

## <報文>1900~2200 における $\text{SiC} + \text{CO} = \text{SiO} + 2\text{C}$ 反応の速度論的研究

著者	井上 博文, 照井 敏勝, 鄭 景瑞, 大森 康男, 大谷 正康
雑誌名	東北大学選鑛製錬研究所彙報 = Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University
巻	43
号	1
ページ	43-52
発行年	1987-09-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/32922">http://hdl.handle.net/10097/32922</a>

# 1900~2200°Cにおける $\text{SiC} + \text{CO} = \text{SiO} + 2\text{C}$

## 反応の速度論的研究

井上 博文\* 照井 敏勝\* 鄭 景瑞\*\*  
大森 康男\* 大谷 正康\*\*\*

SiO Generation Kinetics in the Reaction of SiC with Carbon Monoxide in the Temperature Range 1900 to 2200°C. By Hirobumi INOUE, Toshikatsu TERUI, Jiing-Ruey JENG, Yasuo OMORI and Masayasu OHTANI.

Determination of the rates of reaction between silicon carbide and carbon monoxide is important not only in mathematical models of the blast furnace, specifically associated with silicon transfer to hot metal, but also in the attack of the silicon carbide ceramics by oxidizing atmospheres.

Generation of silicon monoxide during the reaction  $\text{SiC} + \text{CO} = \text{SiO} + 2\text{C}$  was investigated from the kinetic points of view in the temperature range 1900 to 2200°C using a specimen of silicon carbide with the porosity of 42 percent.

The results can be summarized as follows:

- 1) The outer shell of the SiC specimen is covered by porous graphite, forming a reaction zone between the outer graphite and the inner silicon carbide.
- 2) An increase of total pressure does not affect the rate of the reaction of silicon carbide with carbon monoxide.
- 3) The rate of the reaction increases with increasing temperature.
- 4) Assuming that the unreacted core model can be applied to the results obtained, the temperature dependence of the rate parameters were determined to be as follows:

rate constant of chemical reaction

$$k_c = 1.91 \times 10^8 \exp(-90,640/RT)$$

intraparticle diffusion coefficient

$$D_e = 2.43 \times 10^{-8} T^{2.22}$$

(Received June 10, 1987)

**Keywords:** silicon monoxide, silicon carbide, rate of chemical reaction, graphite, carbon monoxide.

### 1. 緒 言

現在では、製鉄—製鋼工程におけるトータルコストの低減を目的として低Si操業が行われ、Si濃度0.2%の溶鉄が安定して供給できる状況になってきている。溶鉄中Si濃度は、高炉下部の熱的状况をあらわす指標として古くから重要視され、高炉操業の管理項目の一つにあげられている。

したがって、高炉の数学モデルには、Siの反応機構を取り込んだトータルモデルを確立することが不可欠であり、そのためにはSiの移行経路を明らかにすることが必要である。

高炉軟化融着帯以下におけるメタルへのSiの移行経路は、SiOを介する説が定説で、発生源はコークス灰分中の $\text{SiO}_2$ やスラグ中の $\text{SiO}_2$ とされており、スラグからのSiO発生については角戸

選鉄製錬研究所報告 第1002号 日本鉄鋼協会第112回講演大会(昭和61年4月)にて発表

\*東北大学選鉄製錬研究所

\*\*東北大学選鉄製錬研究所(現 China Steel Corporation)

\*\*\*東北大学選鉄製錬研究所(現 株式会社 神戸製鋼所)

らをはじめいくつかの報告がみられる<sup>1)~3)</sup>。

Turkdogan ら<sup>4)</sup> は SiC の生成に関し熱力学的考察を行っている。それによれば,  $P_{CO}=1$  atm では  $1537^{\circ}\text{C}$  以上で,  $P_{CO}=4$  atm では  $1671^{\circ}\text{C}$  以上で SiC が安定相として存在しうること, ならびに, SiC が存在する場合には,  $\text{SiC}+\text{CO}=\text{SiO}+2\text{C}$  の反応による SiO 発生の可能性があることを示唆している。

Gill ら<sup>5)</sup> は, 高炉用コークスを  $1450\sim 1600^{\circ}\text{C}$ , Ar 気流中で加熱した実験を行っている。それによれば, 加熱後のコークス中には針状 SiC が確認され, その存在量は灰分中の過剰  $\text{SiO}_2$  量に比例すると述べている。

SiC の生成に関しては, 山縣ら<sup>6)</sup> も同様の研究を行っており, SiC 生成反応を考慮したコークス灰分ガス反応モデルを報告している。

また, 操業中の高炉羽口から採取したコークスの調査結果<sup>7)~9)</sup> においても, コークス中に SiC の存在が確認されている。

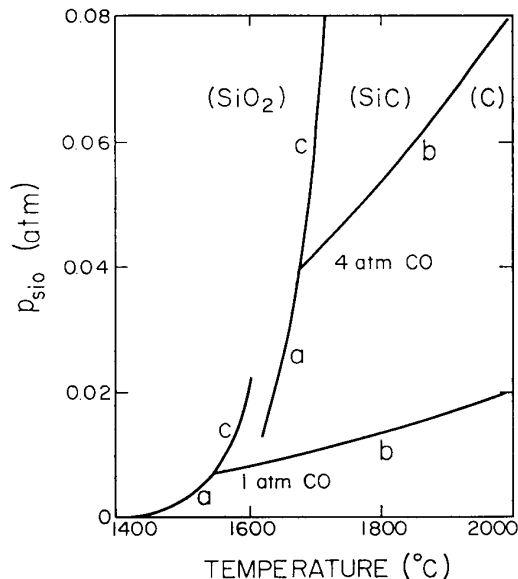
しかし,  $P-T$  状態図 (Fig. 1) から明らかのように, SiC の存在は, SiO 分圧に依存し, 局部的に高い SiO 分圧 ( $P_{CO}=1$  atm の場合,  $P_{\text{SiO}}\geq 0.01$  atm) では, SiC は安定に存在しうが,

SiO 分圧が低く, しかも高温の条件下では一度生成した SiC が CO と反応し, SiO を発生することが推測される。

SiC 経路による SiO 発生に関する速度論的研究は非常に少なく, 縫部ら<sup>10)</sup> による研究があるにすぎない。それによれば, SiO の発生源に SiC を用い, 炭素飽和溶融鉄中へ SiO ガスを吸収させ, その間の Si の移動に対し, 速度論的立場から定量的解析を試み反応速度定数および拡散係数などを求めその速度式で  $1450\sim 1600^{\circ}\text{C}$  の実験結果をよく説明できることを示している。

本研究は高炉の Total model に Si の移行速度を取り込むため, レースウェイ近傍の高温領域における SiO の反応を対象とし, つぎの一連の研究

- 1)  $\text{SiC}(\text{s})+\text{CO}(\text{g})\rightarrow\text{SiO}(\text{g})+2\text{C}(\text{s})$  の反応による SiO 発生に関する反応速度定数, 拡散係数などの測定
- 2)  $1900^{\circ}\text{C}$  以上の高温における熱力学デー



**Fig. 1** Partial pressures of SiO for univariant equilibria at 1 and 4 atm CO and for  $a_{\text{SiO}_2}=0.5$ ,  $a_{\text{C}}=1$ , and  $a_{\text{SiC}}=1$ <sup>4)</sup>.

- a)  $\text{SiO}_2+\text{C}=\text{SiO}+\text{CO}$
- b)  $\text{SiC}+\text{CO}=\text{SiO}+2\text{C}$
- c)  $2\text{SiO}_2+\text{SiC}=3\text{SiO}+\text{CO}$

- 1) 角戸三雄, 槌谷陽男, 岡部狭児: 学振54委(反速)-99 (1980), -106 (1981).
- 2) 海老沢幸弘, 徳田昌則, 大谷正康: 高炉内現象とその解析(昭和57年), 日本鉄鋼協会.
- 3) 柳沼 寛, 井上博文, 大谷正康: 選研彙, 42 (1986), 17.
- 4) Turkdogan, E. T.; Kor, G. J. W.; Fruehan, R. J.: *Ironmaking and Steelmaking*, 7 (1980), 268.
- 5) Gill, W. W.; Dubrawski, J. V.: *Ironmaking and Steelmaking*, 11 (1984), 181.
- 6) 川縣千里, 梶原義雅, 須山真一: 鉄と鋼, 73 (1987), 637.
- 7) Bagnall, E. J.; Hart, A. T.: *Coal, coke, and the blast furnace* (1978), P.36, The Metal Society (London).
- 8) Gill, W. W.; Coin, C. D. A.: *Proc. Int. Blast Furnace Hearth and Raceway Symp.*, Newcastle, NSW, (1981) Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 21. 1.
- 9) Dubrawski, J. V.; Gill, W. W.: *Ironmaking and Steelmaking*, 11 (1984), 7.
- 10) 縫部 綴, 佐野信雄, 松下幸雄: 鉄と鋼, 73 (1987), 637.

### タの確立

3) 高圧下でのSiC+CO→SiO+2Cの反応速度の測定を行う。

本報告では、1900~2200°Cの高温における実験方法の確立とそれを用いて、SiC+CO→SiO+2Cの反応の速度パラメータの測定に関し、中間的ではあるが、二、三の知見を得たので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験装置の概略図をFig.2を示す。炉は黒鉛発熱体を用いたタンマンタイプで、4 atmまでの高圧下で2400°Cまでの昇温が可能である。反応管には緻密な黒鉛を用い、高温下でのガスもれは1%以内であった。反応速度は試料の重量減少測定により求めた。SiCの試料は同図にみられるごとく黒鉛ホルダー中に固定した。測温はW-Re熱電対により補正した二色光高温計を用い、試料表面を±10°Cの精度の範囲で測温した。反応ガスは反応管上部より導入した。反応により発生したSiOガスが冷却することによって白煙となるため、測温に支障のないように反応ガスは反応管上部より導入した。反応管内径は12 mmφである。

### 2.2 SiC試料

実験に用いたSiCは重さ0.2250±0.0005 g、一辺が0.50 cmの高純度SiC立方体（IBIDEN製、気孔率42.2%）である。試料中の不純物は0.1%以内である。

### 2.3 実験操作

反応管内に、Arガスを導入し、十分に置換したのち、できるだけ早く所定の温度1900~2200°Cに昇温し、反応ガスに切り換える。反応後は炉の電源を切り、Arガスに切り換えて30 minで室温まで下げる。1600から2200°Cまでの昇温時間は2 min以内、2200から1600°Cまでの冷却時間は1 min以内である。取り出した試料を天秤で秤量した後、同一の試料を用い再び同操作を行った。試料の重量変化より、後述する(2)式により反応率を求めた。試料の昇温および降温速度は速く、その間の重量変化はみられず反応量は無視しうる。

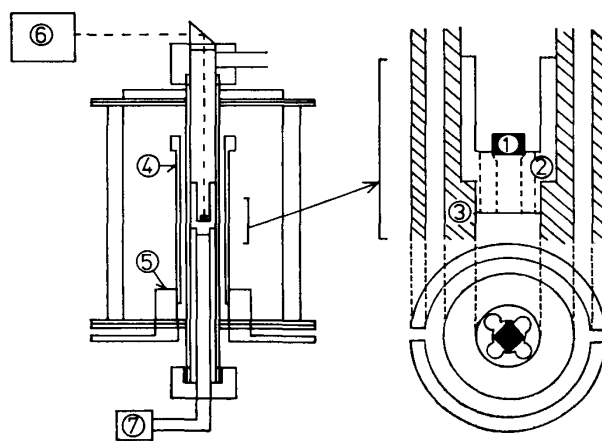


Fig. 2 Experimental apparatus.

- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| ① SiC sample      | ⑤ Copper electrode  |
| ② Sample holder   | ⑥ Optical pyrometer |
| ③ Graphite tube   | ⑦ Gas inlet         |
| ④ Graphite heater |                     |

## 3. 実験結果

### 3.1 SiCとCOの反応速度におよぼすCOガス流速の影響

SiC試料を $P_{CO}=1$  atmで、ガスの線速度26.7 cm/sec (0.25 Nl/min, 1900°C)~61.2 cm/sec (0.50 Nl/min, 2200°C)まで変化させた場合、反応率の時間変化におよぼすガス流速の影響をFig.3に示す。ここで、 $R$ は試料の重量減少を、(1)式の反応、



にもとづく当量関係を用いて SiC の減少率に換算した値であり, 反応前後の試料重量をそれぞれ,  $W_0$ ,  $W$  とすれば  $R$  は (2) 式であらわされる.

$$R = (40/16) \cdot (W_0 - W) / W_0 \quad (2)$$

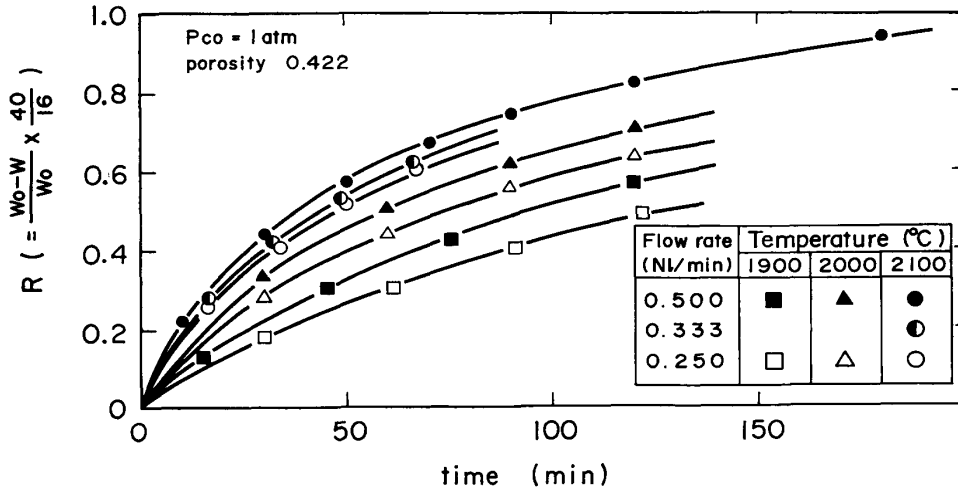


Fig. 3 Effect of gas flow rate on the reaction of SiC with carbon monoxide at various temperatures.

同図にみられるようにガス流速の影響が大きくあらわれているが, 装置の制約上さらに多量の CO ガスを流すことはできないため, 反応速度の解析にあたってはガス流量の影響を考慮した.

### 3. 2 SiC の反応速度におよぼす温度および全圧の影響

$P_{\text{CO}}=1$  atm, CO 流量 0.5 NL/min, 1900~2200°C における反応率  $R$  の時間変化を Fig. 4 に示す.

同図より温度上昇とともに反応速度は速くなるが, 2200°C においては 100 分後に 100% を超える反応率を示している. これは反応過程で SiC の昇華に起因するものと考えられる. また, 反応率におよぼす全圧の影響を調べるため,  $P_{\text{CO}}=3$  atm, 2100°C における実験を行った. 結果を Fig. 4 に◎印で示した.

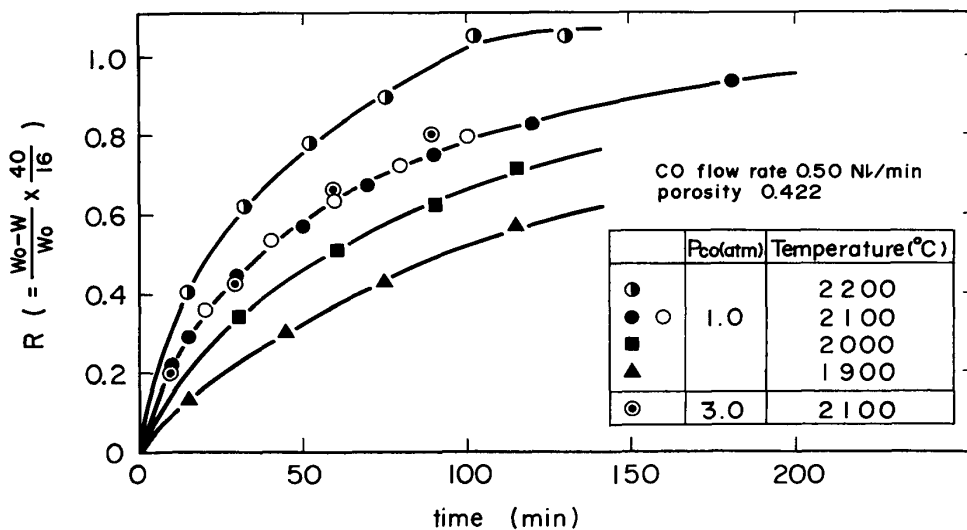
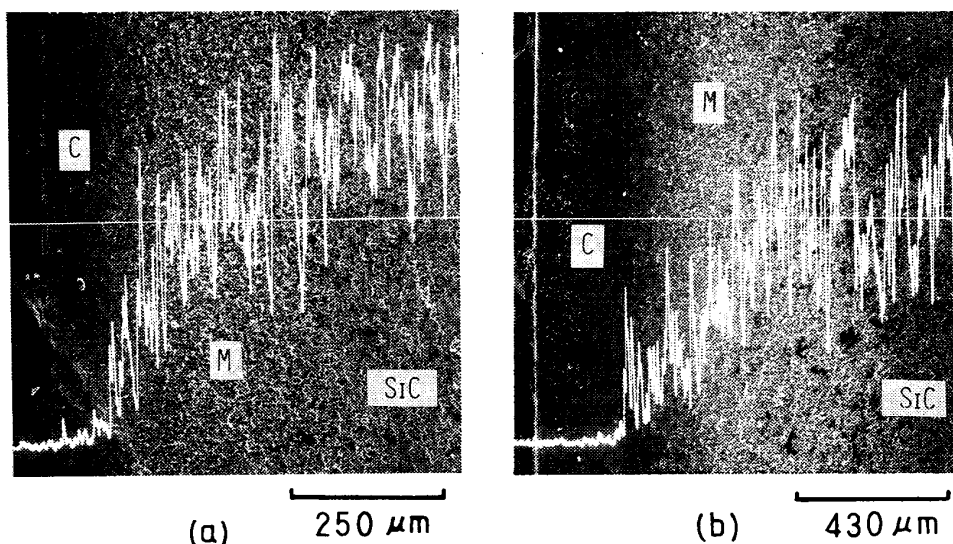


Fig. 4 Typical curves of the reaction by carbon monoxide at various temperatures.

後述する(3)式の反応速度は全圧 $P$ に比例して増大することが期待される。しかし、 $P_{CO}=3$  atmにおける反応率の時間変化は、 $P_{CO}=1$  atmの場合とほぼ同じであった。

### 3.3 試料断面のEPMAによる観察

反応率の異なる2種類の試料断面のSi K $\alpha$ 像ならびに線分析結果をPhoto.1ならびにFig.5に示す。 $R=0.795$ の試料についてみれば、既反応層(C層)、反応帯(CとSiCとの混合層—M層)および未反応層(SiC層)より成り、反応帯中のSi K $\alpha$ 強度は大略直線的に変化しており、



**Photo. 1** Linear analysis of Si K $\alpha$  by EPMA in the cross section of partially reacted SiC samples at 2100°C and  $P_{CO}=1$  atm. (a)  $R=0.396$  (b)  $R=0.795$   
 C: Graphite layer M: C+SiC

反応帯は反応の進行とともに広がりをもっている。

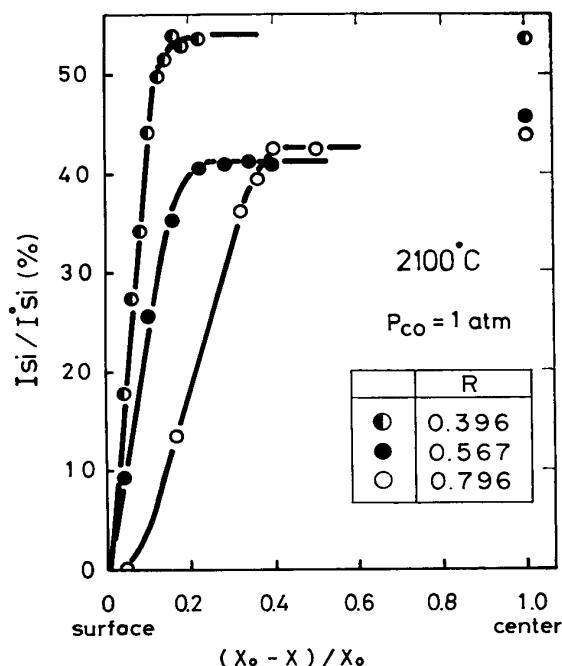
また、反応途中の試料寸法を測定したが、反応前に比べてほとんど変化しなかった。

## 4. 考 察

Photo. 1 および Fig. 5 の結果から反応層を考慮した中間モデルならびに蒸発を考慮した反応機構による解析を行うべきであるが、蒸発量の正確な測定と蒸発現象の解明ならびに中間モデルと未反応核モデルとの関係については今後検討することとし、ここでは、未反応核モデルによる解析結果について述べる。

### 4.1 総括反応速度

反応がトポケミカルに定常状態で進行していると仮定すると、化学反応、粒子内拡散、境界膜内拡散の抵抗および反応によって生成するガスの希釈効果も考慮した速度式は(3)式であたえられる。



**Fig. 5** Distribution of SiC concentration in the reacted SiC samples.

$$\begin{aligned}
 \dot{N} &= -24x^2 \cdot d_0 \cdot \left( \frac{dx}{dt} \right) \\
 &= 24x_0^3 \cdot d_0 \cdot (1-f)^2 \left( \frac{df}{dt} \right) \\
 &= \frac{24x_0^2 \cdot (C_{CO}^{(b)} - C_{CO}^{(e)})}{\left( \frac{x_0}{x} \right)^2 \cdot \frac{1}{k_c} \cdot \frac{K}{1+K} + \frac{x_0(x_0-x)}{x} \cdot \frac{1}{D_e} + \frac{1}{k_f} + \frac{24x_0^2}{Q}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

ただし, 生成ガスの希釈効果は, Clair<sup>11)</sup> のモデルに準じてガス境膜の外側では SiO 濃度が均一であると仮定した。(3) 式を積分すると (4) 式が得られる。

$$\begin{aligned}
 &\frac{C_{CO}^{(b)} - C_{CO}^{(e)}}{d_0 \cdot x_0} \cdot t - \frac{1}{3} \cdot \frac{(3f - 3f^2 + f^3)}{k_f} \\
 &= \frac{1}{k_c} \cdot \frac{K}{1+K} \cdot f + \frac{x_0(3f^2 - 2f^3)}{6D_e} + \frac{1}{3} \cdot \frac{24x_0^2(3f - 3f^2 + f^3)}{Q} \quad (4)
 \end{aligned}$$

ここで, 未反応核の長さを  $2x$ , 生成物層の相対厚さを  $f$  とすると, これらと  $R$  との間には (5) 式の関係がある。

$$\begin{aligned}
 f &= (x_0 - x) / x_0 \\
 &= 1 - (1 - R)^{1/3} \quad (5)
 \end{aligned}$$

各  $f$  に対して (4) 式の左辺と  $1/Q$  の関係をプロットし,  $Q \rightarrow \infty$  のときの値 (切片) が, ガス流速の影響を除いた速度定数と粒子内拡散係数に関する値を与える。この値から通常解析法に従って反応速度定数と粒子内有効拡散係数の値をもとめた。

#### 4. 2 境膜内物質移動係数の推定

境膜内物質移動係数  $k_f$  は (6) 式の Ranz-Marshall の式<sup>12)</sup>により推定した。使用したパラメータは一括して Table 1 に示す。

**Table 1** Calculated values of mass transfer coefficient through gaseous film  $k_f$ ,  $D_{SiO-CO}$ ,  $Re$  and  $Sc$  at various temperatures and flow rate of carbon monoxide.

$T(K)$	$V(Nl/min)$	$P_{CO}(atm)$	$D_{SiO-CO}(cm^2/sec)$	$Re(-)$	$Sc(-)$	$k_f(cm/sec)$
2173	0.500	1	7.21* <sup>1</sup> , 8.39* <sup>2</sup>	8.5	0.61	36.3
2273	0.500	1	8.37* <sup>1</sup> , 8.97* <sup>2</sup>	8.3	0.56	41.5
2373	0.500	1	9.65* <sup>1</sup> , 9.58* <sup>2</sup>	8.1	0.52	47.1
2373	0.333	1	9.65* <sup>1</sup> , 9.58* <sup>2</sup>	5.4	0.52	43.6
2373	0.250	1	9.65* <sup>1</sup> , 9.58* <sup>2</sup>	4.0	0.52	41.5
2473	0.500	1	11.69* <sup>1</sup> , 10.55* <sup>2</sup>	7.8	0.49	53.2

\*1: estimated from equation proposed by Nuiibe et al<sup>10)</sup>.

\*2: estimated values

11) Clair, H. W. St. : Trans. Met. Soc. AIME., 233 (1965), 1145.

12) Ranz, V. E. ; Marshall, W. R. : Chem. Eng. Prog., 43 (1952), 141.

$$Sh = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (6)$$

(6)式において、SiO-COの拡散係数については縫部らの実測値にもとづいた温度依存式から求めた値<sup>10)</sup>を採用した(Table 1)。なお、SiおよびOのイオン半径をそれぞれ3.39Å、1.32Åとし、SiOの沸点 $T_b = 2153\text{ K}$ <sup>13)</sup>を用いて、Lennard-Jonesパラメータ $\sigma_{SiO}$ <sup>14)</sup>、 $\epsilon/K = 2/3 T_b$ よりBirdsの式<sup>14)</sup>を用いて推定した $D_{SiO-CO}$ の値はTable 1に\*2として示した。両者の値は、ほぼ一致している。混合気体の粘性についてはBirdらの式<sup>14)</sup>を用いて計算した各成分ガスの粘性を用いてWilkeの式<sup>16)</sup>により求めた。また、粒子径は、立方体を球形とみなし、Satterfieldの概念にもとづいた面積相当径 $d_p = (6x_0/\pi)^{1/2}$ を採用した<sup>17)</sup>。

SiO(g)の熱力学データ $G^0_{SiO*}$ が2000Kまでしか得られないため、比較的直線性が良い1500~2000Kまでの値<sup>18)</sup>を2500Kまで外挿することにより、(1)式の高温における $\Delta G^0$ として(7)式を求めた。

$$\Delta G^0 = 14,700 + 1.95 T \quad (7)$$

### 4.3 速度定数の決定

Fig.3の曲線より $R = 0.2 \sim 0.6$ の反応率に対して(4)式の左辺と $1/Q$ との関係をプロットしたのが、Fig.6およびFig.7である。同図の切片の $1/f$ と $(3f - 2f^2)$ との関係をプロットするとFig.8が得られる。1900~2200°Cにおいては、良い直線関係が得られ、切片から $k_c$ 、勾配から $De$ が求められる。2200°Cでは良い直線関係が得られるが切片は負の値を与えることから、蒸発の影響が顕著にあらわれているものと考えられる。 $k_c$ の温度依存性をFig.9に示す。 $k_c$ の温度依

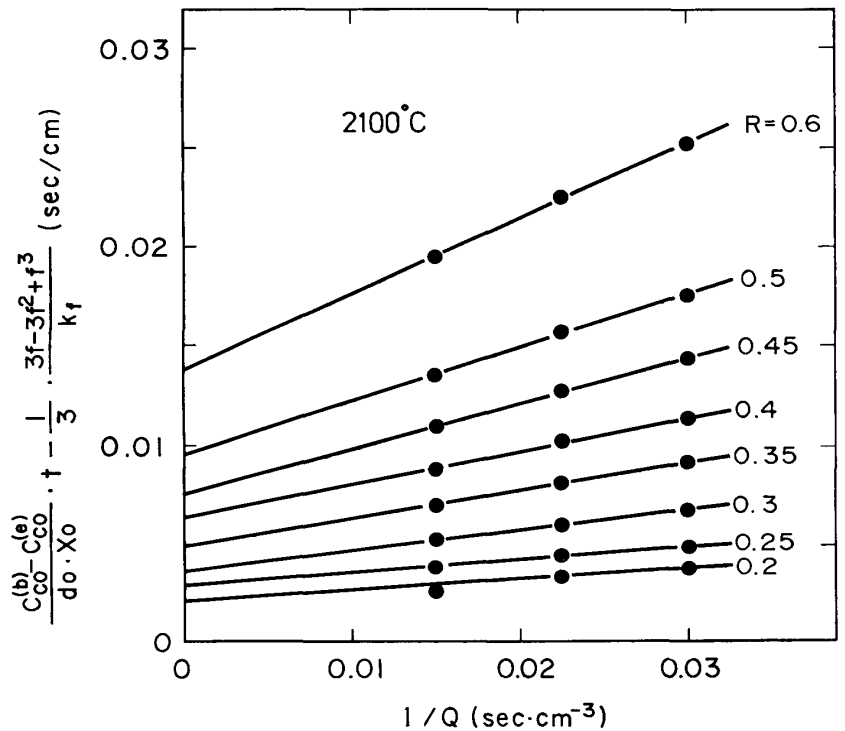


Fig.6 Plots of L. H. S. of Eq. (4) at various fractional reactions at 2100°C against the reciprocal of gas flow rate  $1/Q$ .

\* $G^0_{SiO}$ : JANAF Thermochemical Tables, U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards/Institute of Applied Technology, June 1971, Supplements 1974, 1975.

13) 日本化学便覧: 丸善 (1984).

14) Moelwyn-Hughes, E. A.: Physical Chemistry (1961), Pergamon Press.

15) Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N.: Transport Phenomena, (1960) John Wiley and Sons.

16) Wilke, C. R.: J. Chem. Eng. Phys., 18 (1950), 517.

17) Gokarn, A. N.; Doraiswamy, L. K.: Chem. Eng. Sci., 3 (1973), 401.

18) Barin, I.; Knacke, O.: Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Springer Verlag Berlin and New York (1973).



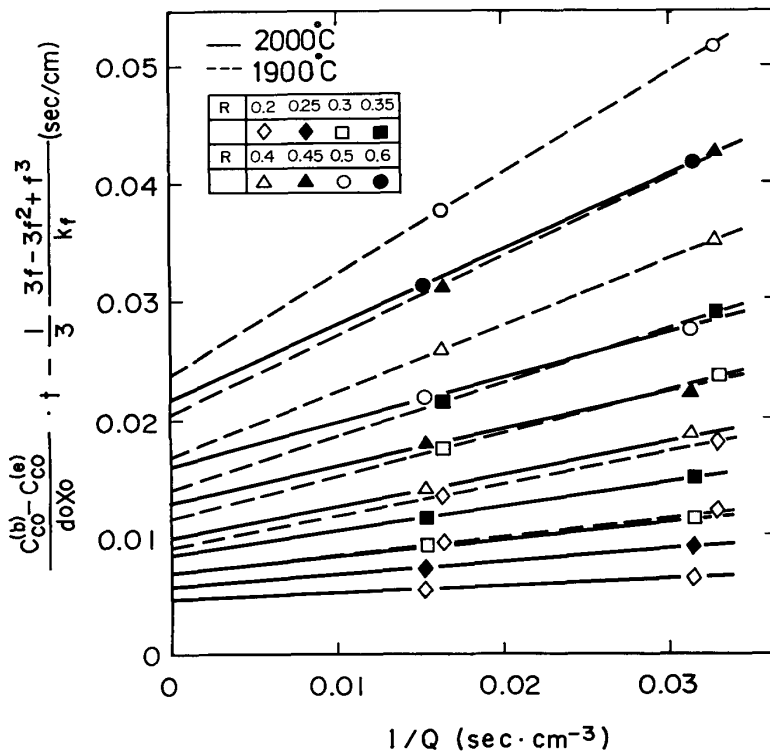


Fig.7 Plots of L. H. S. of Eq. (4) at various fractional reactions and temperatures against the reciprocal of gas flow rate, 1/Q.

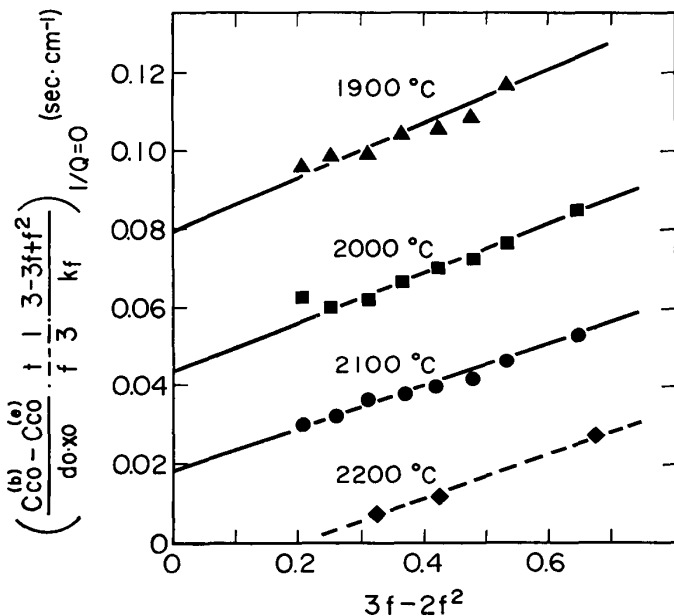


Fig.8 Plots of L. H. S. of Eq. (4) in 1/Q=0 divided by f against 3f-2f² at various temperatures for determination of kc and De.

存性として, (8) 式を得た.

$$k_c = 1.91 \times 10^8 \exp(-90,640/RT) \quad (8)$$

一方, 同図に示すように本実験結果は縫部らの実測値からの外挿値の大略 1/100 の値である. 縫部らの外挿値と本測定値が大きく異なる理由は明らかではないが, 縫部らの値は 1450~1600°C の比較的低温から 1900~2100°C の高温まで外挿した値であり, しかも, 彼らの測定値はかなりの誤差をとまっているため, 検討の余地があると思われる. 一般に, SiC は 2200°C から昇華ははじまる<sup>19)</sup>.

本実験は 1900~2200°C の高温であり, 1900~2100°C における本測定結果には, 昇華の影響は大きくないものと推察される. もし, 影響があるとすれば, 反応率 R から計算した f は実際の値より高い値を与えることになり最終的に計算される昇華がないときの kc の値は Fig.9 の値より低い値となることが推測される.

#### 4.4 粒子内拡散係数の決定

Fig.10 に De と温度の関係を示す. De の温度依存式として (9) 式が得られる.

$$De = 2.43 \times 10^{-8} T^{2.22} \quad (9)$$

縫部らの報告によるとガス相中の SiO の拡散係数 D<sub>SiO</sub> は T<sup>3.31</sup> に比例する. しかし, Turkdogan ら<sup>20)</sup> の実測した黒鉛の CO-CO<sub>2</sub> 系および H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系ガスの有効拡散係数によると, ガスの有効拡散係数は T<sup>1.5</sup> に比例する.

また, 重野ら<sup>21)</sup> は, Wicke-Kallen-

19) 理化学辞典 (1986) 岩波書店.

20) Turkdogan, E. T.; Olsson, R. G.; Vinters, J. V.; Carbon, 8 (1970), 545.

21) 重野芳人, 小林三郎, 大森康男: 鉄と鋼, 73 (1987), 453.

bach 法により黒鉛中の CO-CO<sub>2</sub> の有効拡散係数を測定しており、Knudsen 拡散を考慮した場合のガスの有効拡散係数の値は  $T^{1.6}$  に比例すると報告している。

本測定では SiO-CO 系ガスの有効拡散係数は  $T^{2.22}$  に比例し、測定誤差を考慮しても他者の温度依存性より大きく、その違いを説明することはできない。

この原因が蒸発の影響によるものか未反応核モデルの適用に問題があるのかは、明らかではない。

### 5. 結 言

1900~2200°C の高温領域で、SiC と CO との反応により生成する SiO の反応速度に関する研究を行った結果、つぎの知見が得られた。

- 1) 試料の最外殻は黒鉛層で覆われ、その内部は反応帯を形成しながら反応が進行する。
- 2) 全圧を変化させた場合、(1) 式の反応速度におよぼす全圧の影響はみられなかった。
- 3) 反応速度は温度の増大とともに増大する。
- 4) 反応がトポケミカルに進行すると仮定し、未反応核モデルを仮定して解析した結果、1900~2200°C において反応速度定数の温度関数として

$$k_c = 1.91 \times 10^8 \exp(-90,640/RT)$$

粒子内拡散係数の温度関数として

$$De = 2.43 \times 10^{-8} T^{2.22}$$

が得られた。

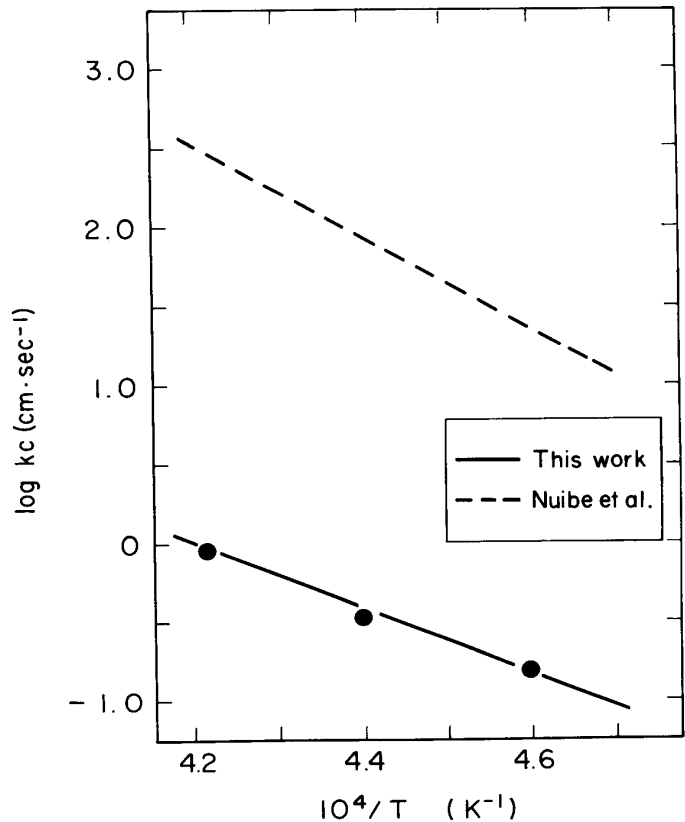


Fig.9 Temperature dependence of the chemical reaction constant  $k_c$ .

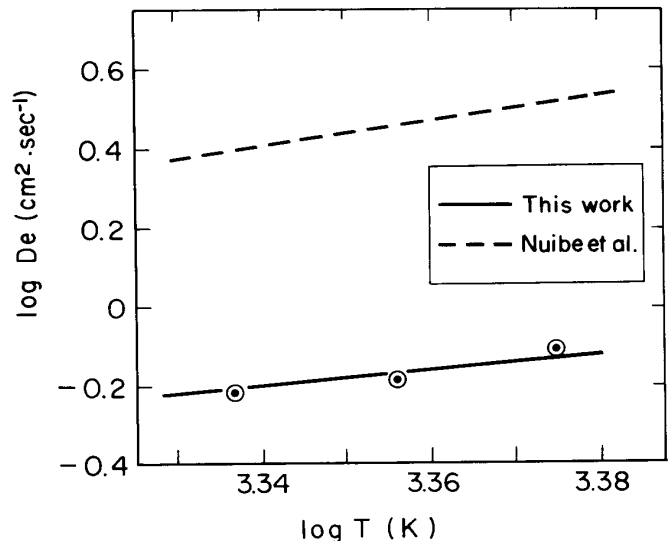


Fig.10 Temperature dependence of diffusivity  $De$ .

今後の検討課題としては,

- 1) 中間モデルあるいは Grain モデルによる解析
- 2) SiC の蒸発速度の測定
- 3)  $\text{SiO} + 2\text{C} = \text{SiC} + \text{CO}$  の反応速度の測定

があげられる。

### 記 号 表

$C_{\text{CO}}^{(b)}, C_{\text{CO}}^{(e)}$	: 相本体および平衡における CO 濃度 (mole/cm <sup>3</sup> )
$d_0$	: SiC のモル密度 (g mol SiC/cm <sup>3</sup> )
$De$	: 粒子内拡散係数 (cm <sup>2</sup> /sec)
$D_{\text{SiO-CO}}$	: SiO-CO の相互拡散係数 (cm <sup>2</sup> /sec)
$f$	: 反応相の相対厚さ (—)
$k_f$	: 境膜内物質移動係数 (cm/sec)
$k_c$	: 反応速度定数 (cm/sec)
$K$	: (1) 式の平衡定数
$Q$	: CO のガス流量 (cm <sup>3</sup> /sec)
$R$	: 反応率 (—)
$Re$	: レイノルズ数 (—)
$Sc$	: シュミット数 (—)
$Sh$	: シャーウッド数 (—)
$2x, 2x_0$	: 反応界面および試料の長さ (cm)