



# Wicke-Kallenbach法を用いた炭材内装熱間成型ブリケットのCO-CO<sub>2</sub>混合ガスの有効拡散係数の測定

植木 保昭\*・新田 和明\*<sup>2</sup>・大野 光一郎\*<sup>3</sup>・前田 敬之\*<sup>3</sup>・西岡 浩樹\*<sup>3</sup>・清水 正賢\*<sup>3</sup>

Measurement of Effective Diffusivity for CO-CO<sub>2</sub> Gas Mixture in Hot Briquetting Carbon Composite Iron Ore by Wicke-Kallenbach Method

Yasuaki UEKI, Kazuaki NITTA, Ko-ichiro OHNO, Takayuki MAEDA, Koki NISHIOKA and Masakata SHIMIZU

**Synopsis** : Effective diffusivity for CO-CO<sub>2</sub> gas mixture in Hot Briquetting Carbon Composite Iron Ore (CCB) at a temperature range of room temperature to 673 K was measured by Wicke-Kallenbach Method. The results obtained are summarized as follows;

(1) Effective diffusivity of CO-CO<sub>2</sub> gas mixture through CCB increased with increasing temperature and fractional reaction of CCB. The effective diffusivity for CO-CO<sub>2</sub> system in CCB was proportional to the 1.50 power of temperature.

(2) Knudsen diffusion and surface diffusion are negligible in regard to diffusions of CO and CO<sub>2</sub> in CO-CO<sub>2</sub> gas mixture in CCB. Therefore, diffusions of CO and CO<sub>2</sub> in CO-CO<sub>2</sub> gas mixture in CCB are described by molecular diffusion.

**Key words** : carbon composite iron ore; hot briquetting; gas diffusion; effective diffusivity; Wicke-Kallenbach method.

## 1. 緒言

地球温暖化に歯止めをかけるために、CO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガス排出量を削減する試みがなされている。CO<sub>2</sub>排出量削減の解決策の一つとして石炭と鉄鉱石の混合体である炭材内装塊成鉱が注目されている。この炭材内装塊成鉱は従来の高炉原料である焼結鉱や鉄鉱石ペレットと比較して高速還元が可能な製鉄原料であるため、エネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量の低減が可能<sup>1-3)</sup>である。近年、回転炉床炉を用いて短時間で還元鉄を製造するプロセスがダスト処理の用途で実用化されている<sup>3,4)</sup>。

従来、炭材内装塊成鉱はバインダーによって塊成化するコールドボンド法で製造されていたが、熱間成型法<sup>5)</sup>の開発によりバインダーレスで高強度な炭材内装塊成鉱を製造することが可能となった。そのため、熱間成型法により製造された炭材内装熱間成型ブリケット（以後CCBと表記する）の適用範囲が拡大し、高炉使用に向けて高炉条件下での還元挙動などを明らかにするために基礎的な研究<sup>6-10)</sup>が精力的に実施されている。

CCBは反応過程において炭材がガス化により消費されるとともに、鉄鉱石中の酸素が還元により除去されることにより気孔が増加する。これにより有効拡散係数が増加し試料内部に雰囲気ガスが拡散することで雰囲気ガスの影響を受けやすくなるものと考えられる。このためCCBにお

けるガス拡散は重要であるが、CCB中の拡散に関する研究はほとんどない。

そこで、本研究では等圧下における測定ができ、ガスの種類を選ばないことならびに透過率の測定も可能であるWicke-Kallenbach法<sup>11)</sup>により、反応率を変化させたCCBのCO-CO<sub>2</sub>混合ガスによる有効拡散係数を室温から673Kにおいて測定し、有効拡散係数に及ぼす反応率や温度の影響を調査した。

## 2. 基礎式

### 2.1 多孔質体中のガス拡散方程式

多孔質体中における二成分系のガス拡散の一般式はScottとDullien<sup>12)</sup>やEvansら<sup>13)</sup>によれば(1)式で示される。

$$J_i = - \frac{c_2 D_{i-j} K_i}{(K_i + c_2 D_{i-j}) RT} \nabla(P y_i) + \frac{y_i K_i}{K_i + c_2 D_{i-j}} (J_i + J_j) \dots (1)$$

またKnudsen拡散係数に対しては気体分子運動論による理論式として(2)式が成立する<sup>14)</sup>。

$$K_i = c_1 \sqrt{\frac{RT}{M_i}} \dots \dots \dots (2)$$

(1)式から成分*i*に対するモル分率勾配および全圧の勾配を伴う場合の多孔質体中のガス拡散*J<sub>i</sub>*の一般式<sup>15)</sup>である

平成20年6月26日受付 平成20年8月18日受理 (Received on June 26, 2008; Accepted on Aug. 18, 2008)

\* 九州大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu University, 744 Motoooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395)

\*<sup>2</sup> 九州大学大学院生 (現：(株)神戸製鋼所) (Graduate Student, Kyushu University, now Kobe Steel, Ltd.)

\*<sup>3</sup> 九州大学大学院工学研究院 (Department of Materials Science & Engineering, Kyushu University)

(3)式が得られる。

$$J_i = -\frac{c_2 D_{i-j} K_i P}{(K_m + c_2 D_{i-j}) RT} \nabla y_i - \frac{K_i (K_j + c_2 D_{i-j}) y_i}{(K_m + c_2 D_{i-j}) RT} \nabla P \dots\dots (3)$$

ここで、

$$K_m = K_i y_j + K_j y_i \dots\dots\dots (4)$$

である。COまたはCO<sub>2</sub>のような吸着性ガスの場合、表面拡散流束 $J_i^{(S)}$ がこれに加わり<sup>16)</sup>、更にDarcyの法則に従う粘性流を考慮すると全ガス流束 $N_i$ は(5)式で表される。

$$N_i = -\frac{c_2 D_{i-j} K_i P}{(K_m + c_2 D_{i-j}) RT} \nabla y_i - \left[ \frac{K_i (K_j + c_2 D_{i-j})}{K_m + c_2 D_{i-j}} + \frac{c_0 P}{\mu_m} \right] \frac{y_i}{RT} \nabla P + J_i^{(S)} \dots\dots\dots (5)$$

ArおよびHeのような吸着性の弱いガスでは表面拡散は無視できるとして、室温以上では $J_i^{(S)}=0$ と仮定した<sup>17)</sup>。また、COまたはCO<sub>2</sub>のような吸着性ガスの場合でも、CCBにおいて表面拡散は無視できるとして $J_i^{(S)}=0$ と仮定した。なお、この仮定については4・2で論述する。

Wicke-Kallenbach法では $J_i$ と $J_j$ が同時に測定されるので、(1)式に $\nabla P=0$ を代入して $z=0$ で $y_i=y_i^0$ 、 $z=L$ で $y_i=y_i^L$ の境界条件で解くと以下の(6)式が得られる。

$$J_i = \frac{c_2 D_{i-j} P}{RTL\alpha} \ln \frac{1 + c_2 D_{i-j} / K_i - \alpha y_i^L}{1 + c_2 D_{i-j} / K_i - \alpha y_i^0} \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$\alpha = 1 + J_j / J_i \dots\dots\dots (7)$$

(6)式に測定値 $J_i$ 、 $J_j$ および $K_i$ を代入することで有効拡散係数 $c_2 D_{i-j}$ が求められる。

2・2 気孔構造因子 $c_0$ および $c_1$ の算出

(6)式より $c_2 D_{i-j}$ を求める場合、 $c_1$ が必要となる。 $c_0$ 、 $c_1$ および $c_2$ は多孔質体の気孔構造を示すパラメーターであるからガスの種類に関係ない。そこで $c_0$ と $c_1$ の測定時に吸着性の弱いガスを使用することで表面拡散の影響を無視することができる。(5)式に $J_i^{(S)}=0$ を代入し、 $\nabla y_i=0$ 、 $z=0$ で $P=P_0$ 、 $z=L$ で $P=P_L$ の境界条件で解くと以下の(8)式となる。

$$N_i = \left[ \frac{c_1}{L} + \frac{c_0}{L^2} \left( \frac{\bar{P}L}{\mu_i} \sqrt{\frac{M_i}{RT}} \right) \right] \frac{\Delta P}{\sqrt{M_i RT}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで $\Delta P = P_L - P_0$ 、 $\bar{P} = (P_0 + P_L) / 2$ 。

重野ら<sup>18,19)</sup>が示したように2種類のガスについて(8)式から $N_i$ と $\Delta P$ の関係を求めれば、この傾きから $c_0$ と $c_1$ を求めることができる。なお計算に必要な $\mu$ の値はHirschfelderらによる推算式<sup>20)</sup>から求めた。

3. 実験方法

3・1 実験試料

熱間成型法によって製造された炭材内装熱間成型ブリケットをグラインダーで円柱状に削り取り、マイクロカッターでスライスすることで直径約19.5mm、厚さ約4.2mm、質量約3.1gに成型したものを試料として用いた。CCBの化学組成をTable 1に示す。

前報<sup>21)</sup>と同様の実験装置を用いて各反応率(0, 0.22, 0.35, 0.57, 0.73, 0.91)のCCBを作製した。実験方法は、円盤状に成型した試料をN<sub>2</sub>ガス雰囲気下の実験温度(1173~1473K)に設定した均熱帯に降下させ反応を開始させた。反応による重量変化を熱天秤により測定し、所定の反応率になった時点で773K以下のN<sub>2</sub>ガス雰囲気下で急冷した。急冷後、試料にクラックが生じていないのを確認して有効拡散係数の測定に使用した。CCBの反応率は以下の式により定義した。

$$F_R = \Delta W / (W_0 \cdot D_C + W_0 \cdot D_O) \dots\dots\dots (9)$$

3・2 拡散流束と透過流束の測定方法

本研究では二成分系ガスの等圧下における定常相互拡散を利用するWicke-Kallenbach法により拡散流束を測定した。実験装置の概略図と装置内部の試料周辺の拡大図をFig. 1に示す。一方からはCO、他方からはCO<sub>2</sub>を質量流量計を経て実験装置に導入した。このとき、装置内部の差圧をデジタルマンومترにより測定し、等圧になるようニードルバルブでガス圧を調整した。装置にシースヒーターを巻きつけることで昇温可能とした。事前に試料部分と装置外部の温度を同時に測定し、装置外部の温度を調節することにより試料部分を所定の温度に設定した。両出口からのガスの一部をサンプリングし、ガスクロマトグラフ

Table 1. Chemical analysis of sample (mass%).

| T:Fe | FeO   | SiO <sub>2</sub> | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | C     |
|------|-------|------------------|------|--------------------------------|------|-------|
| 53.1 | 0.005 | 2.07             | 0.14 | 0.91                           | 0.09 | 17.51 |

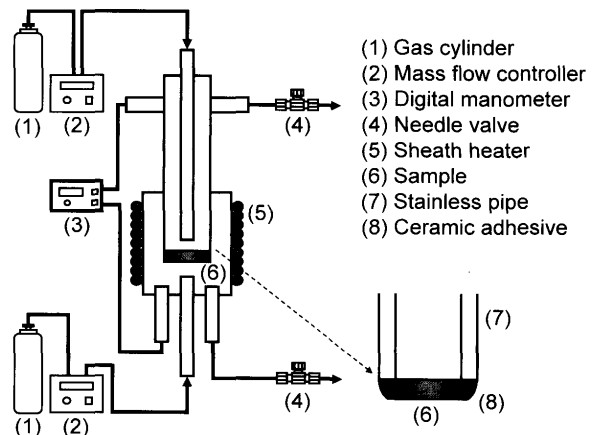


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

により濃度測定を行い、この値とガス流量(3.33×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/s)からCOとCO<sub>2</sub>の拡散流束を算出した。

c<sub>0</sub>とc<sub>1</sub>の算出に必要な透過流束の測定は吸着性の弱いArとHeを使用した。一方のガス出口のニードルバルブで拡散セル内のガス圧を変化させると、圧力差によりガスが試料を透過する。そして、他方の出口から排出されたArまたはHeの流量を石鹼膜流量計により測定し、透過流束を算出した。

試料は高温用接着剤を用いて装置に接着した。なお試料側面からガスが透過しないように試料側面にも接着剤を塗布した。測定は室温、373K、473K、573K、673Kで行った。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 c<sub>0</sub>とc<sub>1</sub>への温度および反応率の影響

Fig. 2に反応率0の室温におけるArおよびHeを使用した場合の透過流束と差圧の関係を一例として示す。重野らが成型コークスで得られた結果<sup>18)</sup>と同様に、CCBにおいても透過流束と差圧の間で良い直線関係が得られた。なおここには示していないが、他の反応率のCCBや温度でも同様の結果が得られた。しかし、反応率0のCCBの473~673Kにおける測定に関しては、Arの透過流束が非常に小さく石鹼膜流量計によりガス流量を測定することが出来なかった。(8)式よりFig. 2の2本の直線の傾きから反応率0のCCBの室温におけるc<sub>0</sub>とc<sub>1</sub>を求めることができる。同様にして得られた反応率0と0.57、0.91のCCBのc<sub>0</sub>とc<sub>1</sub>をFig. 3に示す。これより多少データにばらつきがあるものの、室温~673Kの温度範囲においてc<sub>0</sub>およびc<sub>1</sub>には温度依存性はないことが分かる。

また、反応率の影響はc<sub>1</sub>に関してはほとんど確認されないが、室温~473Kにおける測定結果に関しては、c<sub>0</sub>は反応率の上昇とともに若干ではあるが上昇する傾向が見られた。CCBは反応が進行するにつれて、炭材がガス化し鉄鉱石が還元されるため気孔が増加する。そのため気孔率の増加に伴って気孔構造が変化し、粘性流の係数であるc<sub>0</sub>が上昇するものと考えられる。しかし、気孔構造が変化する

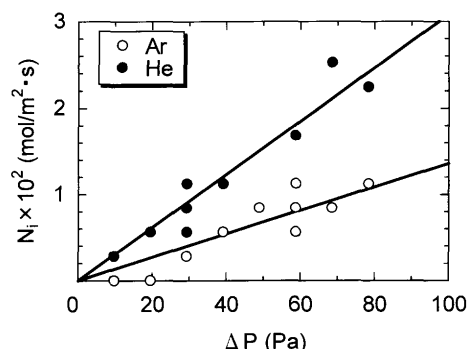


Fig. 2. Relation between total flux and differential pressure.

にもかかわらず、Kundsen拡散の係数であるc<sub>1</sub>は変化しない。これは本研究で用いたCCBではKundsen拡散の影響が小さいためであると考えられる。つまり、室温から673Kの範囲ではKundsen拡散が無視できるものと推察される。

#### 4.2 表面拡散の影響

Fig. 4に反応率0.35と0.73、0.91のCCBのCOおよびCO<sub>2</sub>の拡散流束と温度の関係を示す。反応率および温度の上昇とともに拡散流束は上昇している。また、反応率0.73の室温と373Kにおける測定結果を除きCO<sub>2</sub>の拡散流束よりもCOの拡散流束が大きい。ここで二成分系ガスのガス拡散の場合、(10)式の平方根則が成立する。

$$-J_i/J_j = \sqrt{M_j/M_i} \dots\dots\dots(10)$$

上の式よりCOおよびCO<sub>2</sub>の拡散流束の比は理論上1.25であり、測定結果より求めた拡散流束の比の平均値は1.17であった。これはCOの拡散流束がCO<sub>2</sub>の拡散流束よりも大きいことを示している。しかし、重野ら<sup>18)</sup>は成型コークスを用いた際の拡散流束の比は0.87であり、CO<sub>2</sub>の拡散流束が大きいと報告している。さらに重野らは全体のガス拡散流束中の表面拡散流束が占める割合を算出しており、COは7.2%、CO<sub>2</sub>は20%であり、表面拡散の割合がかなり大きいことを示している<sup>18)</sup>。このことから拡散流束の比が0.87と理論値1.25よりかなり小さい値となったのは表面拡散の影響であると考察している。つまり、本研究で得られ

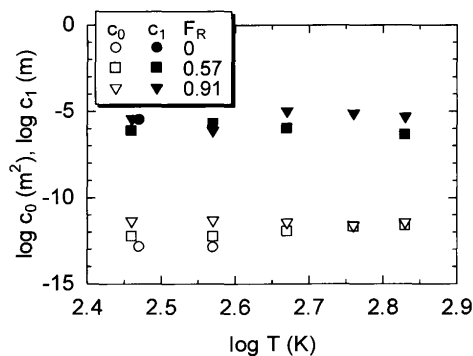


Fig. 3. Variations of the relative Kundsen diffusivity coefficient and the coefficient of Darcy flow permeability with temperature.

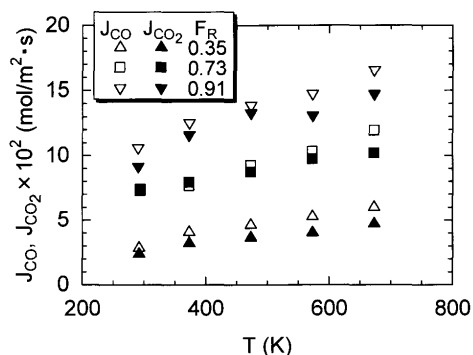


Fig. 4. Temperature dependence of diffusive fluxes of CO and CO<sub>2</sub>.

た拡散流束の比の平均値1.17は理論値1.25に近い値となっており、表面拡散の影響は小さいと考えられる。これはCCBが成型コークスとは異なり、酸化鉄と石炭により構成されており、この構成物質の違いによって表面拡散の影響が小さくなったものと考えられる。そこでCCBでは表面拡散は無視できるとして(5)式において $J_i^{(s)}=0$ と仮定し、有効拡散係数を算出した。

4.3 有効拡散係数の温度依存性

Fig. 5に各反応率のCCBにおける有効拡散係数の温度依存性を示す。反応率および温度の上昇とともに有効拡散係数が増加した。ガスの相互拡散係数の温度依存性は理論的には $T$ の1.50~2.00乗の範囲<sup>22)</sup>にあり、Turkdoganら<sup>23)</sup>は室温から1173Kの温度範囲における黒鉛中のCO-CO<sub>2</sub>系の有効拡散係数をカニスター法により測定し、 $T^{1.50}$ に比例すると報告している。そこで、CCBのCO-CO<sub>2</sub>系の有効拡散係数が $T^{1.50}$ に比例すると仮定し、最小二乗法により有効拡散係数と温度の関係式を求め、以下に示す式を得た。

反応率0 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 3.19 \times 10^{-10} T^{1.50}$  .....(11)

反応率0.22 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 6.45 \times 10^{-10} T^{1.50}$  .....(12)

反応率0.35 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 7.77 \times 10^{-10} T^{1.50}$  .....(13)

反応率0.57 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 1.01 \times 10^{-9} T^{1.50}$  .....(14)

反応率0.73 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 1.80 \times 10^{-9} T^{1.50}$  .....(15)

反応率0.91 :  $c_2 D_{CO-CO_2} = 2.28 \times 10^{-9} T^{1.50}$  .....(16)

これらの関係式をFig. 5に破線で示す。得られた関係式は実験値とほぼ一致しており、CCBにおけるCO-CO<sub>2</sub>系の有効拡散係数は $T^{1.50}$ に比例することが分かる。

ところで、反応率の上昇にともない $T^{1.50}$ の係数が増加している。この $T^{1.50}$ の係数は以下の(17)式に示す気孔構造因子で分子拡散の係数 $c_2$ に関連しており、 $c_2$ の増減にともない $T^{1.50}$ の係数も増減する。

$c_2 = \varepsilon / \tau$  .....(17)

CCBは反応の進行にともない石炭がガス化し、酸化鉄中の酸素が除去されるため、気孔率 $\varepsilon$ が増加し、さらに気孔

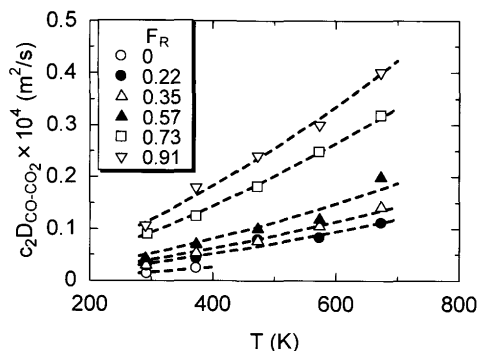


Fig. 5. Temperature dependence of effective diffusivities for CO-CO<sub>2</sub> gas mixture.

径の拡大と気孔連結により迷宮度 $\tau$ が低下するものと考えられる。したがって、反応率の上昇にともない $c_2$ が増加し、 $T^{1.50}$ の係数も増加したものと考えられる。

また、重野ら<sup>24)</sup>は成型コークスにおいてKundsen拡散の影響を無視した場合、Turkdoganら<sup>23)</sup>の結果と同様の関係が得られたと報告している。そこで、Kundsen拡散が無視できるものとして有効拡散係数を求めた。(6)式で $c_2 D_{i-j} \ll K_i$ とすると以下の(18)式が得られる。

$J_i = \frac{c_2 D_{i-j} P}{RTL\alpha} \ln \frac{1 - \alpha y_i^L}{1 - \alpha y_i^0}$  .....(18)

(18)式よりKundsen拡散を無視した有効拡散係数を求め、反応率0.35, 0.73, 0.91のCCBにおける結果を、Kundsen拡散を考慮した場合の有効拡散係数も合わせてFig. 6に示す。Kundsen拡散を考慮した場合のプロット(△)とKundsen拡散を無視した場合とのプロット(▲)が重なっており、それぞれの場合での有効拡散係数はほぼ一致した。これより、4.1で述べたように、CCBの室温から673Kの範囲でのCO-CO<sub>2</sub>系のガス拡散においては、Kundsen拡散を無視できることが実験結果により確認できた。したがって、CCBのCO-CO<sub>2</sub>系のガス拡散は分子拡散支配であるものと考えられる。

4.4 CCBの反応に伴う有効拡散係数の変化

Fig. 5に示したように、いずれの温度でも反応率の上昇とともに有効拡散係数が増加し、反応率0.91のCCBでは反応率0のCCBにおける有効拡散係数の約7倍となった。これは前節で求めた有効拡散係数と温度の関係式における $T^{1.50}$ の係数が反応率の上昇にともない増加し、約7倍となるためである。

Table 2に反応率0および0.91のCCBと、重野ら<sup>18,24)</sup>が測定した還元鉄や成型コークス、グラファイトでの室温におけるCO-CO<sub>2</sub>系のガス有効拡散係数を合わせて示す。反応率0のCCBでの有効拡散係数は $1.42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、成型コークスの $0.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ およびグラファイトの $0.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ に近い値となっている。一方、反応率0.91のCCBでのガス有効拡散係数は $10.71 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、

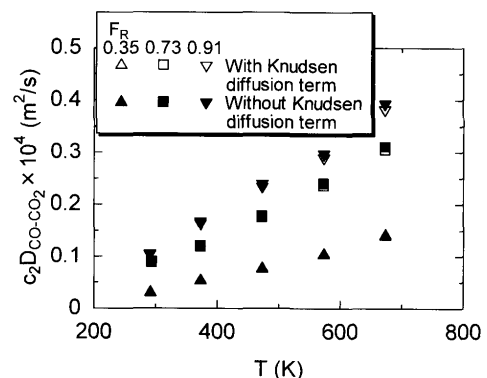


Fig. 6. Effect of Knudsen diffusion on effective diffusivities for CO-CO<sub>2</sub> gas mixture.

Table 2. Effective diffusivity of various porous materials measured at room temperature.

|                                                                | Sample                     |                               |                                 |                       |                         |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                                                                | CCB<br>(F <sub>R</sub> =0) | CCB<br>(F <sub>R</sub> =0.91) | Reduced<br>iron <sup>*18)</sup> | f-coke <sup>24)</sup> | Graphite <sup>24)</sup> |
| Effective diffusivity<br>× 10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s) | 1.42                       | 10.71                         | 4.00                            | 0.13                  | 0.08                    |

\*Reduction temperature:1273K

還元鉄の $4.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ よりも大きな値となっている。CCBのガス有効拡散係数は反応が進行するにつれて、還元反応により鉄鉱石中の酸素が除去され気孔率が増加し、還元鉄の有効拡散係数に近づいていく。また炭材のCO<sub>2</sub>によるガス化反応によって炭材が消費され、さらに気孔率が増加し、気孔径が大きくなる。これによって反応率0.91のCCBでの有効拡散係数は還元鉄のそれより大きくなるものと考えられる。

## 5. 結言

熱間成型法により製造された炭材内装熱間成型ブリケット(CCB)の、室温から673Kの温度範囲におけるCO-CO<sub>2</sub>混合ガスの有効拡散係数をWicke-Kallenbach法により測定し、以下の知見を得た。

(1) CCBの粘性流の係数 $c_0$ とKundsen拡散係数 $c_1$ は温度依存性がほとんどなかった。また、反応率の上昇、つまり気孔率の増加にともない $c_0$ は上昇したが、 $c_1$ はCCBにおいてKundsen拡散が無視できるため反応率の影響はほとんどなかった。

(2) 測定結果より、CCBにおけるCOおよびCO<sub>2</sub>の拡散流束の比の平均値は1.17となり、平方根則より求まる理論値1.25に近い値となった。このことから、CCBでは表面拡散の影響は小さいものと考えられる。

(3) 反応率の上昇にともない炭材のガス化と酸化鉄中の酸素除去により気孔率が増加するため、CCBにおけるCO-CO<sub>2</sub>混合ガスの有効拡散係数は上昇した。また、有効拡散係数は $T^{1.50}$ に比例し、各反応率の有効拡散係数と温度に関して以下に示す関係式が得られた。

$$\text{反応率}0 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 3.19 \times 10^{-10} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{反応率}0.22 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 6.45 \times 10^{-10} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{反応率}0.35 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 7.77 \times 10^{-10} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{反応率}0.57 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 1.01 \times 10^{-9} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{反応率}0.73 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 1.80 \times 10^{-9} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

$$\text{反応率}0.91 : c_2 D_{\text{CO-CO}_2} = 2.28 \times 10^{-9} T^{1.50} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

(4) Kundsen拡散を無視した有効拡散係数とKundsen拡散を考慮した有効拡散係数はほぼ一致したことから、CCBの室温から673Kの範囲でのCO-CO<sub>2</sub>混合ガスのガス

拡散は分子拡散支配である。

## 記号

添字 $i$ はガス成分を表す。

- $c_0$  : 気孔構造因子でDarcyの粘性流れの係数 (m<sup>2</sup>)
- $c_1$  : 気孔構造因子でKundsen拡散の係数 (m)
- $c_2$  : 気孔構造因子で分子拡散の係数 (-)
- $D_{i-j}$  : 2元系( $i-j$ )の自由空間における相互拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)
- $D_C$  : 初期炭素含有率 (-)
- $D_O$  : 初期酸素含有率 (-)
- $F_R$  : 反応率 (-)
- $J_i$  : ガスの拡散流速 (mol/m<sup>2</sup>·s)
- $J_i^{(S)}$  : 表面拡散流速 (mol/m<sup>2</sup>·s)
- $K_i$  : Knudsen拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)
- $L$  : 試料長さ (m)
- $M_i$  : 分子量 (kg/mol)
- $N_i$  : 粘性流と拡散流を合わせた総括の流速 (mol/m<sup>2</sup>·s)
- $P$  : 全圧 (Pa)
- $R$  : 気体定数 (8.314J/mol·K)
- $T$  : 絶対温度 (K)
- $y_i$  : モル分率 (-)
- $\Delta W$  : 重量減少量 (kg)
- $W_0$  : 試料初期重量 (kg)
- $z$  : 距離 (m)
- $\epsilon$  : 気孔率 (-)
- $\tau$  : 迷宮度 (-)
- $\nabla(f) = df/dz$

## 文 献

- 1) H.Tanaka and C.Raggio: Proc. of 3rd Int. Conf. on Science and Technology of Ironmaking, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf, (2003), 295.
- 2) H.Tanaka K.Miyagawa and T.Harada: Proc. of 4th Int. Conf. on Science and Technology of Ironmaking, ISIJ, Tokyo, (2006), 429.
- 3) H.Tanaka, T.Harada and S.Yoshida: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **213** (2006), 27.
- 4) H.Oda, T.Ibaraki and M.Takahashi: *Shinnittesu Giho*, **376** (2002), 28.
- 5) A.Kasai, Y.Matsui, F.Noma, H.Iwakiri and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 313.
- 6) A.Kasai, M.Naito, Y.Matsui and Y.Yamagata: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 1212.
- 7) Y.Matsui, M.Sawayama, A.Kasai, Y.Yamagata and F.Noma: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1904.
- 8) A.Kasai and Y.Mastui: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2073.
- 9) M.Nakano, M.Naito, K.Higuchi and K.Morimoto: *ISIJ Int.*, **44** (2004), 2079.
- 10) Y.Ueki, M.Kanayama, T.Maeda, K.Nishioka and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **93** (2007), 18.
- 11) E.Wicke and R.Kallenbach: *Kolloidn. Zh.*, **17** (1941), 135.
- 12) D.S.Scott and F.A.L.Dullien: *AIChE J.*, **8** (1962), 113.
- 13) R.B.Evans, III, G. M. Watson and E. A. Mason: *J. Chem. Phys.*, **35** (1961), 2076.
- 14) W.G.Pollard and R.D.Present: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 762.
- 15) R.D.Gunn and C.J.King: *AIChE J.*, **15** (1976), 507.
- 16) K.Sakasita, H.Arai and H.Kobayashi: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **31** (1967), 920.
- 17) J.M.Smith: *Chemical Engineering Kinetics*, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, (1970), 423.
- 18) Y.Shigeno, S.Kobayashi, K.Takeda, H.Goto and Y.Omori: *Bull. Res. Inst. Miner. Dressining Metall.*, **39** (1983), 25.
- 19) Y.Shigeno, S.Kobayashi and Y.Omori: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **27** (1987), 169.
- 20) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, (1960), 23.
- 21) Y.Ueki, T.Maeda, M.Shimizu, Y.Matsui and A.Kasai: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 1205.
- 22) 佐藤一雄: 物性定数推算法, 丸善, 東京, (1975), 130.
- 23) E.T.Turkdogan, R.G.Olsson and J.V.Vinters: *Carbon*, **8** (1970), 545.
- 24) Y.Shigeno, S.Kobayashi and Y.Omori: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 453.