^{1-e} \dots\dots\dots(18)$$

本実験データを検討するために、 $k_g=0$ の条件下で
(14)~(18)式を連立して解き、全温度範囲にわたり実験
値と比較することにより、次式に示す偏差 β (Root-
Mean-Square-Error) が最小値となるように ξ と θ を
決定した。最小値は誤差地函法¹⁵⁾により評価できる。

$$\beta = \left[\frac{1}{N} \sum (1 - k_{calc}/k_{obs})^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(19)$$

このように、緻密な試料の熱伝導率、多孔性で複雑な
組成と構造を有する試料の熱伝導率および気孔率の三つ
のデータから ξ と θ を決定することができる。単位胞
の形状は結合部の太さ $\xi\theta$ と核部の一辺 θ により定量的
に比較することができる。得られたパラメーターを
Table 3 に示す。CO 還元により単位胞の結合部分の太
さ $\xi\theta$ が 0.395, 0.181, 0.237, 0.143 と細くなる傾向
が表現されている。また、焼成ペレットと非焼成ペレッ
トでは気孔率はほぼ同程度であるにもかかわらず、 $\xi\theta$
は 0.150 と 0.395 と大きく異なっている。これは焼成
ペレットは焼成により粒子同士の接合部分が融着し結合
しているのに対し、非焼成ペレットはセメントによる接
着のため個々の粒子は独立に存在しヘマタイト粒子同士

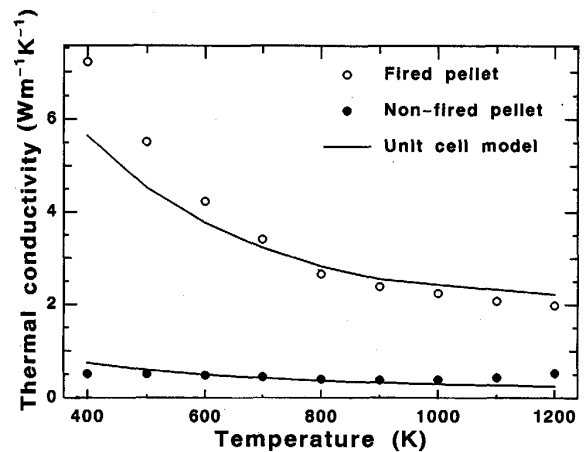


Fig. 12. Thermal conductivities predicted by the unit cell model for the un-reduced fired and non-fired pellets.

の結合部が細いという現象に対応している。単位胞モデル
による未還元焼成および非焼成ペレットの有効熱伝導率
を Fig. 12 に示す。実験値と推算値はほぼ満足できる
一致を示している。このように Table 3 に示すパラメ
ーターを使用することにより構造を考慮した実用的に
使用可能な実験式として整理することができる。

5. 結 言

焼成ペレット、非焼成ペレットおよび焼結鉄をマグネ
タイト、ウスタイト、金属鉄まで 1273 K で段階ごとに
還元し有効熱伝導率を測定した。レーザーフラッシュ法
により室温から 1273 K の温度範囲で系統的に測定し
た。その結果、以下の結論が得られた。

1) 未還元試料の気孔率は 20~25% であるが、この
気孔率は還元が進行するとともに増大し、金属鉄では
50~60% になった。この変化に対応し、多孔性の試料
の有効熱伝導率は緻密な試料に比べかなり小さい値を示
した。

2) 金属鉄、ヘマタイトの有効熱伝導率には大きな温
度依存性が認められた反面、ウスタイトの有効熱伝導率
の温度依存性はきわめて小さかった。還元の進行に伴い
有効熱伝導率は減少しウスタイトで最小値をとり、金属
鉄でその 5~10 倍に増加した。

3) 未還元時には異なっていた焼成、非焼成ペレット
および焼結鉄の有効熱伝導率は還元するとほぼ同程度の
値となることが確認された。

4) 水素および CO ガス還元した金属鉄の有効熱伝導
率は異なる温度依存性を示した。

5) 種々提案されている実験式を用いて得られた測定
結果を整理するとともに、粒子同士の結合状態を表現す

ることができる単位胞モデルに基づいた有効熱伝導率の実験式を提案した。

Appendix

緻密な酸化鉄の熱伝導率の逆数は温度に関して Tanmann 温度 ($0.5 T_{mp}$) を境界として、以下に示すとおり 2本の直線で整理できた²⁾。なお、ウスタイトだけが原点を通らないのは格子欠陥が存在するためと推察される。

Fe_2O_3 :

$298 < T < 912$

$$k = 1/1.887 \cdot 10^{-4} T$$

$912 < 1500$

$$k = 1/(8.319 \cdot 10^{-5} T + 9.243 \cdot 10^{-2}) \dots\dots\dots(20)$$

Fe_3O_4 :

$298 < T < 906$

$$k = 1/1.660 \cdot 10^{-4} T$$

$906 < T < 1500$

$$k = 1/(2.967 \cdot 10^{-6} T + 1.508 \cdot 10^{-1}) \dots\dots\dots(21)$$

FeO :

$298 < T < 825$

$$k = 1/(2.335 \cdot 10^{-4} T + 1.136 \cdot 10^{-1})$$

$825 < T < 1500$

$$k = 1/(-9.739 \cdot 10^{-5} T + 3.795 \cdot 10^{-1}) \dots\dots\dots(22)$$

記 号

A: 補正係数

A_1, A_2, A_3, A_4 : 単位セルにおける面積割合 (—)

d_p : 気孔径 (—)

e : 気孔率 (—)

f_i : i 成分の体積分率 (—)

h_r : 放射伝熱係数 ($Wm^{-2} K^{-1}$)

k_{calc} : 推算式から計算された熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_e : 固体有効熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_g : 気体熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_i : i 成分の熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_{obs} : 測定された熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_s : 気孔率 0 の固体熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_{ser} : 直列抵抗とした場合の熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

k_{par} : 並列抵抗とした場合の熱伝導率 ($Wm^{-1} K^{-1}$)

l : 試料厚さ (m)

Q : 熱量 (Jm^{-2})

R_g, R_s : 気相及び固相の伝熱抵抗 ($mK W^{-1}$)

$t_{1/2}$: 温度応答曲線が最大値の 1/2 に到達する時間 (s)

T_{mp} : 融点 (K)

x_1, x_2, x_3 : 熱伝導の距離 (—)

α : 熱拡散率 (m^2s^{-1})

β : 実験値と計算値の偏差 (—)

ϵ : 放射率 (—)

θ : 単位胞における立方体の 1 辺の長さ (—)

κ : k_s/k_g (—)

ξ : 単位胞における自由構造パラメーター (—)

文 献

- 1) 太田弘道, 秋山友宏, 徐 仁国, 高橋礼二郎, 八木順一郎, 早稲田嘉夫: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 1877
- 2) 秋山友宏, 小倉 岳, 太田弘道, 高橋礼二郎, 早稲田嘉夫, 八木順一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 231
- 3) 沈 峰満, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 523
- 4) 高橋礼二郎, D. M. NAVARRO, 八木順一郎: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **43** (1987), p. 32
- 5) I. BARIN and O. KNACKE: Thermochemical Properties of Inorganic Substances [Springer-Verlag] (1973)
- 6) 熱物性ハンドブック (日本熱物性学会編) (1990), p. 260 [養賢堂]
- 7) DAWSON and BRIGGS: J. Mater. Sci., **16** (1981), p. 3346
- 8) 松原弘美, 田尻耕治, 朝比奈正, 小坂峯雄: エネルギー・資源, **8** (1987), p. 554
- 9) 国井大蔵: 熱的単位操作 (上) (1976), p. 123
- 10) R. TAKAHASHI, J. YAGI and Y. OMORI: Trans. Iron Steel Iron Jpn., **14** (1974), p. 26
- 11) G. N. DULNEV and V. V. NOVIKOV: J. Eng. Phys., **36** (1979), p. 601
- 12) A. V. LUIKOV, A. G. SHASHKOV, L. L. VASILIEV and Yu. E. FRAMAN: Int. J. Heat Mass Trans., **11** (1968), p. 117
- 13) L. MARCUSSEN: Thermal Conductivity (1985), p. 585
- 14) 太田弘道, 早稲田嘉夫: 窯業協会誌, **94** (1986), p. 295
- 15) 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 848
- 16) A. EUCKEN: VDI Forschungsheft, **B3** (1932), p. 353
- 17) H. W. RUSSEL: J. Am. Ceram. Soc., **18** (1935), p. 1
- 18) A. L. LOEB: J. Am. Ceram. Soc., **37** (1954), p. 96
- 19) 国井大蔵: 詳細化学工学 I (1962), p. 637 [朝倉書店]
- 20) G. N. DULNEV and Y. P. ZARICHINYAK: Heat Trans. Sov. Res., **2** (1970), p. 89
- 21) 三枝 隆, 鎌田健次, 飯田法昭: 化学工学, **37** (1973), p. 811
- 22) 高橋礼二郎, 石井正夫, 八木順一郎: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **41** (1985), p. 109
- 23) 太田弘道, 徐 仁国, 早稲田嘉夫, 四家 章: 熱物性, **2** (1988), p. 59