

## 鑄鋼用珪石の熱傳導度について

(昭和 27 年 11 月本会講演大会にて講演)

三ヶ島 秀 雄\*・中 尾 善 信\*\*

A STUDY ON THERMAL CONDUCTIVITY OF  
THE SILICA SAND FOR STEEL CASTING

Hideo Mikashima Dr. Eng., and Yoshinobu Nakao

## Synopsis:

To study thermal properties of molding sand for steel castings, the following experiments and calculations were performed. The thermal conductivities of silica sand of various grain sizes and apparent densities were measured at various temperatures up to 1000°C. Assuming a sand grain to be a cube having a projection part, a formula was gained which represented an apparent thermal conductivity of silica sand and contains terms of grain size, temperature and apparent density as variables. This formula, also, contained the 'contact factor', that had to be assumed as to make proximate the calculated value to the measured one. The contact factor seemed to increase at a high temperature, and perhaps it was due to the partial sintering of sand. The thermal conductivities up to 1400°C were calculated by a formula.

## I. 緒 言

鑄鋼の諸性質は精煉法、鑄造条件、鑄物砂の性質等により支配されることは明かであるが、鑄鋼の性質と之等諸条件との定量的関係は充分研究されていない。特に鑄鋼は鑄造温度も高く、使用する珪砂の熱的性質は鑄鋼の性質を直接左右することが大と考えられるが、未だ砂の高温性質に関しては不明の点が多い。本研究は鑄鋼用原料珪砂の熱的性質のうちその熱伝導度を 1000°C 以下の各温度に於て粒度、見掛比重を変えて測定した。次いで珪砂中に於ける熱の移動過程を伝導、輻射の組合せによるものとし、砂粒の形状を突出部を有する立方体と仮定し砂粒の大きさ、見掛比重を変数とし砂同志の接触係数を仮定し見掛熱伝導度を表わす式を誘導して実験の結果と比較検討した。又実際の鑄造の際に於ける高温の熱伝導度を上式から計算により求めた。

## II. 實 験 方 法

円筒の中心軸の位置に熱源を置き一定の熱量を発生させ、円筒周辺から熱を放散させて定常状態に達すると円筒内の温度分布は一定となる。それで中心から  $r_1, r_2$  の位置に於ける温度を  $\theta_1, \theta_2$  とすればその円筒を構成する物質の熱伝導度  $\lambda$  を求めることが出来る。棒状又は線状の発熱体を電流で加熱する時、 $\lambda$  は (1) 式によりあ

らわさる<sup>1)</sup>。

$$\lambda = 0.3152 \frac{EI \log r_1/r_2}{l (\theta_1 - \theta_2)} [Kcal/mhr^\circ C] \dots\dots (1)$$

但し  $I$ : 電流 [amp],  $E$ : 長さ  $l$  [m] の発熱体の両端の電位差 [volt]

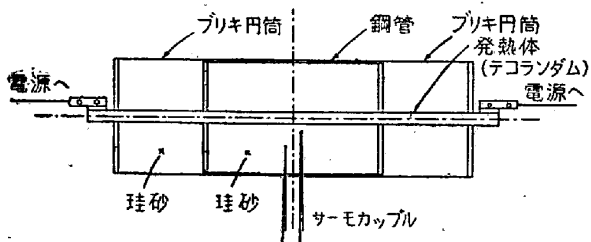
本研究では 200°C 以下の実験にはブリキ製円筒 (8 cmφ×12cm) の中心軸の位置に発熱体として石英細管中にニクロム線を入れたものを用い、この円筒内に 14-200 Mesh の珪砂を篩別したものを入れた。見掛比重は 1.1~1.4 内にて一定になる様つき固め方を変えた。温度は中心より 1cm の位置及円筒側面のブリキの温度をアルメル・クロメルのサーモカップル及ガルバノメーターにより測定した。実験装置全体をボール紙二重壁製の内容積約 8m<sup>3</sup> の恒温室に入れた。定常状態に達するのに 6~8hr かり電流を一定にするためにはモーターゼネレーターと蓄電池を併列に使用した。

200~1000°C の高温の実験には直径 8mm のテコランダム (炭化珪素の一種) を発熱体とし円筒は肉厚 1mm の鋼管 (8cmφ×12cm) の両端に 6cmφ×12cm のブリキ円筒を接続し中に珪砂を入れた。温度は中心から 15mm, 25mm の二点についてサーモカップル、ミリボル

\* 九州工業大學教授 工博。

\*\* 同 助教授 工。

トメーターにより測定した。第1図に装置の略図を示す。



第 1 圖

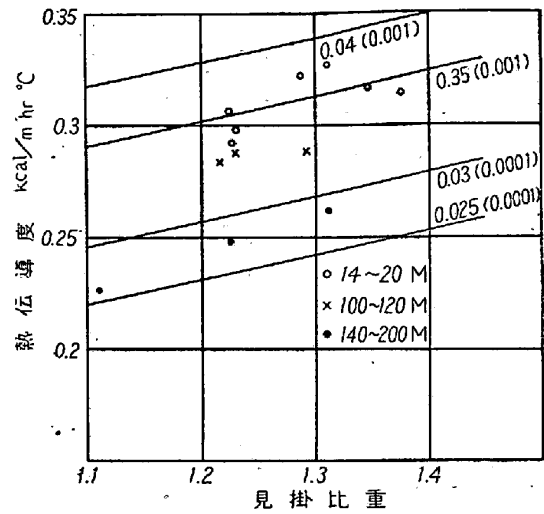
本研究に使用した珪砂は石見益田人造珪砂特4号を篩別したもので化学組成は第1表に示す通りである。

第 1 表

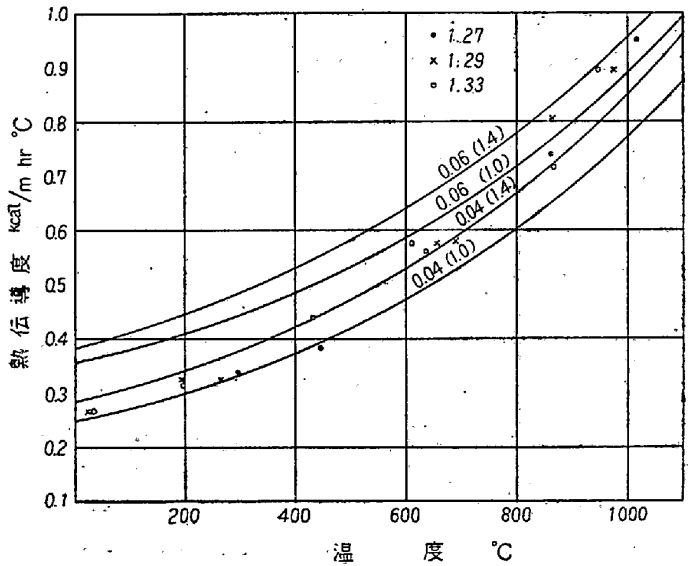
SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Ig. loss
96.2	2.15	0.25	0.74	tr	tr

### III. 実験結果

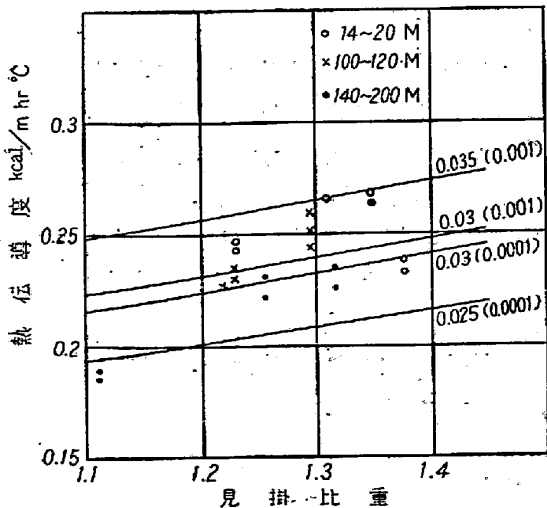
30°C 附近, 200°C 附近に於ける熱伝導度の測定結果をそれぞれ第 2, 3 図に示し, 又 14~20Mesh, 140~200Mesh の砂の 200~1000°C に於ける熱伝導度の測定結果を第 4, 5 図に示す。第 2, 3 図に示す様に常温及び 200°C 附近に於ては砂粒の大きい程, 又見掛比重の大きい程熱伝導度は大であるが砂粒の大きいものでは見掛比重 1.3 以上となると熱伝導度は稍小となる。又第 4, 5 図に示す様に 200~1000°C に於ては砂粒の大きいものの熱伝導度は温度上昇と共に急激に大となるが小さいものは上昇が急激ではない。尚図中の線は計算により求めた値で之等は後に説明する。



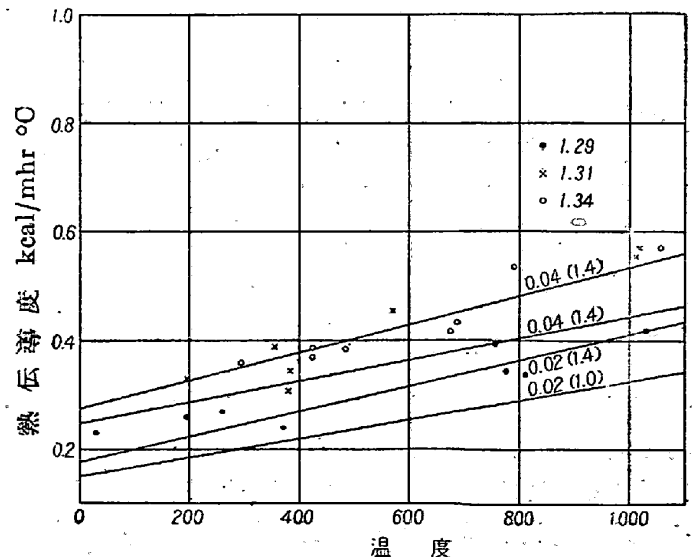
第 3 圖



第 4 圖



第 2 圖



第 5 圖

IV. 珪砂中に於ける熱の移動過程の考察

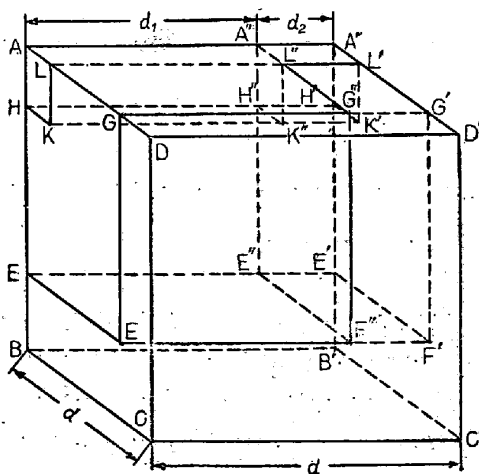
上述の実験結果により熱伝導度は見掛比重、粒度、温度により変ることは明かである。従つてこの三つを変数として熱伝導度を数式によりあらわすことが出来ると考えられる。熱の移動は伝導、輻射、対流の組合せにより行われるが、本実験に使用した程度の粒度、見掛比重（気孔率）であれば対流は一応無視出来るものと考えた。次に砂粒の直径だけへだつた二平面A, Bを考え熱はこの面に垂直に移動するが、之は伝導、輻射の組合せで次の過程によるものとした。

- (1) 砂粒中を伝導によりA面よりB面に移動する。
  - (2) 砂粒中を伝導により移動し、次いで空気中を伝導及び輻射により移動する。
  - (3) 空気中を伝導及び輻射により移動する。
- 以上の合計が総移動熱量となる。

この様に考えるためには砂の形を凸出部を有する立方体と仮定すると解析が比較的容易である。尚 Schwartz<sup>2)</sup>は砂粒を球状と仮定し輻射及び砂粒の大きさを変数として見掛熱伝導度をあらわす式を發表しているが之では充分でないとする。

V. 砂粒接觸係數

砂粒の形状は不規則であるが前記のように突出部を有する立方体と仮定すればその寸法が第6図の様に定められる。



第 6 圖

砂粒は A'' L'' K'' H'' A' L' K' H' なる突出部を有する立方体 A E F G A' E' F' G' とし A' L' K' H' の部分は隣接砂粒と接触しているものとする。この砂粒の存在する、空気を含んだ単位胞 A B C D A'

B' C' D' は立方体でその一稜は砂粒の mesh 數に相当する篩目の開き [m] とする。

- 面積 A = ABCD = d<sup>2</sup>
- " A<sub>1</sub> = AHKL
- " A<sub>2</sub> = HEFGLK
- " A<sub>3</sub> = EBCDGF E とすれば

$$A = A_1 + A_2 + A_3$$

$$\frac{A_1}{A} = \alpha_1, \frac{A_2}{A} = \alpha_2, \frac{A_3}{A} = \alpha_3 \text{ とすれば}$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \dots\dots\dots(2)$$

このようにして  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  をきめ、 $\alpha_1$  を特に接觸係數と呼ぶことにする。尚砂粒の立方体の部分の1稜の長さを  $d_1$  とし、單位胞中の空気の部分の厚さを  $d_2$  とすれば

$$d = d_1 + d_2$$

$$\frac{d_1}{d} = \beta_1, \frac{d_2}{d} = \beta_2 \text{ とすれば}$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{砂粒の体積 } S = A_1 d + A_2 d_1$$

$$\text{空間の容積 } V = d^3 - S = d^3 - (A_1 d + A_2 d_1)$$

$$\text{砂の真比重 } \delta_s, \text{ 砂の見掛比重: } \delta \text{ とすれば}$$

$$\delta = \frac{A_1 d + A_2 d_1}{d^3} \delta_s$$

$$\frac{\delta}{\delta_s} = \rho = \alpha_1 + (\beta_1^2 - \alpha_1) \beta_1$$

$$\text{故に, } \beta_1^3 - \alpha_1 \beta_1 + \alpha_1 - \rho = 0 \dots\dots\dots(4)$$

(4) 式中見掛比重と真比重の比  $\rho$  は測定によりわかるから  $\alpha_1$  を仮定すればこの三次方程式は容易に解くことが出来  $\beta_1$  がわかる。尚

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \beta_1^2$$

この関係と (2), (3) 式より  $\alpha_2, \alpha_3, \beta_2$  がわかり結局突出部を有する立方体の各寸法がわかる。

VI. 見掛熱傳導度をあらわす式の誘導

第6図に於て A B C D, A' B' C' D' をそれぞれ IV にて述べた A 面, B 面とし, A 面の温度を  $\theta_1$  °K, B 面の温度を  $\theta_3$  °K, 見掛熱伝導度  $\lambda$ , 單位時間に C 面より B 面に流れる熱量を Q とすれば

$$Q = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_3}{d} A$$

珪石中の伝導のみで移動する熱量  $Q_1$ , 珪石の真の熱伝導度  $\lambda_s$  とすれば

$$Q_1 = \lambda_s \frac{\theta_1 - \theta_3}{d} A_1$$

A 面より C 面 (H'' E' F' G' L' K'') 迄珪石中の伝

導により移動する熱量  $Q_2$ , 次いで C 面より B 面へ空气中を伝導により移動する熱量  $Q_{21}$ , C 面より B 面へ輻射により移動する熱量  $Q_{22}$ , 空気の熱伝導度  $\lambda_a$ , 輻射恒数  $Cb$ ,  $C = Cb \times 4/100$  C 面の温度  $\theta_2^\circ K$ , とし  $\theta_2 = \theta_3 = \theta_3$  とすれば次の諸式が成立する.

$$Q_2 = \lambda_a \frac{\theta_1 - \theta_2}{d_1} A_2$$

$$Q_{21} = \lambda_a \frac{\theta_2 - \theta_3}{d_2} A_2$$

$$Q_{22} = C \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 (\theta_2 - \theta_3) A_2$$

$$Q_3 = Q_{21} + Q_{22}$$

次に A 面より B 面へ空气中の伝導, 輻射により移動する熱量をそれぞれ,  $Q_{31}$ ,  $Q_{32}$  とし  $\theta_3 = \theta_1 = \theta_3$  ならば次の諸式が成立する.

$$Q_{31} = \lambda_a \frac{\theta_1 - \theta_3}{d} A_3$$

$$Q_{32} = C \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 (\theta_1 - \theta_3) A_3$$

$$Q_3 = Q_{31} + Q_{32}$$

尚  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

以上の諸式より次の関係を得る.

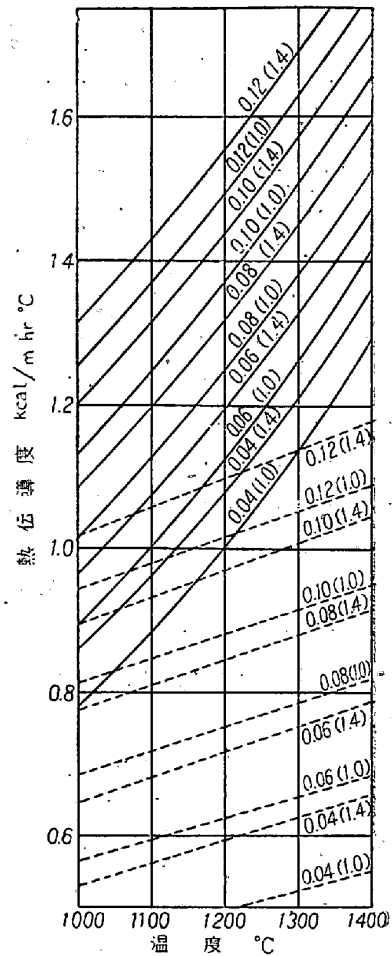
$$\lambda = \lambda_a \alpha_1 + \frac{\lambda_a \left[ \lambda_a + \beta_2 d C \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 \right]}{\beta_2 \lambda_a + \beta_1 \left[ \lambda_a + \beta_2 d C \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 \right]} \alpha_2 + \left[ \lambda_a + d C \left( \frac{\theta}{100} \right)^3 \right] \alpha_3 \dots\dots\dots (6)$$

この式中  $\lambda_a$ ,  $\lambda_a$  は知られて居り,  $C$  も常数である. 又接触係数  $\alpha_1$  を仮定し, 見掛比重を測定すれば, (2) (3), (4) 式より  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  がきまる. 故に砂粒の大きさをあらわす篩目の開き  $d$  がわかれば (6) 式より見掛熱伝導度を計算して求めることが出来る. 計算結果は第 2~5 図及び第 7 図に示す. 第 2, 3 図に於て括弧内の数字は砂粒の大きさをあらわす数 [m], 括弧の前の数字は接触係数である. 尚第 2 図は  $30^\circ C$ , 第 3 図は  $200^\circ C$  の値を示す. 第 4, 5 図に於て括弧内の数字は見掛比重; 括弧の前の数字は接触係数であり, 第 4 図は砂粒の大きさ  $0.001m$  (約 14~20M) 第 5 図は  $0.0001m$ , (約 140~200M) の値を示す. 第 7 図は  $1000 \sim 1400^\circ C$  に於ける値で実線は粗粒 ( $0.001m$ ), 点線は細粒 ( $0.0001m$ ), 括弧内の数字は見掛比重, 括弧の前の数字は接触係数である.

之等の計算に使用した常数は次の通りである.

$$\lambda_a = 5.148 \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ C$$

$$\lambda_a = 0.0203 \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ C$$



第 7 図

$$Cb = 4.95 \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ K$$

$$\delta_s = 2573 \text{ kg/m}^3 \text{ (測定)}$$

VII. 實驗値と計算値の比較検討

實驗値と (6) 式による計算値と比較すると次の通りである.

(1) 接触係数を適当に選べば實驗値と計算値が良く一致する.

(2) 常温より  $200^\circ C$  附近迄では粗粒 14~20M) については接触係数  $0.03 \sim 0.035$ , 細粒 (140~220M) については  $0.025 \sim 0.03$  と選べばよい. 見掛比重の影響は實驗の方が計算値以上に著しい. 粗粒で見掛比重大となつて熱伝導度の低下して居るのは強くつき固めることにより細粒が生じたためと思われる.

(3)  $200 \sim 1000^\circ C$  に於て粗粒の熱伝導は温度と共に急激に大きくなつて居るが, 細粒ではあまり著しくない. 實驗値と計算値がよく一致している.  $600^\circ C$  以上となると大きな接触係数で計算した値と實驗値が一致する. 之は珪砂の異状膨脹及び接触部の一部の溶解に起因

する接触面積の増加によるものと考えられる。

(4) 粗粒と細粒とで接触係数が異つている。砂粒の形状が相似ならば、この様なことは起らない筈であるが破碎した時の割れ方が同一でないため形状が相似にならないことに因ると考える。

### VIII. 總 括

(1) 鑄鋼用珪砂について見掛比重、粒度をかえ常温より 1000°C 迄の見掛熱傳導度を測定した。

(2) 珪砂の見掛熱傳導度を粒度、見掛比重、温度、接触係数を変数として含む式を誘導し、適当な接触係数を選べば計算値と実験値と略一致することを確かめた。

(3) 1400°C 迄の熱傳導を計算により求めた。

(4) 砂の粒度、見掛比重と熱傳導度との関係が明らかになれば實際鑄造の場合に適用してその鑄造性を正確な

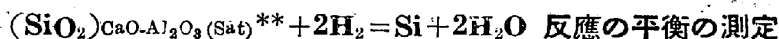
らしめることも可能であり、又 1000°C 以上の高温に於ける熱傳導度も知ることが出来るから、鑄鋼の鑄造の場合に適用出来る。尙 1000°C 近くの高温度に於て砂の焼結により熱傳導度が大となることを知つたが焼結機構等につき目下研究続行中である。

尙本研究は文部省科学研究費の補助によつて行つたことを附記し感謝の意を表する。(昭和 28 年 8 月寄稿)

### 文 献

- 1) 川下研介: 熱傳導論 (1941) 282
- 2) H. A. Schwarz: Trans. Am. Found. Assoc, 53 (1945) 159
- 3) Landolt: Physik. u. chem. Tabellen., Zweit. Erg. Bd, (II) (1931) 1274
- 4) 芝龜吉: 物理常數表 (1948)

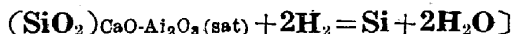
## 熔鐵中の珪素、熔滓及び H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 混合瓦斯間の平衡 (IV)



(昭和 28 年 4 月本会講演大会にて講演)

的場 幸雄<sup>1)</sup>・三本木貢治<sup>2)</sup>・中村 元<sup>3)</sup>

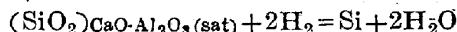
### ON THE EQUILIBIUM AMONG SILICON IN MOLTEN IRON, BLAST-FURNACE SLAG AND H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O MIXED GAS (IV) [INVESTIGATION OF THE EQUILIBRIUM OF THE REACTION



Sachio Matoba, Dr. Eng., Koji Sanbongi Dr. Eng., & Hajime Nakamura

#### Synopsis:

Using a pure Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crucible, authors measured the following reaction under the conditions of 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or 3CaO · 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> saturation at the temperatures of 1,550° and 1,600°C;



Further, the activities of SiO<sub>2</sub> in the molten slags of SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ternary system were calculated from the equilibrium values of Si in molten iron at a given temperature and gas ratio p<sub>H<sub>2</sub></sub>/p<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, where the pure β-cristobalite was taken as the standard state. The authors illustrated the relation of the equilibrium among Si in molten iron, activity of SiO<sub>2</sub> of the SiO<sub>2</sub>-CaO-

\* 選鑛製鍊研究所報告第 162 號

\*\* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 飽和の SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系鑛滓中の SiO<sub>2</sub> を意味する

- 1) 東北大學教授 金屬工學科 工博
- 2) 同教授 選鑛製鍊研究所 工博
- 3) 同 大學院研究獎學生 金屬工學科 工