

高炉の出鉄量が主樋の損耗速度に与える影響

Influence of Blast Furnace Productivity on Corrosion Rate of Main Trough

飯 田 正 和^{*1}

Masakazu IIDA

鈴 木 建 司^{*2}

Kenji SUZUKI

Abstract

In order to describe the variations of the corrosion rate of blast furnace main trough from the view point of the furnace productivity, the mass transfer model is proposed. In the model, the variations of productivity were taken into account as slag flow speed variations. The calculated results showed good agreement with the observed data. Thus, the accuracy of the alterations of trough repair project corresponding to the changes of furnace production plan becomes better by utilizing the corrosion rate predicted by the model.

1. 緒言

高炉の主樋は深さ約1m、長さ約20mの熔融物の流路で、高炉から排出された約1500℃のメタルとスラグは主樋を流れながら比重分離される。主樋の損耗は局部的であり、スラグ/エア界面にスラグライン(SL)が、メタル/スラグ界面にメタルライン(ML)が形成され、いずれも化学的な溶損が主体であるとされている¹⁻⁴⁾。また、長さ方向では出鉄孔から5m付近の損耗が最も大きく、流速の影響であると考えられている⁵⁾。ライニングとしてはSLに高SiCキャストブルが、MLに Al_2O_3 - MgAl_2O_4 -SiC-C質キャストブルが用いられるのが一般的である。

主樋の稼働期間は残厚の限界値で管理されるが、通鉄量と日数の両方を考慮して決定する必要がある。例えば高炉の増産期は減産期に比較して単位通鉄量あたりの損耗速度は小さくなるが、単位時間あたりの損耗速度は大きくなる。従って、樋材原単位は低下するが、修理工程はタイトになる。このような高炉の出鉄量と主樋の損耗速度の関係についての理論的な解析はなされていなかった

1. Introduction

The main trough of a blast furnace (BF), with the general geometrical dimensions of approximately 20m length, 1m width, 1m depth, is not only a channel for molten metal and slag drained from the blast furnace tap hole but also a separator of the two immiscible liquids whose temperatures are about 1500℃. The main trough has two localized corrosion zones in the vertical direction. One is the slag/air interface (slag line: SL) and the other is the metal/slag interface (metal line: ML). The main corrosion factor of both zones is considered to be chemical reactions¹⁻⁴⁾. In the horizontal direction, the impact zone can be observed at about 5m from the tap hole. Higher slag flow speed is considered attributable to this phenomenon. In general, high SiC castable is applied to the SL and Al_2O_3 - MgAl_2O_4 -SiC-C castable is applied to the ML for working linings.

In practical trough operation, time until repair should be determined in order to maintain the minimum residual thickness. Both passed metal

^{*1} 技術研究所 グループマネージャー Manager, R&D Group, Research Center

^{*2} 湯本工場 技術室 Technical Section, Yumoto Works

た。そこで、高炉の出鉄量が損耗に与える影響について物質移動モデルに基づく解析を行った。

2. 損耗速度解析手順

2.1 物質移動モデル

主樋の損耗が化学的な溶解であるとする、単位時間あたりの損耗速度 $(-dl/dt)$ は、Fickの法則に基づき、物質移動係数 k 、飽和溶質濃度 c_{sat} 、溶質濃度 c を用いて式(1)で記述できる。

$$-\frac{dl}{dt} = k(c_{sat} - c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

出鉄量の影響について、スラグ流速の増大による物質移動の促進によりスラグへの樋材の溶解速度が増大するとし、流体中での平板の均一な溶出を記述したPohlhausenの式(式(2))で考慮できると仮定した⁶⁾。

$$Sh = 0.664Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)において、 Sh (Sherwood number)、 Re (Reynolds number)、 Sc (Schmidt Number)は、 L を代表長さ、 D を拡散係数、 ρ_s をスラグ密度、 v_s をスラグ流速、 η_s をスラグ粘度としてそれぞれ、 $Sh = kL/D$ 、 $Re = v_s L \rho_s / \eta_s$ 、 $Sc = \eta_s / \rho_s D$ で表わされる無次元数である。

式(2)を変形することで、物質移動係数 k について式(3)が得られる。これは向井⁷⁾が示した式と同じものである。

$$k = 0.664 v_s^{\frac{1}{2}} D^{\frac{2}{3}} \eta_s^{-\frac{1}{6}} \rho_s^{\frac{1}{6}} L^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)で $(c_{sat} - c)$ を適当に仮定(後述)、スラグ流速のわかった状態で損耗速度 $(-dl/dt)$ を実測すれば、そのときの流速における物質移動係数 (k) を見積もることができる。一方、式(3)において、スラグ流速(v_s)、スラグ密度(ρ_s)、スラグ粘度(η_s)、樋の形状で決まる代表長さ(L)は既知であるので、先に見積もった物質移動係数(k)から拡散係数(D)を得ることができる。次に、得られた拡散係数(D)を固定して、スラグ流速(v_s)を変えて逆に計算することで流速が変化したときの損耗速度 $(-dl/dt)$ を算出することができ、スラグ流速、すなわち高炉の出鉄量と損耗速度の関係についての解析が可能となる。

quantity and time duration should be taken into consideration. For instance, during the higher productivity period, the corrosion rate per unit metal quantity decreases while the corrosion rate per unit time increases. Thus, during that period, in spite of the reduction of unit refractory consumption, the repair schedule becomes tight. However, a theoretical analysis about the relation between corrosion rate and BF productivity has not been carried out. In this study, therefore, the influence of BF productivity on trough corrosion rate was analyzed based on a mass transfer model.

2. Analysis Procedure

2.1 Mass transfer model

Based on the Fick's law, the corrosion rate $(-dl/dt)$ can be expressed as Eq. (1) where k , c_{sat} , and c represent the mass transfer coefficient, saturation solute concentration, and solute concentration, respectively.

$$-\frac{dl}{dt} = k(c_{sat} - c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Regarding the influence of productivity variation as slag flow speed variation, it was assumed that Pohlhausen's equation (Eq. (2)) which describes the uniform dissolution of the flat area would be applicable⁶⁾.

$$Sh = 0.664Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Sh (Sherwood number), Re (Reynolds number), and Sc (Schmidt Number) are dimensionless numbers defined as $Sh = kL/D$, $Re = v_s L \rho_s / \eta_s$, and $Sc = \eta_s / \rho_s D$ where L , D , ρ_s , v_s , and η_s indicate the characteristic length, diffusion coefficient, slag density, slag flow speed, and slag viscosity. By rearranging Eq. (2), the following equation (Eq. (3)) can be obtained. Mukai⁷⁾ also has shown the equation elsewhere.

$$k = 0.664 v_s^{\frac{1}{2}} D^{\frac{2}{3}} \eta_s^{-\frac{1}{6}} \rho_s^{\frac{1}{6}} L^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Assuming a suitable value of $(c_{sat} - c)$ in Eq. (1) (it will be discussed in the next section) and measuring the corrosion rate $(-dl/dt)$ under the condition where the slag flow speed is known, the mass transfer coefficient (k) can be assessed. On the basis of the assessment, diffusion coefficient

2. 2 $c_{\text{sat}} - c$ の仮定

主樋の損耗は、主にSiCが酸化されて生成したSiO₂とマトリックス組成であるAl₂O₃がスラグに溶出して生じると考えられ、複数の物質の複合的な移動が生じている。これに対し、樋材成分のスラグへの移動を総括的に扱う場合は、樋材のSiCが完全に酸化されたと仮定して求めたSiO₂/Al₂O₃比に相当するひとつの溶質が溶出するとみなした解析が可能であることが実験で示されている⁸⁾。本報でも樋材の溶出を総括的に取り扱うことと

(D) can be calculated from Eq. (3) since all variables other than the diffusion coefficient (D) are known. Fixing the obtained diffusion coefficient (D) as a constant value, the corrosion rate ($-dl/dt$) variation as a function of slag flow speed (v_s) can be calculated. Consequently, an analysis between trough corrosion rate and the furnace productivity becomes possible.

2. 2 Assumption of $c_{\text{sat}} - c$

Trough corrosion is considered to be the phenomena where Al₂O₃ and SiO₂, which have

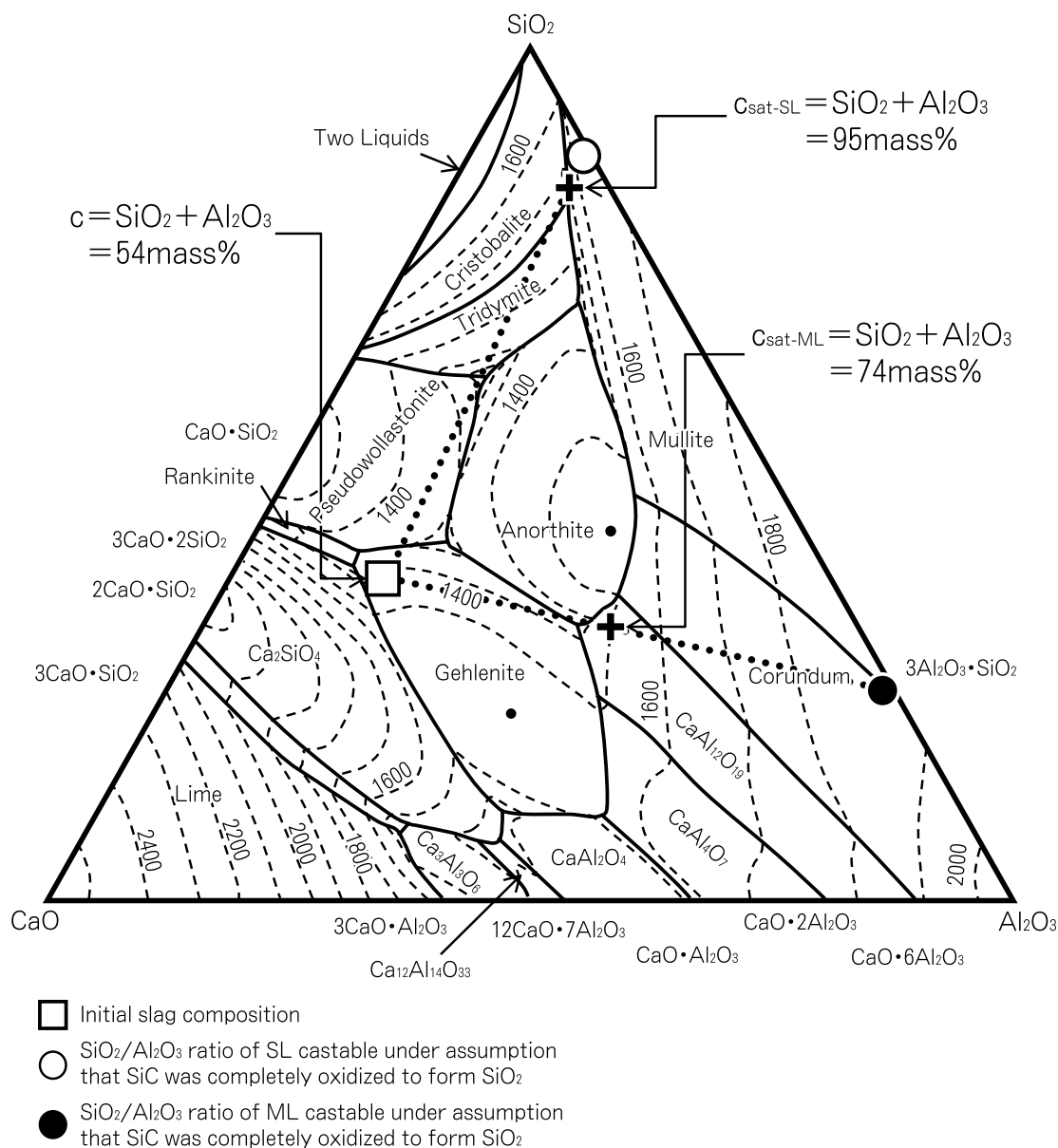


Fig. 1 Estimations of saturated amount of the BF trough material by utilizing the phase diagram.

し、状態図を用いて c_{sat} を見積もった。

Fig. 1にスラグおよびSL材、ML材に含まれるSiCを SiO_2 に換算した材料組成の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{CaO}$ 比を $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 系状態図上にプロットして示す。それぞれの材料の $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比に相当する組成をひとつの溶質と見なし、熔融物の温度は 1500°C であるとする。飽和溶質濃度(c_{sat})はスラグ組成と樋材組成を結ぶ直線と 1500°C の等温線の交点の $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量となり、SL材で95mass%、ML材で74mass%となる。なお、スラグおよびML材には MgO が含まれており、また、スラグや耐火物に含有される微量成分の影響で、実際の溶解度は若干異なると考えられるが、本報ではおおまかな値を見積もるという観点から3成分系状態図を用いた。

溶質濃度(c)は初期スラグの $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量であるとし、54mass%とした。主樋には継続的にスラグが供給されていることや耐火物原単位のオーダー(kg-耐火物/t-銑鉄)、高炉からの排出物中のスラグ質量比(kg-スラグ/kg-銑鉄 $\div 0.3$)を考慮、樋材のスラグへの溶出による成分変化は無視できるとした。

なお、本報においては上述のように複合的な物質移動を総括的に扱うことから、以降、本解析について記述する場合には総括物質移動係数(k_{overall})、総括拡散係数(D_{overall})という用語を用いる。

2. 3 損耗速度とスラグ流速

スラグ流速について、主樋内の熔融物の流れをFig. 2に概念的に示す。(1)主樋の下流部ではメタルとスラグは層流となっておりスラグ流速は高炉からの排出速度と主樋の断面積から算出したも

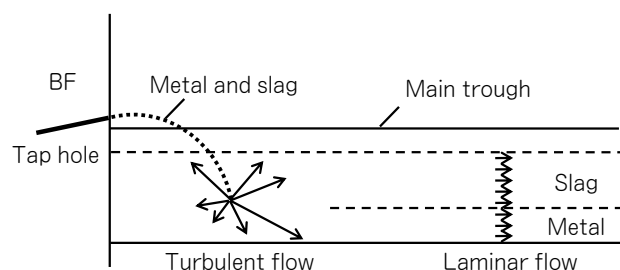


Fig. 2 Schematic illustration of liquid flow in a BF main trough.

been formed as a result of SiC oxidation, dissolve into the slag. Therefore, it is the combined process of two or more substances transferring simultaneously. Depending on the experiment, Iida and Ogura⁸⁾ concluded that it is acceptable to regard a certain $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio, which is calculated under assumption that SiC in the castable is completely oxidized to form SiO_2 , as a single solute when trough corrosion is analyzed in an overall manner. Also in this study, the authors deal with the corrosion in an overall manner. Hence, c_{sat} was estimated using a phase diagram.

Fig. 1 shows the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{CaO}$ ratio of the slag, SL castable, and ML castable plotted on the phase diagram of the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$. The SiO_2 in the castables was calculated under the assumption that it was completely oxidized along with SiC to form SiO_2 . Assuming that the plotted castable compositions are single solutes and the liquid temperature is 1500°C , the saturation concentrations (c_{sat}) can be estimated as the amount of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ on the point that intersections the straight line between the slag composition and the castable composition and isothermals at 1500°C . The estimated saturation concentrations (c_{sat}) were 95mass% and 74mass% for SL castable and ML castable respectively. Strictly speaking, the estimations are not accurate since slag and ML castable include MgO and some other minor component. In this study, however, the phase diagram of the ternary system was employed from the view point of rough estimation.

The solute concentration (c) was assumed as 54mass%, which was identical to the $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ amount of the initial slag. Considering the continuance of slag supply, digit of refractory consumption (kg-refractory/t-iron), and mass fraction of slag (kg-slag/kg-iron $\div 0.3$), the change of slag composition due to the refractory corrosion can be neglected.

As mentioned above, combined transfer of substances are described in an overall manner in this study. Thereafter, the terms of overall

のに等しい，(2)樋の断面積は使用開始時から変化しない，と仮定して単位時間あたりと単位通過メタル質量あたりの損耗速度を計算した。これにより，下流での損耗速度から総括物質移動係数(k_{overall})を見積もり，排出量と樋の断面形状から算出されたスラグ流速を v_s として総括拡散係数(D_{overall})を求めることができる。

これに対して，上流においてはメタルとスラグは乱流になっており流速が高いと考えられるが，小坂ら⁵⁾の検討結果を参考に下流部の10倍であると仮定した。

3. 解析結果と考察

3.1 総括拡散係数

今回の解析は，炉容積4500m³以上の国内の高炉に対して実施した。Table 1に計算条件と下流の損耗速度の測定値，総括拡散係数の計算結果をまとめる。スラグ粘度はNakamotoら⁹⁾の示した推算式を用いて1500℃における値を計算して得た。スラグ比（排出スラグ質量/排出メタル質量）は対象高炉の平均的な値で，これを用いて出銑量とスラグ排出速度の換算を行った。SL材，ML材それぞれの不飽和度($c_{\text{sat}} - c$)は2.2項で示したとおりである。得られた総括拡散係数は文献値と同じ桁であった¹⁰⁾。

Table 1 Calculation conditions and results

Calculating conditions	
Slag density / kg・m ⁻³	2800
Slag viscosity / Pa・s	0.266
Slag ratio / -	0.30
($c_{\text{sat}} - c$) for SL castable / -	0.41
($c_{\text{sat}} - c$) for ML castable / -	0.20
Temperature / °C	1500
Observed results	
Corrosion rate of SL at lower part of main trough / m・d ⁻¹	4.3×10^{-3}
Corrosion rate of ML at lower part of main trough / m・d ⁻¹	5.1×10^{-3}
Calculated results	
D_{overall} Of SL / m ² ・s ⁻¹	3.1×10^{-10}
D_{overall} Of ML / m ² ・s ⁻¹	11.2×10^{-10}

mass transfer coefficient (k_{overall}) and overall diffusion coefficient (D_{overall}) were adopted in this paper.

2.3 Corrosion rate and slag flow rate

Fig. 2 shows a schematic illustration of the liquid flow in a main trough. The corrosion rate per unit time and the corrosion rate per unit metal quantity were calculated under the hypothesis that (1) at the lower part of trough, slag flow speed can be calculated from drainage rate and trough sectional area since laminar flow is achieved there, (2) the sectional area of the trough is constant. Thus, the overall diffusion coefficient (D_{overall}) can be estimated from the mass transfer coefficient (k_{overall}) determined by corrosion rate of the lower part and slag flow rate (v_s) calculated from drainage rate and trough sectional area.

On the contrary, the flow speed at the upper part of the trough is much higher since it is turbulent flow. According to the conclusion described by Kosaka et al.⁵⁾, the slag flow speed at upper part was assumed 10 times the lower part.

3. Analyzed Results and Discussion

3.1 Overall diffusion coefficient

The analysis was done for a blast furnace of which the inner volume is over 4500m³ in Japan. Table 1 summarizes the calculating conditions, the measured corrosion rate at the lower part of the trough, and estimated overall diffusion coefficient. Slag viscosity was determined by the empirical equation proposed by Nakamoto et al.⁹⁾ The slag ratio (drained slag mass/drained metal mass), which was the averaged value for the furnace, was used to convert the metal drainage speed to the slag drainage speed. The saturation degrees ($c_{\text{sat}} - c$) of the SL castable and ML castable have been already described in section 2.2. The estimated values for the overall diffusion coefficients were the same as described elsewhere¹⁰⁾.

Despite the corrosion rate of the ML being approximately 1.2 times that of the SL, the

ML材とSL材の比較では、ML材の損耗速度はSL材の約1.2倍であるにも関わらず、総括拡散係数はML材の方が約3.7倍大きい値となった。これは、ML材の不飽和度がSL材に比較して小さいためである。今回の解析で取り扱っている物質はSi, Al, Oであり、SL材とML材ではその比が異なるのみである。それにも拘わらず総括拡散係数に大きな差が生じているのは、物質移動の過程や律速段階が異なるためである。

SLの損耗は、(1)表面SiCの酸化、(2)表面へのスラグの濡れ上り、スラグフィルム(SF)の形成、(3)スラグ浸透、(4)スラグ浸透部でのSiCの酸化、(5)SiC酸化部分からの SiO_2 と Al_2O_3 の溶出、のような多くの過程からなり、スラグ浸透部内への酸素の供給過程が律速段階と考えられている^{1,8)}。さらに、SLにおける物質移動には、SF内の表面張力差に起因するスラグ内でのスラグ流れが物質移動に影響するとされている¹⁾。

一方、MLの損耗についても、(1)濡れによる耐火物表面へのスラグの垂れ下がり、耐火物-メタル間へのSF形成、(2)耐火物とメタルの反応によるSF内濃度勾配の発生、(3)SF内の濃度勾配に伴う局所的な表面張力勾配の発生、(4)メタル中の炭素とSF中の SiO_2 との反応によるCO気泡生成、(5)CO気泡のバブリング効果によるSF運動の活発化と耐火物溶解の促進、という多くの過程が明らかにされている²⁻⁴⁾。MLにおける局部損耗の律速段階はSF中に溶解した耐火物成分の除去速度であり、この除去速度を支配するのがスラグフィルムの運動であるとされている³⁾。従って、律速過程の観点からは、SLであればスラグ浸透部内への酸素の供給速度の測定値で、MLであればスラグフィルムの運動による耐火物成分の除去速度の測定値で、今回得られた総括拡散係数を説明できれば、さらに厳密な議論となる。

このように、過程と律速段階が異なる物質移動を総括的に扱う場合、対象となる物質が同じ場合でも、総括拡散係数は大きく異なる。今回のケースでも、状態図から見積もった不飽和度のみから判断するとML材の方が耐食性に優れる結果となるが、実際の樋ではSL材の方が損耗速度は小さ

estimated overall diffusion coefficient was 3.7 times that of the SL. This is attributable to the higher saturation degree of ML castable. Although the substances which were taken into account were only Si, Al, and O and only the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of the castables differed, a relatively larger difference in the overall diffusion coefficient was recognized. This is considered attributable to the difference in the mass transfer process and rate determining step.

SL castable dissolves through the following steps: (1) oxidization of surface SiC and SiO_2 formation, (2) lifting up of slag along the refractory surface due to the wettability and formation of slag film (SF), (3) slag penetration, (4) SiC oxidation in slag penetrated region, and (5) dissolution of SiO_2 and Al_2O_3 . In the process, oxygen supply to the slag penetrated layer is considered to be the rate determining step. Furthermore, the slag flow induced by the surface tension gradient in SF also affects the mass transfer of SL castable corrosion.

On the other hand, the ML castable dissolution reaction steps are as follows: (1) slag hanging down along the refractory surface due to wettability and the formation of a slag film (SF), (2) origination of concentration gradient in SF due to the reaction between the refractory and metal, (3) origination of localized surface tension gradient accompanied by concentration gradient, (4) formation of CO bubbles as a result of the reaction between carbon in metal and SiO_2 in SF, (5) promotion of refractory dissolution as a consequence of activated movement of SF induced by bubble stirring. In the process, rate determining step is removal of refractory component dissolved in SF controlled by SF movement. Thus, a very accurate model of the transfer process will be achieved when the overall diffusion coefficients of the SL are interpreted by the oxygen supply rate and the overall diffusion coefficients of the ML is interpreted by the removal speed of the refractory composition of the SF in terms of the rate determining step.

い。これはSLとMLでは溶出過程が異なるためであると考えられる。

3. 2 出銑量と損耗速度

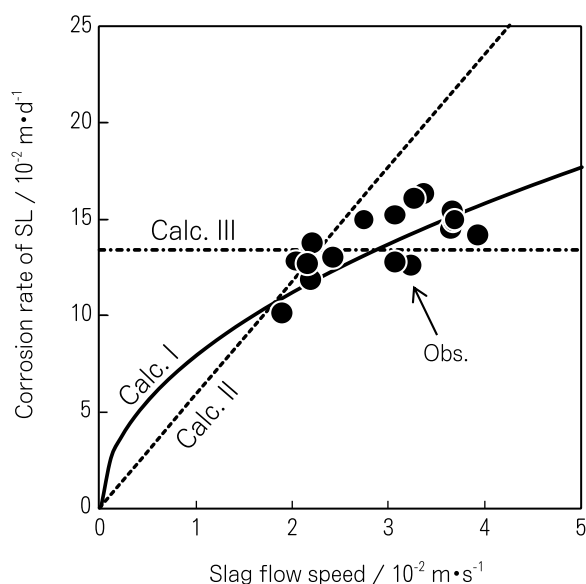
今回の解析で得られたそれぞれの総括拡散係数を用い、小坂ら⁵⁾の検討を参考に上流における流速は出銑量と樋の断面形状から計算される値の10倍であるとして、SL, MLの損耗速度を計算した。計算結果を実測値に重ねてプロットしてFigs. 3, 4に示す。Figs. 3, 4には、Calc. I; 本検討における物質移動モデルによる計算結果, Calc. II; 単位通銑量当たりの損耗速度を一定とした場合の計算結果, および, Calc. III; 単位時間あたりの損耗速度を一定とした場合の計算結果を示した。

Figs. 3, 4より、物質移動モデルによる計算(Calc. I)は損耗速度をよく再現したことがわかる。また、Calc. II, IIIとの比較より、高炉が増産した場合、単位通銑量あたりの損耗速度は小さくなるため修理までの通銑量は増加する一方、単位時間あたりの損耗速度は大きくなるため修理まで

As discussed above, the overall diffusion coefficient differs from each mass transfer process even if the subjected substances are the same. In this case, depending on the saturation degree assessed from the phase diagram, the corrosion resistance of the ML castable would be superior to the SL castable. In practice, however, the corrosion rate of the SL is smaller than that of the ML. This is attributable to the difference in the dissolution process.

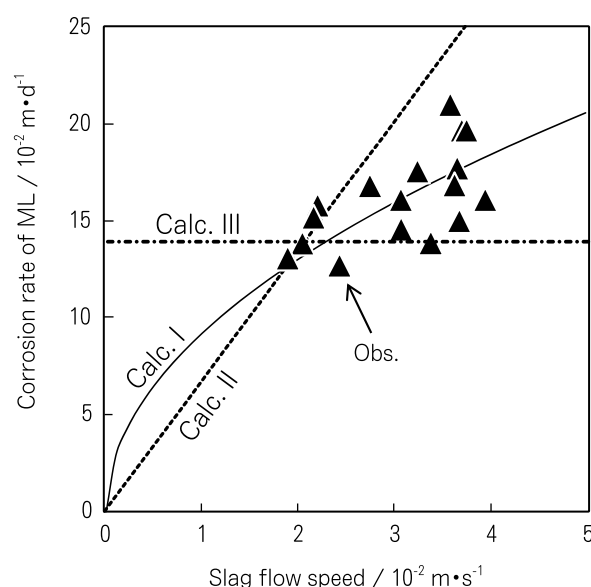
3. 2 Corrosion rate and BF productivity

Assuming that the slag flow speed of the upper part of the trough is 10 times faster than that of the lower part, the corrosion rate of SL and ML were calculated by using estimated overall diffusion coefficients. Figs. 3 and 4 show overlays of the calculated results plotted on variations of the corrosion rates as a function of slag flow speed. Both Figs. 3 and 4 include three curves that Calc. I; the results calculated by the mass transfer model proposed in this



- Calc. I Corrosion rate was calculated by mass transfer model
 Calc. II Corrosion rate was constantly $4.0 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{kg}_{(\text{metal})}^{-1}$
 Calc. III Corrosion rate was constantly $13 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$

Fig. 3 Comparisons of corrosion rate of BF trough SL among observed data and calculated results.



- Calc. I Corrosion rate was calculated by mass transfer model
 Calc. II Corrosion rate was constantly $3.5 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{kg}_{(\text{metal})}^{-1}$
 Calc. III Corrosion rate was constantly $14 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$

Fig. 4 Comparisons of corrosion rate of BF trough ML among observed data and calculated results.

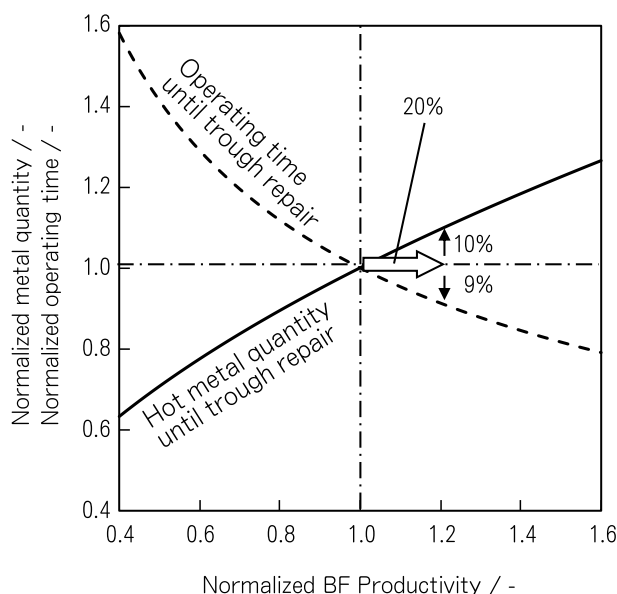


Fig. 5 Normalized changes of operation time and amount of hot metal for one campaign of main trough as a function of BF productivity.

の日数が低下し工程がタイトになる、という現象が理解できる。これは、出鉄量と流速は比例するのに対し、総括物質移動係数(k_{overall})は流速の1/2乗に比例するためである。

このような出鉄量と主樋の損耗速度の関係を指数化してFig. 5に示す。Fig. 5より、高炉の出鉄量が20%増えると稼働日数は9%短縮する一方、通鉄量は10%延長することが予想できる。今回のモデルを用いることで、出鉄計画の変更に対応した樋修理計画の変更や耐火物原単位の予測や管理を高い精度で行うことができる。

3. 3 溶鉄温度と損耗速度

一般的に、溶鉄温度が高くなると損耗速度が大きくなる傾向が知られているが、今回の物質移動モデルは、溶解度、拡散係数、粘度、という温度依存性のある物性値が含まれている。そこで、それらの物性値を温度に合わせて変化させた計算を行い、損耗速度に与える温度の影響を評価した。スラグ粘度に与える温度の影響は、Nakamotoら⁹⁾が示した推算式を用い、拡散係数はHendersonら¹⁰⁾が示した実験データの傾きを用いて値を変化させた。また、スラグへの溶解度も温度の影響を受け

study, Calc. II; the results calculated under assumption that corrosion rate per unit metal quantity is constant, and Calc. III; the results calculated under assumption that corrosion rate per unit time is constant.

As shown in Figs. 3 and 4, the mass transfer model proposed in this study (Calc. I) reproduces corrosion rate dependences on slag flow speed. When productivity rises, the corrosion rate predicted by the model (Calc. I) is smaller than the value expected by the assumption that corrosion rate per unit metal throughput is constant (Calc. II). Consequently, the passing metal quantity until trough repair increases. On the other hand, when productivity rises, the corrosion rate shown by Calc. I is larger than that of expected by the assumption that corrosion rate per unit time duration is constant (Calc. III). As a result, days until trough repair decreases. It is because the metal productivity is proportional to slag flow speed while the overall mass transfer coefficient (k_{overall}) is proportional to the 1/2 power of slag flow speed.

Fig. 5 shows the theoretical changes in corrosion rate as a function of furnace productivity. Both corrosion rate and productivity were normalized by the average value. According to Fig. 5, when BF production increases in 20%, passing metal quantity until trough repair increases in 10% while the operating time until trough repair decreases in 9%. Based on the prediction by using the diagram, the accuracy of the alterations of trough repair schedule and/or the assessment of the unit consumption in accordance with the changes of the furnace production schedule becomes higher.

3. 3 Effect of temperature on corrosion rate

It is widely recognized that the corrosion rate increases as the hot metal temperature increases. Since the proposed mass transfer model includes the variables showing temperature dependences such as viscosity, diffusion coefficient, and solubility, the effect of temperature on corrosion rate was evaluated by calculation. The variation of slag viscosity was determined by the empirical

るが、Fig. 1より今回試算した温度範囲ではほとんど変化しないことがわかり、一定値とした。Table 2に計算に使用したスラグ粘度および拡散係数を、Fig. 6に損耗速度とスラグ流速の関係を示す。これより、SL, MLとも、温度が50℃高くなると損耗速度が約35%大きくなることが示された。ただし、この試算は今回得られた式を用いたもので、温度が変わっても損耗速度の律速過程は変わらないことが前提となっており、注意が必要である。

4. 結論

高炉主樋の損耗速度に及ぼす出鉄量の影響をスラグ流速の影響と考えてFickの法則に基づく物質移動モデルで検討した。モデルに基づく計算値は

Table 2 Influence of temperature on slag viscosity and overall diffusion coefficients

Temperature / °C	1490	1500	1510	1520	1530
Slag viscosity / Pa·s	0.291	0.266	0.244	0.224	0.206
Diffusion coefficient of SL / $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	2.48	2.71	2.96	3.24	3.54
Diffusion coefficient of ML / $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	9.41	10.3	11.2	12.3	13.4

equation investigated by Nakamoto et al.⁹⁾ and the variation of the overall diffusion coefficient was estimated under the assumption that the slope of the diffusion coefficient-temperature plot investigated by Henderson et al.¹⁰⁾ holds true for this study. Though solubility also changes as temperature changes, it was assumed constant since the variation is little in the temperature range researched in this study as shown in Fig. 1. Table 2 summarizes the slag viscosity and diffusion coefficient used for the calculation. Fig. 6, in which the calculated results are shown, indicates that corrosion rate of both SL and ML increases approximately 35% when the temperature rises 50℃. However, attention should be paid to the calculated results since the calculation requires the hypothesis that the rate determining step holds true for the considered temperature range.

4. Conclusion

The influence of productivity on the trough corrosion rate was analyzed by a mass transfer model based on Fick's law by assuming that the variations in slag flow speed in accordance with changes in blast furnace productivity effect to

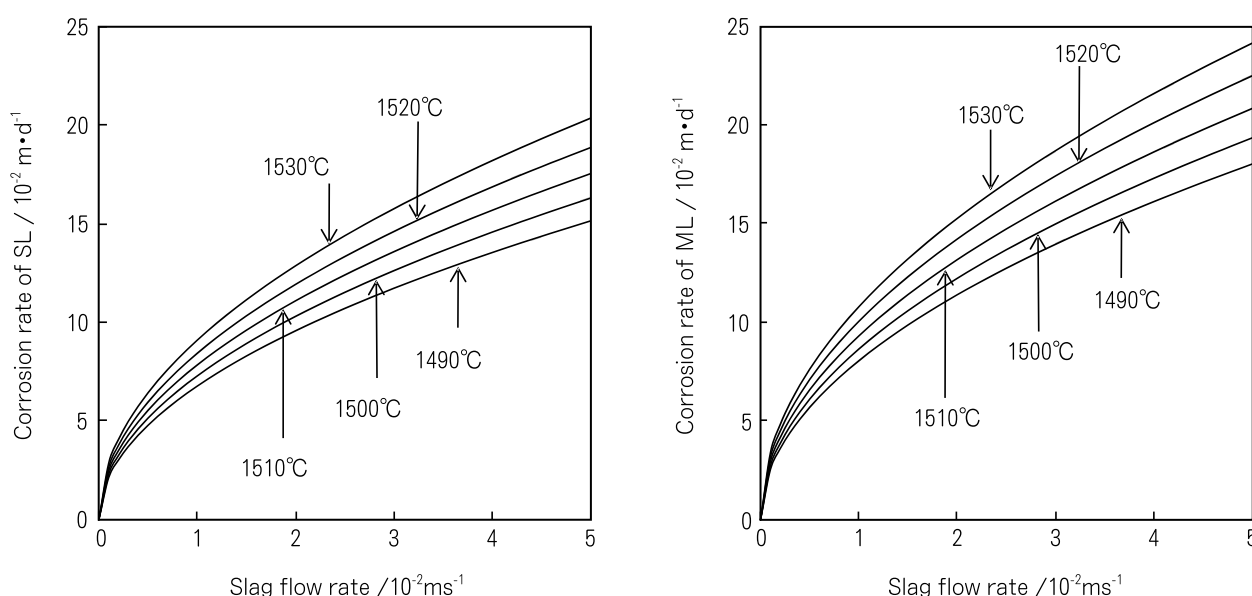


Fig. 6 Influence of temperature on BF trough SL and ML corrosion rates.

実測値とよく一致し、高炉が20%増産した場合、単位時間あたりの損耗速度が増大、修理までの日数が9%低下する一方、単位通銑量あたりの損耗速度は小さくなり、修理までの通銑量は10%増加することが示された。これは、総括物質移動係数が流速の1/2乗に比例するためである。このように、今回検討した物質移動モデルに基づくと、出銑計画の変更に対応した樋修理計画の変更を高い精度で行うことができる。また、物質移動モデルの物性値の温度依存性を考慮した計算を行うことで、溶銑温度が高くなると損耗速度が大きくなるという一般的に認識されている傾向を説明することができた。

the trough corrosion rate. The calculated results showed good agreement with the observed data. By using the model, a 20% increase in furnace production was assessed. The corrosion speed per unit metal quantity was confirmed to decrease by 10% resulting in reduced refractory unit consumption, while the corrosion speed per unit time confirmed to increase by 9% resulting in a tight trough repair schedule. This is because the overall mass transfer coefficient is proportional to 1/2 power of slag flow speed. According to the model, the trough repair project can be changed corresponding to the change in the furnace production plan with high accuracy.

References

- 1) K. Mukai, T. Masuda, J. Yoshitomi, T. Harada, and S. Fujimoto : Tetsu-to-Hagane, 70 [8] 823-829 (1984).
- 2) K. Mukai, J. Yoshitomi, T. Harada, K. Hurumi, and S. Fujimoto : Tetsu-to-Hagane, 70 [6] 541-548 (1984).
- 3) J. Yoshitomi, T. Harada, K. Hiragushi, and K. Mukai: Tetsu-to-Hagane, [3] 411-418 (1985).
- 4) J. Yoshitomi, K. Hiragushi, and K. Mukai: Tetsu-to-Hagane, [11] 1535-1542 (1987).
- 5) S. Kosaka, N. Muroi, K. Isomura, M. Takagi, and M. Kumagai : Taikabutsu, 50 [10] 540 (1998).
- 6) M. Hiraoka and M. Tanaka : Theory of transport phenomena (in Japanese), Asakura-shoten, Tokyo p. 143 (1971).
- 7) K. Mukai: Taikabutsu, 61 [4] 158-164 (2009).
- 8) M. Iida and K. Ogura: Taikabutsu, 62 [4] 175-184 (2010).
- 9) M. Nakamoto, Y. Miyabayashi, L. Holappa and T. Tanaka : ISIJ International, 47 [10] 1409-1415 (2007).
- 10) J. Henderson, L. Yang and G. Derge: Trans. Met. Soc. AIME, 221 56 (1961).