

© 1987 ISIJ

Al₂O₃-SiO₂ 系れんがにおける気孔内への熔融 FeO-SiO₂ スラグによる滓化反応を伴う浸透

論文

鰐部 吉基*・横山 誠二*²・伊藤 孝至*³
藤澤 敏治*・坂尾 弘*

Infiltration of Molten FeO-SiO₂ Slag into Pores in Al₂O₃ Bricks with the Slagging Reaction

Yoshimoto WANIBE, Seiji YOKOYAMA, Takashi ITOH,
Toshiharu FUJISAWA and Hiroshi SAKAO

Synopsis:

This study reveals the quantitative analysis on the infiltration of molten slag into pores in bricks with the slagging reactions. The experiment was carried out with an FeO-SiO₂ slag on practically used Al₂O₃-SiO₂ bricks at 1 523 and 1 573 K, then semi-theoretical formulations were introduced for the interpretation in a connected pores system. A satisfactory explanation was presented to the experimental observations on the slagging infiltration of the molten slag in the industrial bricks through the characterization of the pores system and the correlative evaluations of immersion force, slagging reactivity and wetting behavior. The unified interpretation then suggests the possibility for the anticipative estimation of the phenomenon out of the material natures concerned.

1. 緒 言

耐火物の気孔内への熔融スラグによる反応を伴った浸透は、従来濡れやすい浸透液体がしかも被浸透多孔質体と反応しないとした概念で解析されている^{1)~3)}。しかし、著者らの一部が前報⁴⁾⁵⁾で明らかにしたように、緻密質の細管に熔融スラグを浸透させる実験結果でも従来の解析法では定量的に満足な取扱いができない。それゆえ、この滓化反応を伴う浸透現象を記述するために、実験結果に則した新しい定量的な式を導出して解析した⁵⁾。本研究では、緻密質細管で得たこの基礎的な成果をさらに発展させ、多孔質体である実際の工業用の耐火物における現象の定量的な解析に応用できるように一般化することを目的とする。

通常の耐火れんがは、多種多様の骨材がガラス相や微細な粒子より成るマトリックスで結合され、気孔が無秩序に散在する複雑な集合組織より構成されている。従つて、その気孔を通してスラグが浸入する現象を定量的に扱うためには、多孔質体の気孔に関する普遍的なモデルがない現状では、耐火物の気孔に対して得ることができ

る定量的な特性で、どれをどう組み合わせるかをそれぞれの定量法の原理を踏まえて知る必要がある。そのため、著者らは同一耐火れんがを試料とした気孔の性状に関する種々の測定を方法にかかわる考察と結果の比較検討を含めて報告してきた^{6)~8)}。また、耐火れんがにおけるスラグによる滓化浸透を解析するためには、さらに耐火物への熔融スラグの濡れ挙動を明らかにする必要があるため、同一れんが試料上におけるスラグ滴の挙動を観察して現象論的な検討結果を報告した⁹⁾。そこで上述の本研究目的を達成するため、耐火物細管で得た解析法を多孔質れんがに適用できるように拡張発展させることに続けて、耐火物の気孔の性状に関する諸特性を定量する際に用いた同一の工業用れんがに、スラグ滴の濡れ挙動を調べた際と同じ熔融スラグに浸透させる実験を行った。そして測定結果を細管で得た知見と総合して解析し、熔融スラグによる耐火物気孔内への浸透の程度をスラグや耐火物の物性値より推測することを試みた。

2. 熔融スラグによる耐火物の気孔内への浸透式

前報⁴⁾⁵⁾では、耐火物の細管内へスラグを浸透させた

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 2 月 4 日受付 (Received Feb. 4, 1986)

* 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

*² 名古屋大学大学院 (現: 豊橋技術科学大学) (Graduate School, Nagoya University, Now Toyohashi University of Technology)

*³ 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

実験結果に基づいて、次の近似運動方程式

$$2R_0\gamma \cos \theta - 8\eta h(dh/dt) - \bar{R}^2\rho gh = 0 \cdots (1)$$

$$\bar{R}^2 = (R_0^2 + R_0R_t + R_t^2)/3 \cdots (2)$$

と実験近似式

$$dh/dt = A(h_e - h)^2 \cdots (3)$$

を得た。ここで R は細管半径, γ , η , ρ はそれぞれスラグの表面張力, 粘性, 密度, θ は接触角, h は浸透高さ, t は時間, g は重力加速度, A は比例定数である。また, 下付きの添字で 0 は初期値, e は力学平衡時の値, t は時間 t における浸漬端の値を示す。

式 (1) は液体の細管上昇に関する運動方程式を基礎として導いた関係であり, 式 (2) は耐火物内をスラグが上昇するとき, 滓化反応により細管径が拡大することを考慮した関係である。式 (3) は測定結果を表す実験式であり, 他の形の関係式も種々考えられるが, 実験誤差を考慮すれば測定結果を十分に表現でき, しかも後の解析に有利なため, 式 (3) の形を採用した。そして式 (1) と (3) の対応関係を調べて初期時の濡れ性に基づく浸透速さを表す無次元定数 ξ を

$$\xi \equiv (h_e/\gamma_e \cos \theta_e) \lim_{t \rightarrow 0} (\gamma \cos \theta/h) - (\rho_0/\rho_e)(R_0/\bar{R}_e)^2 \cdots (4)$$

で定義し, さらに細管においては, 観察結果に基づいて滓化反応の程度を表す無次元定数 β を

$$\beta = (R_0/\bar{R}_e)^2 \cdots (5)$$

と評価できることを踏まえ, これらの式や対応関係

$$h_e = (2\gamma_e \cos \theta_e/R_0\rho_e g)\beta \cdots (6)$$

$$Ah_e^2 = (dh/dt)_{t=0} \cdots (7)$$

$$= (\rho_e g R_0^2/8\eta_0)(\xi/\beta) \cdots (8)$$

を用いて細管の滓化反応を伴う種々のスラグの浸透現象を定量的に説明できることを著者らの一部は報告した⁴⁾⁵⁾。

耐火れんがのような多孔質体中の流路は, 多数の種々の気孔が複雑に連なった集合体と考えられるので, その気孔径を前報⁷⁾で導入した水力半径 R_h で, また気孔の

曲がりや膨らみを屈曲度 $\tau^{10)}$ で評価すると, その定義より円管と多孔質体の間には

$$R_h = R/2 \cdots (9)$$

$$h = \tau H \cdots (10)$$

の関係が成り立つ。ただし, ここで H は多孔質体における見掛けの浸透高さを表している。従つて, 式 (1) と (3) との対応関係を用い, 円細管での滓化反応を伴う浸透式を式 (9) と (10) を介して多孔質体へ一般化した

$$H = H_e t/(t + G) \cdots (11)$$

$$H_e = (\gamma_e \cos \theta_e/\rho_e g)(\beta/R_{h0}\tau) \cdots (12)$$

$$G = (2\eta_0\gamma_e \cos \theta_e/\rho_e^2 g^2)(\beta^2/R_{h0}^3\xi) \cdots (13)$$

$$\xi = (2\eta_0\beta/R_{h0}^2\rho_e g)\tau(dH/dt)_{t=0} \cdots (14)$$

を導くことができる。さらに実験に供した種々の溶融スラグの物性に関する文献値の調査で, その密度は反応に伴う組成変化にあまり影響を受けないことが明らかであるため, 実験結果を整理する場合にはすべての式で

$$\rho_e = \rho_0 \cdots (15)$$

と置くことができる⁴⁾⁵⁾。

3. 実験方法

耐火れんがに関する各種の測定に常に使用してきた Table 1 に示す供試耐火れんがを再び用い, それより約 $5 \times 5 \times 65$ mm (試料 g は 95 mm) の四角柱片を切り出し, その一端を石英管の先端にアルミナセメントで固定して測定用試料とした。スラグは濡れ挙動の観察に使用した FeO 70 wt% - SiO₂ 30 wt% の組成になるように Fe, Fe₂O₃, SiO₂ の各粉末試薬を配合し, 十分混合し圧粉したものを Fig. 1 に示すようにアルゴン雰囲気下の電気抵抗炉内の均熱帯下部で鉄るつばを用いて溶製し, 所定温度 1523 K, 1573 K に保持する。試料は炉上部より 0.5 mms^{-1} の速度で挿入し, 均熱帯上部で予熱後その先端をスラグに所定時間浸漬させた後, 取り出して水中に冷却した。

Table 1. Chemical composition, permeability of nitrogen K , apparent porosity P_a , area base mean hydraulic radius by the mercury penetration R_{ha}^m , and mass base specific surfaces by the Kr adsorption and the mercury penetration, S_w^a and S_w^m , respectively, of the bricks used.

Sample	Chemical composition*1/wt %			$K^{*2}/$ 10^{-14} m^2	$P_a^{*3}/$ %	$R_{ha}^{*4}/$ μm	$S_w^{*2}/$ $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$	$S_w^{*4}/$ $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃					
a	61-62	32-35	1.0-1.2	1.43	15.5	0.533	82.4	122
b	62-64	*5		7.71	21.8	1.15	58.4	74.5
c	92-93	5.5-6.5	0.1-0.2	1.17	12.6	0.509	46.0	84.4
d	91	*5		2.37	13.9	1.22	28.6	36.7
e	66	31		3.09	18.6	0.457	110	162
f	71	25		2.12	16.6	0.708	48.4	84.8
g	87	11		0.556	15.8	0.448	73.5	113
h	95	*5		6.84	57.6*2	—	191	—

*1: Catalogue

*2: Reference 8

*3: Reference 6

*4: Reference 7

*5: Balance

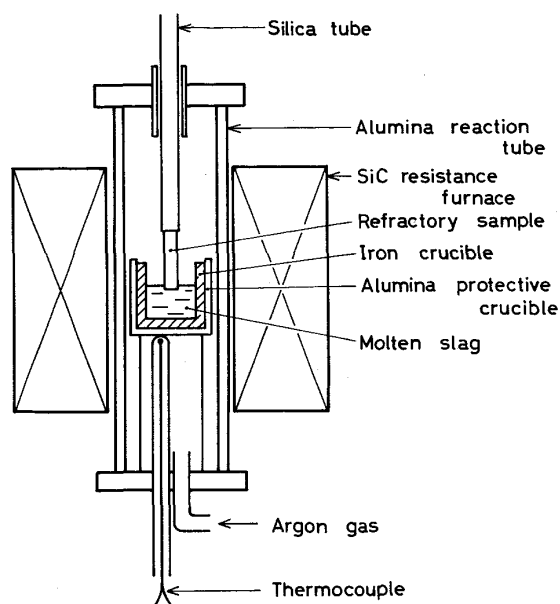


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

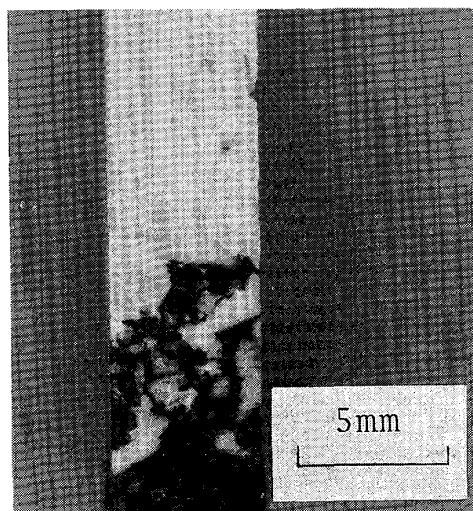


Photo. 1. Determination of the infiltration height (sample a) at 1573 K for 60 s.

4. 実験結果

浸漬後のスラグ浸透部分は、Photo. 1 に例示するように耐火物とは明確に区別されるが、浸透前面は平滑ではない。そこで各試料の表面または縦断面においてスラグの浴平面を基準として x 軸、浸透方向に y 軸をとって浸透前面を連続な関数 $y=f(x)$ とみなし、4 次の LEGENDRE の方程式より各 x_i ($i=1, 2, 3, 4$) を定める。ついで x_i に対する H_i の値をノギスで読み取り、ガウスの数値積分法¹¹⁾ を用いて測定面における面積平均 $\bar{y}$

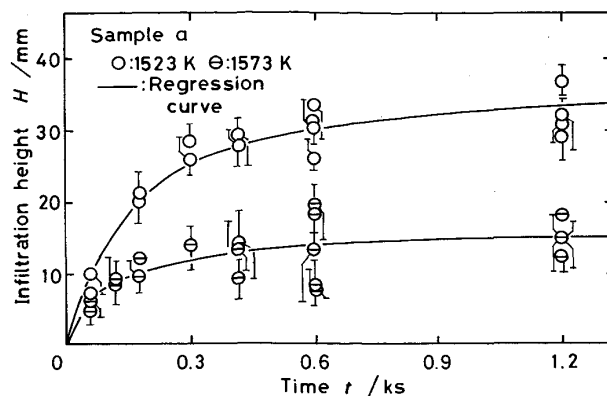


Fig. 2. Typical examples of the time-dependent infiltration heights.

を

$$H = \bar{y} (1/2) \sum_{i=1}^4 C_i y_i \dots \dots \dots (16)$$

で算出して耐火物試料における浸透高さ H とした。ここで $C_1 = C_4 = 0.34785$, $C_2 = C_3 = 0.65215$ である。試料の縦断面と表面における浸透高さを同一試料で求めて比較すると、系統的な有意差は認められず、実験誤差の範囲内で一致したので、表面における測定値を主として整理した。耐火れんが内にスラグを浸透させた時、その浸透高さの経時変化を Fig. 2 に例示する。

5. 考 察

5.1 経時変化の回帰分析

多孔質体の滓化反応を伴う浸透高さの経時変化を表す式 (11) に基づいて実験結果を回帰分析した。回帰法として式の両辺で逆数を採って線型に直す方法と非線型のパラメーター推定に用いられる線型化法¹²⁾ (テラー展開法) との 2 通りの方法で可能であるが、前者では個々の実験誤差やばらつきの評価に偏りが生じるので、ここでは後者の線型化法により逐次近似してパラメーターを求めた。

Fig. 2 にその回帰分析で得た結果を例示する。回帰曲線と実験値とは実験誤差を考えると良く一致し、浸透高さの回帰曲線に対するばらつきは ± 5 mm 程度である。従つて、低い浸透高さの時には大きな相対誤差を伴う。このばらつきの原因として、同一の耐火れんがより得た試料においても組成や組織、気孔性状などのすべてに完全に同等でないことがある。回帰曲線をまとめて Fig. 3 に、そのパラメーターを Table 2 に示す。一般に浸透高さが高いと力学平衡に到達する時間も長くなる。耐火れんが試料を用いて得た同図においては、前報⁴⁾ の細管を用いた基礎知見とみかけ上一致しない結果

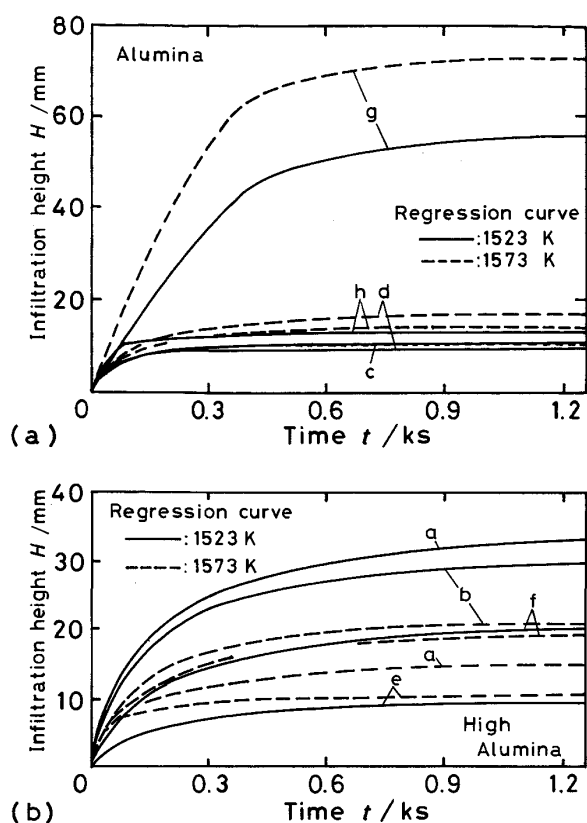


Fig. 3. Regression curves of the time-dependent infiltration heights in the bricks.

Table 2. Regression parameters, tortuosity, and parameters relating to the reactivity and the initial infiltration rate, β and ξ , respectively, of the bricks.

Sample	Regression parameter			Tortuosity τ	$\beta/10^{-3}$	ξ
	Temp./K	$H_c/10^{-2}\text{m}$	$G/10^2\text{s}$			
a	1523	3.69	1.44	1.64	4.41	73.8
	1573	1.61	0.926		1.72	19.6
b	1523	3.25	1.23	1.57	7.71	27.4
	1573	2.28	1.12		4.86	13.3
c	1523	1.10	0.473	1.94	1.05	22.5
	1573	1.10	0.476		0.973	20.7
d	1523	0.98	0.286	2.40	2.81	19.1
	1573	1.81	0.935		4.80	18.4
e	1523	1.02	1.22	1.05	0.602	2.87
	1573	1.08	0.386		0.578	9.29
f	1523	2.27	1.64	2.20	4.01	27.6
	1573	2.12	1.21		3.41	29.7
g	1523	5.55	3.50	1.51	3.79	55.7
	1573	7.17	2.77		4.51	108

が生じている。すなわち、耐火物におけるアルミナ含有量とスラグの浸透高さとの関連において、れんが組成のアルミナ濃度が増すとスラグの浸透が低く抑えられ、細管を用いて得た結果と逆の傾向を示す。また、アルミナ含有量の少ない耐火物で浸透高さに及ぼす温度の影響が逆転している。従つて、これらのことは耐火物の細管に

おける基礎知見をそのまま多孔質の耐火れんがへ適用できないことを示す。また、試料gではスラグに浸透された所が変形し、時間と共にそれが著しかった。これはスラグの溶解反応によりマトリックスが浸食され骨材が浮き上がったためと推測される。

5.2 耐火れんがにおける流路

耐火れんがのような圧密体 (Consolidated media) は複雑な気孔の組織を有しているため、普遍的な気孔モデルを仮定することは困難である。また、スラグの浸透に関与する耐火物の気孔は、開口気孔のうちで主に貫通気孔と考えられるが、袋小路型の気孔の開口部においてもスラグは浸透する。従つて、開口気孔すべての性状、すなわち気孔の膨らみ、曲がり、枝分かれや連結等を考慮する必要がある。このような開口気孔の連結系を表示する概念として、屈曲度はまだ確固たる定義がないのにもかかわらず、耐火物においても個別に算出されている¹³⁾¹⁴⁾。ここでは近藤ら¹⁵⁾の考えを発展させて、開口気孔における膨らみや形状に基づく屈曲度 τ_1 と貫通気孔の曲がり、枝分かれや連結による屈曲度 τ_2 の2種類に分け、浸透に関与する耐火物の気孔における屈曲度 τ をこれらの相乗効果による両者の積として定義した。

今、ある一定の断面積をもつ気孔の連結系において気孔の体積と表面積との比が連結系の長さの概念を与えることと、前報⁷⁾で述べた水銀圧入法がその測定原理に基づいて気孔のネック部における径とその気孔量を検出できることに注目すれば、部分屈曲度 τ_1 は

$$\tau_1 = S^m / S^a \quad \dots\dots\dots (17)$$

と、気孔に関する一般的な関係

$$R_h = \epsilon / S \quad \dots\dots\dots (18)$$

を用いて、水銀圧入法で算出できる比表面積と吸着法による直接測定で得るそれとの比で求めることができる。ここで ϵ は気孔率、 S は比表面積、上付きの添字 a と m はクリプトン吸着法と水銀圧入法による値をそれぞれ示す。

また、第2の部分屈曲度 τ_2 は前報⁸⁾で述べた通気率 K に基づいて

$$\tau_2 = \{ \epsilon (R_h^m)^2 / k_0 K \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

で算出される。ただしこの具体的な算出には、 ϵ として減圧による水置換法による見掛け気孔率の値⁶⁾を、 R_h には一般的な関係式 (18) が整合する水銀圧入法における面積平均水力半径⁷⁾を、また k_0 には種々の形状をした粒子によつて構成された気孔率の異なる粉体の充填層において得た値をまとめて CARMAN が推奨している値 2.5¹⁰⁾ を使用する。前報で明記したように測定の範囲を越える大きな気孔が存在する耐火断熱れんがhを除き、

滓化反応を伴う浸透現象をさらに解析するために、屈曲度を算出して Table 2 にまとめた。

5.3 力学平衡時の湿潤張力

耐火れんがにおいては、細管を用いた基礎的観察⁴⁾のようにその力学平衡時における湿潤張力値 $\gamma_e \cos \theta_e$ を決定する手段がないため、耐火物細管によつて得た結果と前報の濡れ挙動で観察した現象論的な知見⁹⁾よりそれを2通りの方法で推定してみた。

第1の方法は、耐火れんが面上におけるスラグ滴の濡れ挙動で得たスラグ滴の幅が最大になる時の接触角 θ_{wm} と時間 t_{wm} との関係⁹⁾ と、耐火物細管で得られた力学平衡時の湿潤張力値と表面張力に関する文献値との関連⁴⁾を用いる方法である。耐火れんが面上におけるスラグ滴の最大幅における接触角 θ_{wm} と時間 t_{wm} を、緻密質の耐火物平板における平衡時の接触角 θ_p と t_p を用いて Fig. 4 の両軸に示した値に規準化すると図示のように良い直線関係を得ることができる。また、緻密な耐火物の細管と平板において力学平衡時の湿潤張力値と接触角の余弦には、Fig. 5 に示すような関係を見出す。従つて、耐火れんがにおける力学平衡に到達した時間を用いれば Fig. 4 と 5 よりその平衡時の湿潤張力が推定できる。ただし、耐火れんが試料における力学平衡に達する時間は直接求めることができないため、式 (11) に基づく回帰曲線で $0.99 H_e$ になる時間を用い、これより湿潤張力の値を求める。この結果を耐火れんがで鉱物相などの構成相の量的割合を最も良く表す真密度値⁶⁾に対してプロットすると Fig. 6 のようになる。

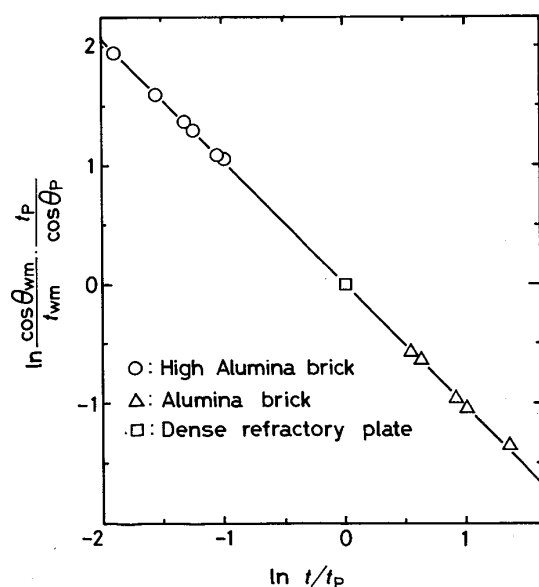


Fig. 4. Correlation of the time-dependent contact angle under the reduction to the module of the dense plates.

第2の方法は、浸透する熔融 FeO-SiO₂ スラグが力学平衡に至るまでの時間内で気孔壁と反応して、その浸透前面の壁周辺局部では Al₂O₃ 濃度が飽和に達すると考え、Al₂O₃-FeO-SiO₂ 系の平衡状態図の実験温度 (1523 K) における液相線に沿つて、耐火物細管で求め得る力学平衡湿潤張力値⁴⁾を組成で按分する方法である。組成を密度値におきかえた結果を Fig. 6 の実線で表す。図から明らかのように両方法で推定した結果は、それに使用した実験値の精度を考慮すれば良く一致しているといえる。なお同図の破線は、前報で得た 1573 K におけるムライト質細管の湿潤張力に準拠して 1523 K の曲線より類推したものである。

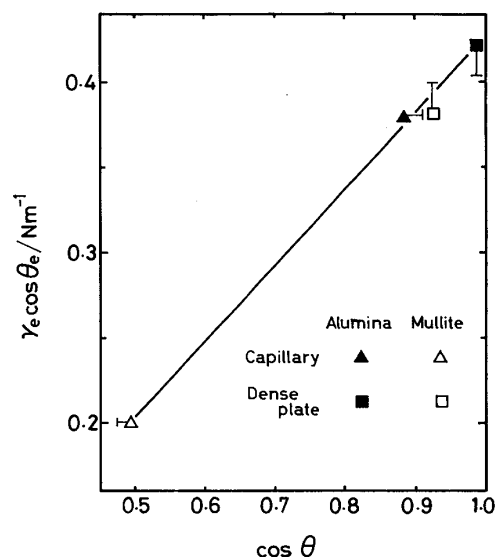


Fig. 5. Correlation between the contact angle and the dynamical equilibrium immersion force.

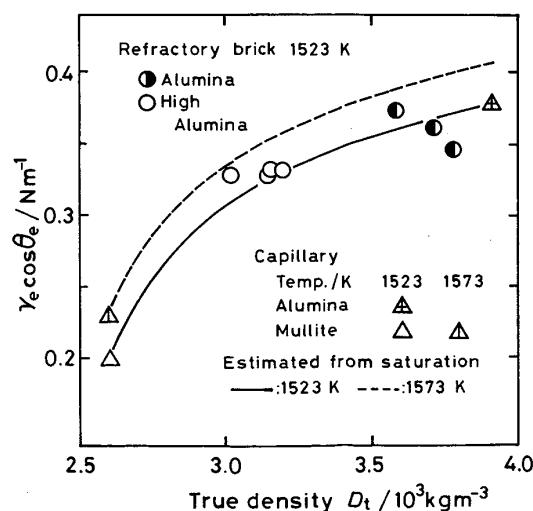


Fig. 6. Dynamical equilibrium immersion force dependent on the true density in the bricks.

5.4 耐火れんがと耐火物細管における浸透現象の対応

耐火れんがにおける浸透現象を一般化した式 (11)~(14) で記述するためには, さらに反応性の強さを表す無次元パラメーター β と濡れ速さなどに関係した浸透初速度の程度を示す無次元パラメーター ξ との値を必要とする. 前者のパラメーター β は, 細管においては実験式 (8) のように測定値より算出できたが⁵⁾, れんがにおいては未知量である. そこで, 耐火れんがにおける β と ξ を試料の気孔性状やスラグの物性に関する既知量から算出し, 耐火物細管における成果と総合してそれらの関係を調べてみる. 式 (11), (12) と (15) で算出した結果を Table 2 にまとめると共に Fig. 7 と 8 に示す. 右

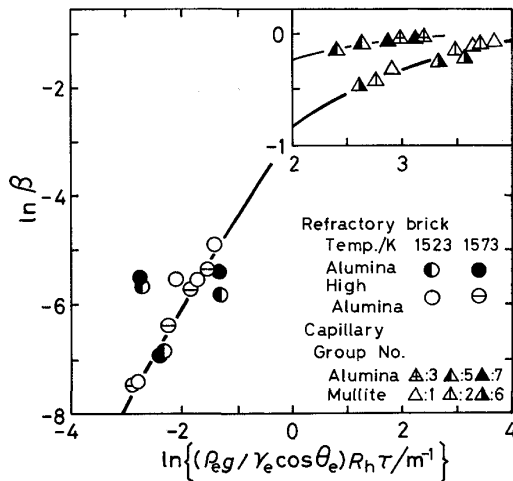


Fig. 7. Correlation between the parameter β for the reactivity of the slags and the specific pore hydraulic radius; group Nos. 1 and 3: FeO-SiO₂ at 1523 K; No. 2: FeO-SiO₂ at 1573 K; Nos. 5 and 6: CaO-SiO₂-Al₂O₃ at 1723 K; No. 7: Na₂O-SiO₂ at 1573 K.

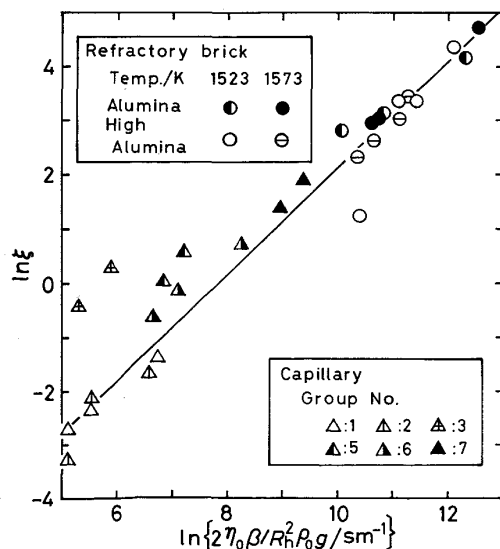


Fig. 8. Initial rate of the infiltration.

上方の区画を部分的に拡大して示した Fig. 7 で, β の値と水力半径を屈曲度と力学平衡時の毛管圧力で補正した横軸の値との間に滑らかな曲線関係がれんがと細管にわたって得られ, 特に太い実線で示したように耐火物の組成でアルミナ濃度が約 70% 以下である場合にその関係が明瞭である. また, 式 (14) と (15) に関連してプロットされた Fig. 8 においては, 水力半径やスラグの物性値および反応の指標パラメーターを含む横軸の値と ξ との間に勾配 1 の直線関係が認められ, 実験に供したスラグの種類, その実験温度, 耐火物の組成などが異なり, しかも耐火物が細管やれんがの違いがあるにもかかわらず, $\tau(dH/dt)_{t=0}$ の値が一定であることを示している.

5.5 耐火れんがの浸透現象の推測

実験に供したアルミナ質耐火れんが, とくに高アルミナ質耐火れんがにおける力学平衡時の浸透高さや浸透高さの経時変化をスラグの物性値と気孔に関する特性値から Fig. 7 と 8 に示した関係を用いて逆算してみた. 前述のように骨材が浮き上がって著しい変形を生じた試料 g を除いて, 式 (11) と (15) を用いて算出した力学平衡時の浸透高さの値と実験値を耐火物細管におけるそれらとともに Fig. 9 に比較してみると, 両者は良く一致している. また, 浸透経時変化の計算例を, 測定値とともに Fig. 10 に示す. 1573 K における浸透高さの計算値が測定値より若干大きめの傾向を示すが, 実験値の誤差を考慮すると計算値との一致は良いといえることができる.

従つて, れんがの気孔の性状に関する諸特性の信頼できる定量値とスラグの物性値が既知であれば, 熔融スラ

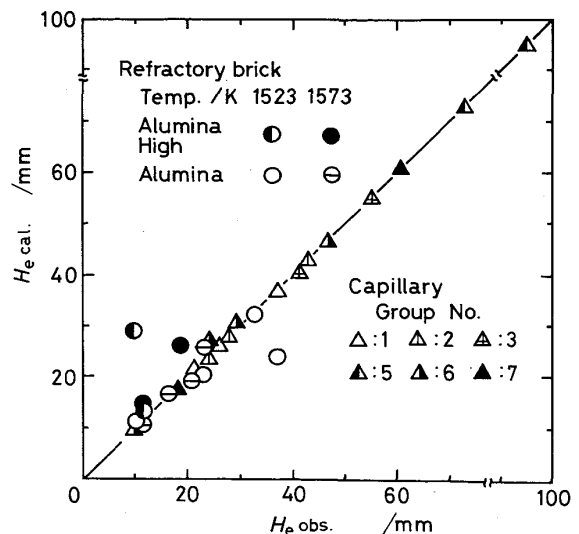


Fig. 9. Comparison of the observed and calculated infiltration heights at dynamical equilibrium.

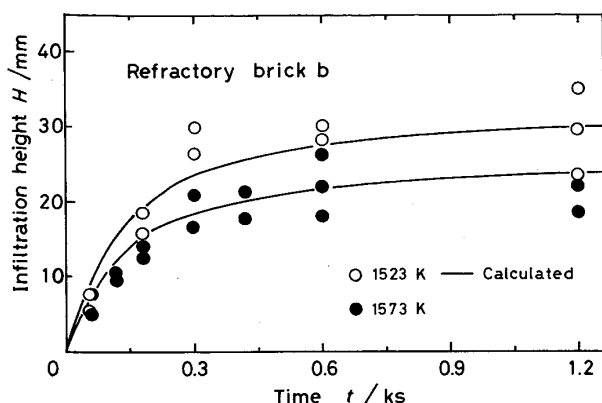


Fig. 10. Anticipative estimation of the time-dependent infiltration height.

グによる耐火れんがの気孔内への浸透現象を定量的に推測できる。ただし、この予測は力学平衡時における湿潤張力 $\gamma_e \cos \theta_e$ を得る一般化された方法がまだ未知のため、現在はアルミナ質れんがに限定されるが、他のれんがにおいても 5・3 で記述したようなたとえ現象論的な対応関係でも経験的に得ることができれば推測が可能となる。

6. 結 言

熔融スラグによる耐火れんがの気孔内への滓化浸透現象を調べるために、市販アルミナ系れんがに溶融合成 FeO-SiO₂ スラグを浸透させる実験を行った。そして、耐火物の細管を用いて得た浸透現象の基礎式を多孔質体における浸透式に拡張発展させ、前報までに得た種々の測定結果を総合して耐火れんがにおける浸透現象について検討した。その結果と結論をまとめると以下のようである。

(1) 耐火れんがの気孔を通してのスラグの浸透上昇は

$$H = H_e t / (t + G)$$

$$H_e = (\gamma_e \cos \theta_e / \rho_e g) \cdot (\beta / R_h \tau)$$

$$G = (2\eta_0 \gamma_e \cos \theta_e / \rho_e^2 g^2) (\beta^2 / R_h^3 \xi)$$

で定量的に取り扱うことができる。

(2) れんがの気孔性状に関して、減圧下の水置換法で得る気孔率、水銀圧入法で得る面積平均水力半径と比表面積、吸着法による比表面積および信頼できる通気率を決定し、スラグの物性値が既知であれば、アルミナ質れんがについては Fig. 7 と 8 より滓化反応に関するパラメーター β と初期の濡れ速さに関するパラメーター ξ が推定できるので、熔融スラグによる耐火れんが内への浸透の度合いやその経時変化を予測できる。

試料用耐火れんがを提供して下された東京窯業株式会社と播磨耐火煉瓦株式会社に感謝すると共に、本研究の一部は昭和 59, 60 年度科学研究費補助金によつたことを付記して謝意を表します。

文 献

- 1) 渡辺 明, 木原誠治, 鈴木嘉弘: 耐火物, **34** (1982), p. 467
- 2) H. H. SCHWIETS and L. ZAGAR: Tonid.-Ztg., **83** (1959), p. 115
- 3) 滑石直幸, 井上 晃, 永吉博隆: 耐火物, **22** (1970), p. 417
- 4) Y. WANIBE, H. TSUCHIDA, T. FUJISAWA and H. SAKAO: Trans. ISIJ, **23** (1983), p. 322
- 5) Y. WANIBE, H. TSUCHIDA, T. FUJISAWA and H. SAKAO: Trans. ISIJ, **23** (1983), p. 331
- 6) 横山誠二, 山田恭裕, 鰐部吉基, 坂尾 弘: 窯協誌, **93** (1985), p. 655
- 7) 横山誠二, 鰐部吉基, 坂尾 弘: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 297
- 8) 横山誠二, 鰐部吉基, 坂尾 弘: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 305
- 9) 横山誠二, 鰐部吉基, 坂尾 弘: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 484
- 10) P. C. CARMAN: Flow of Gases through Porous Media, (1956), p. 11 [Butterworths Scientific Publications, London]
- 11) 鞭 巖, 佐田栄三, 森山 昭, 高津 学: 冶金実用数学, (1975), p. 17 [科学技術社]
- 12) 一瀬正己: 誤差論, (1982), p. 54 [培風館]
- 13) N. F. ASTBURY: Trans. Brit. Ceram. Soc., **67** (1968), p. 319
- 14) 後藤誠史, 大門正機, 倉田昭男, 近藤連一: 窯協誌, **80** (1973), p. 34
- 15) 近藤連一, 大門正機, 大沢栄也: 石膏と石灰, **112** (1971), p. 92