

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

新設計マルチホールプラグの攪拌効果と 溶損状態に関する計算解析および 水モデル実験結果

Results of Computational Analysis and Water
Model Experiments on the Stirring Effect and
Abrasion State of a Newly Designed
Multi-Hole-Plug

Haysler LIMA
Douglas GALESI
Vladnilson RAMOS
Hamilton GUIMARÃES
Isaque GRANUZZIO



報文／REPORT

新設計マルチホールプラグの攪拌効果と溶損状態に関する計算解析 および水モデル実験結果

Results of Computational Analysis and Water Model Experiments on the Stirring Effect and Abrasion State of a Newly Designed Multi-Hole-Plug

Haysler LIMA ^{*1}Douglas GALESI ^{*2}Vladnilson RAMOS ^{*3}Hamilton GUIMARÃES ^{*4}Isaque GRANUZZIO ^{*4}

要 旨

製鉄所全体のパフォーマンスは各設備の安定操業の上に成り立っている。転炉では溶鋼成分の均一化に有効な複合吹錬により、スラグ中のT-Feの低減、すなわち鉄の歩留まり向上を図りつつ脱リン反応の促進が可能となる。複合吹錬では炉底に複数の不活性ガス吹込み用羽口れんがを用いる。羽口の操業において、様々な流体力学現象が生じ耐火物の損傷が増大、寿命低下や吹錬不能を誘発する。本研究では溶鋼の攪拌効率を向上させ、かつ、損耗を抑制し複合吹錬の効率向上を可能とする羽口設計について検討した。

Abstract

The performance of a steel mill relies heavily on the stability of its production equipment, with combined blowing being crucial to ensure the chemical homogeneity of the steel, thereby decreasing the total iron content in slag (metallic yield) and enhancing the dephosphorization rate. The combined blowing system comprises a set of tuyeres for injecting inert gases from the bottom. During tuyere operation, various fluid dynamic phenomena occur, leading to increased refractory wear, decreased lifespan, and disruptions in combined blowing operations. This study aimed to develop a new tuyere design to enhance the steel mixing rate and reduce wear, ultimately improving the efficiency of combined blowing.

1. 緒言

転炉(Basic Oxygen Furnace: BOF) 操業は溶銑、スクラップ、石灰、フラックスを装入することから始まる。酸素吹き込みにより、溶銑中の炭素は酸化されてガス(COとCO₂)となり、ケイ素、マンガン、鉄は酸化されてスラグに移行する。一次精錬として知られるこのプロセスは近代製鉄の肝である。一次精錬された鋼は溶鋼鍋に出鋼され、

1. Introduction

The steel manufacturing process in Basic Oxygen Furnace (BOF) converters begins with the loading of liquid pig iron, steel scrap, lime, and fluxes. Through oxygen blowing, elements like carbon, silicon, manganese, and iron itself transform into oxides that either go to the slag or incorporate into the gas (CO and CO₂). This process, also known as primary

* 1 Innovation Manager, Shinagawa Refratários do Brasil Ltda.

* 2 Technical Director, Shinagawa Refratários do Brasil Ltda.

* 3 Technical Manager, Shinagawa Refratários do Brasil Ltda.

* 4 Designer, Shinagawa Refratários do Brasil Ltda.

LF, RH, ガス吹き攪拌, といった二次精錬処理で脱ガス, 脱硫, 脱炭, 脱酸, 熱補償を受ける。

転炉の吹錬には以下の3つの方法がある。

- ・水冷ランスを用いた酸素上吹き。高圧の酸素が高速で鋼浴に吹き込まれ脱炭, 脱硫を始めとする不純物除去を行う。
- ・炉底鋼浴中に設置された羽口からの底吹き。酸素や不活性ガス, 場合によっては石灰, 石炭, 炭化水素化合物(石油や天然ガス)が吹き込まれる。
- ・複合吹錬。酸素の上吹きと炉底羽口からの攪拌用の不活性ガスの吹込みが行われる。

複合吹錬は, 攪拌効率の向上や炉底中央部における滞留領域の低減を図り, 特に, 鋼中カーボンが低下してCOガス発生が減少する吹錬末期に効果的である。炉底からのアルゴン吹込みにより攪拌がさらに強化され, 脱リン, マンガン歩留まりの向上, スラグ中Feの低減が促進される。吹錬条件の改善により, 鉄歩留まり向上, フラックス低減, 耐火物寿命延長が可能となる。炉底からのアルゴン吹込みは羽口と呼ばれる部材を通して行われる。羽口はガス供給用の複数のステンレスパイプを中央に配した耐火物ブロックで, MHP (Multi Hole Plug) と呼ばれる。

MHPは転炉の炉寿命を決定する最大損耗部位となるため, 損耗が進行し安全残厚を下回るとガス吹き機能を停止させ, 閉塞させることがある。MHPの損耗は, 不活性ガス(例えばアルゴンガス)が耐火物を通過する際の熱衝撃やアブレーションによって生じる。この際, ガスの流れは流量や細管の直径, 吐出圧力などによって制御され, その結果として生じる溶鋼の流れと耐火物との相互作用によって異なる損耗プロファイルとなる。これらの現象は, しばしば流体力学的に説明がなされている。ガスの流れには, バブリング領域, 遷移領域, ジェット領域の3つのステップがあり, 特にジェット領域では「バックアタック」という現象が起こり, ガス攪拌による周期的な溶鋼の流れが耐火物のアブレーションを引き起こす(Fig.1)。著者らの2011年の研究報告の中では, 220tのLD転炉の水モデルを用いて, MHPから吐出したガス流れをシミュレートし, 最適なガス吹き条件を決定することができた。Fig.2はその結果で, 2つのMHPの細管配列(1つはジグザグ配列, もう1つは円環配列)におけるガス流量, 混合完了時間, およびノズル損耗速度の関係が示されている。いずれの配列においても, 混合完了時間は流量が増加するにつれ

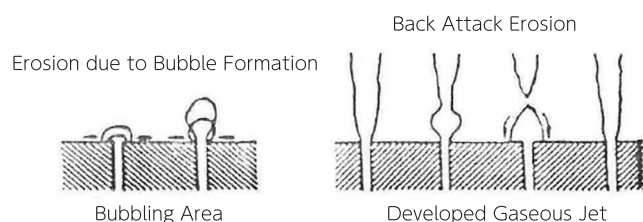
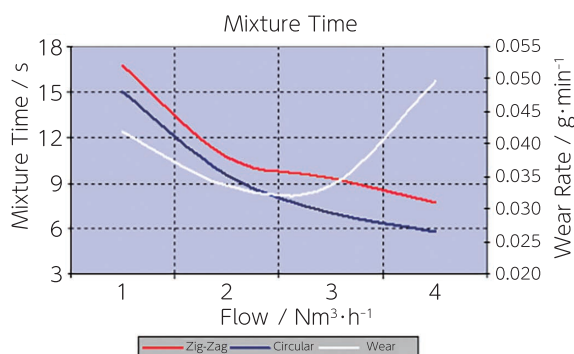
refining, is the heart of modern steelworks. The steel is then poured into the ladle, which assists in the subsequent treatment of steel, known as secondary refining (Ladle Furnace, RH Degasser, Bubble Station, etc.). At this stage, the steel undergoes processes of degassing, desulfurization, decarburization, deoxidation, and heating.

There are three methods of operation in the BOF converter:

- ・Oxygen blowing from the top through a refrigerated lance. Oxygen, at high pressure and speed, penetrates the metallic bath, promoting the removal of carbon, phosphorus and other elements;
- ・Oxygen blowing from the bottom through tuyeres submerged in the metallic bath. Oxygen and inert gas are injected. In some practices, lime, coal and hydrocarbons (oil and/or natural gas) are also injected;
- ・Combined blowing, characterized by the blowing of oxygen from the top and additional agitation by the injection of inert gas from the bottom, through tuyeres.

Combined blowing in the converter increases bath agitation and reduces areas of stagnation in the central region of the bottom, especially towards the end of blowing when CO generation decreases due to the reduction in the carbon content of the steel. Argon injection from the bottom promotes additional agitation, favoring dephosphorization, increasing manganese yield, and reducing the iron content in the slag. With improved refining conditions, there is an increase in metal yield, reduction in flux consumption, and increased refractory lifespan. Argon injection from the bottom of the equipment is done through special components called tuyeres, composed of a refractory block internally composed of stainless steel tubes (Multi Hole Plug - MHP), which conduct the gas.

The lifespan of a tuyere usually does not match that of a converter, requiring its closure to prevent wear on the rest of the converter. Wear mechanisms associated with tuyeres are related to working conditions, including thermal shock due to the passage of inert gas through the tuyeres. During gas injection, fluid dynamic phenomena occur, causing premature tuyere wear, eventually requiring closure over time, interrupting the agitation process and

Fig. 1 Types of gas flow regimes in the tuyeres⁶⁾.Fig. 2 Mixing time and wear results²⁾.

て減少し、最終的には一定となる傾向が見られた。一方、この解析では、MHP損耗速度は高流量域および低流量域の両側で大きくなり、損耗速度が最小となる流量2.5Nm³/hに最適点があることを確認した。

質量流速無次元数 (N_G) は、ガス吐出口流速とガス密度に関係し、流速が入口流量およびガス注入管の直径に依存していることを示す無次元数であり、以下の式(1)で示される。

$$N_G = \frac{\rho v}{\rho^* v^*} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ρ 、 v 、 ρ^* 、 v^* は、
 ρ ：使用温度と圧力におけるガス密度
 v ：ガス流速
 ρ^* ：標準温度・圧力条件におけるアルゴン密度
 v^* ：音速
 により与えられる。

更に、 N_G の値から以下のようにガス領域を区分する。
 $N_G < 1$ バブリング領域 (大きい損耗速度)
 $N_G = 1 \sim 2$ 遷移領域 (中間程度の損耗速度)
 $N_G > 2$ ジェット領域 (大きい損耗速度)

質量流速無次元数 (N_G) を調整する方法の一つは、ステンレス細管の内径を変えることで、内径を大きくすること

impairing steel quality. Gas expansion generates different flow profiles, causing interaction of the argon jet with the refractory. This profile is controlled by gas flow rate, argon tube diameter, and injection pressure.

There are three types of gas flow regimes: Bubbling regime, transition regime, and Back attack regime as shown in Fig. 1.

“Back attack” is the phenomenon related to the gas impact on the tuyere upon return after expansion/rupture, this cyclical process triggers refractory wear. The bubbling regime (low flow) erosion occurs due to bubble expansion (cavitation).

Lima's work in 2011, through physical modeling of a 220 t LD converter, aimed to simulate the operating conditions of combined blowing. Two tuyere configurations were evaluated (zig-zag and circular), with Fig. 2 showing the mixing time and wear rate results for both configurations. It was observed that the mixing time sharply decreases with increasing flow rate and tends to stabilize. The tuyere wear rate exhibited a peculiar behavior. For both high and low flow rates, wear increased, with an optimal operating point at a flow rate of 2.5 Nm³/h in the model.

There is a dimensionless number that correlates these effects, called the Mass Velocity Dimensionless (N_G), which depends on the gas outlet velocity and its density. The velocity depends on the inlet flow rate and the argon gas injection tube diameter as indicated in Equation (1).

$$N_G = \frac{\rho v}{\rho^* v^*} \quad \dots\dots\dots(1)$$

Where, ρ : gas density at working Temperature and Pressure, v : gas velocity; ρ^* : argon density at CNT, v^* : sound velocity.

By adopting N_G , gas flow regimes are classified as follows.

- $N_G < 1,0$ – bubbling regime (High wear)
- $N_G = 1 \sim 2$ – transition (Normal wear)
- $N_G > 2,0$ – developed jet (High wear)

One way to adjust the dimensionless number (N_G) is by changing the flow rate or the internal diameter of the tuyere. Increasing the internal diameter leads to a decrease in gas passage velocity.

The present work aims to present a new MHP tuyere technology that addresses the problems of

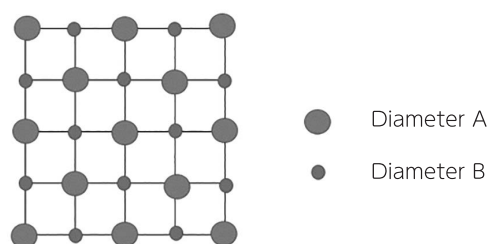


Fig. 3 Distribution of a tube mesh (Diameter A and B).

でガス流速が低下し、 N_G の値を小さくできる。

本研究では、MHPの新しい設計アプローチを提案し、異なる内径の細管を交互に配置した新設計MHP (Fig.3) を使用することで、損耗速度を低減し攪拌効率を向上させることを目指す。 N_G を調整することで同じガス流量でも耐火物損耗を引き起こす流体力学的影響を最小にできる。大きな内径のパイプは流速を低下させ小さな内径のパイプで速い流速を得る。細管設計最適化とガス流速の調整によって、総流量は同一でも吐出部では3つの領域のガスがパイプ先端で交互に生成する。これにより吐出ガスの相互作用を促進し耐火物の損耗を低減する。すなわち、隣り合うパイプから吐出される複数の領域の流れ、例えばバブリング領域とジェッティング領域、が相互作用、遷移領域の流れを形成し損耗速度低減に寄与する。

2. 研究方法

2.1 数値モデル (計算解析)

新設計MHPの評価のために国際的に認められたソフトウェアを使用して数値モデリングを行い、有限体積法 (Finite Volume Method: FVM) を用いて流体の微分方程式を解いた。有限体積法は流体の特性や境界条件を設定した検査体積を離散化する解析手法であり、MHPから溶鋼へ吐出されるガス流れの挙動を可視化することが可能である。今回、シミュレーションを実際の現象に近いものとするための計算テクニック上の配慮を行った。

シミュレーションの対象は吐出口近傍のガス流れであるためMHPノズル上部の円筒形領域 (Fig.4) を解析対象とし、2つの形状を比較した。1つは「標準モデル (EAR2438)」で、すべての60本の細管の直径を2 mmに固定した。もう1つは「新設計モデル (PROP-4)」で、1.9 mmと2.1 mmの細管を交互に配置した。解析は、直径90 mm、高さ120 mmの小さな円筒形領域で行った。

the state of the art by using internal tubes with different diameters instead of working with a fixed diameter per MHP, Fig.3. This modifies the gas injection pattern to reduce wear and increase bubbling efficiency in converters during the combined blowing process. By controlling N_G , for the same operating flow rate, the effects of erosion caused by fluid dynamic phenomena can be minimized. A larger internal tube diameter results in lower velocity, while a smaller diameter results in higher velocity. By controlling the flow regimes of the internal tube, regardless of the inlet flow rate, all three regimes are achieved at the outlet, alternating between tubes. This promotes interaction of the outlet gases, avoiding erosion due to the breakdown of this effect. That is, while one tube generates a bubble-type phenomenon, the adjacent tube forms the Back Attack, and since they are close, gas interaction occurs. Thus, both tend to transition to the intermediate regime, minimizing the erosive effects of each extreme regime.

2. Methodology

2.1 Mathematical modeling

To comparatively evaluate the present solution, it was decided to perform a mathematical modeling of the proposed system. In this case, the technique of solving differential equations (fluids) using the Finite Volume Method (FVM) was recommended for such analysis. For this, specific software is used to design the proposed system. A discretization of the Control Volume is performed, boundary conditions and properties of the involved fluids are inserted. With this tool, it is possible to visualize the fluid dynamics that occur in the gas outlets through the tuyere injecting into the liquid steel.

In this case, some technical considerations were made to ensure that the simulation represents something close to reality. This tool is internationally recognized for simulations of fluid dynamic processes. In the adopted model, a cylindrical cut above the tuyere (Control Domain) was emphasized to represent what happens at this gas outlet.

In this study, two models were compared. In the case of the standard situation with the same diameter (EAR 2438) and the proposal with alternating tube diameters (PROP-4). For EAR 2438, the diameter was fixed at 2 mm for 60 tubes. And

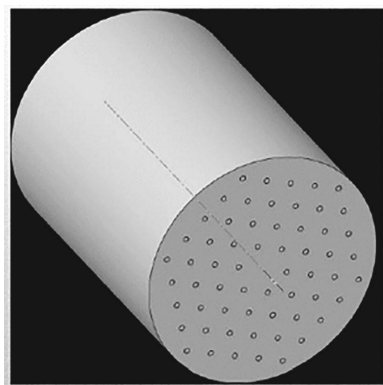


Fig. 4 Control Domain.

Table 1 Physical properties considered for steel and argon

Propriety	Symbol	Unit	Steel	Argon
Density	ρ	kg·m ⁻³	7200	0.639
Viscosity	μ	Pa·s	6.2×10^{-3}	2.25×10^{-5}
Superficial Tension	σ	N·m ⁻¹	1.60	
Temperature	T	K	1823	
Pressure	P	Pa	242541	

本研究では解析条件を以下のように設定した。

- ・解析流体は1823 K (1550 °C) 温度一定とする。
 - ・非圧縮性流体とする。
 - ・アルゴン密度は、温度と圧力を考慮した理想気体の状態方程式によって推定する。
 - ・分散領域のアルゴン気泡径は2 mmとする。
 - ・各相ごとに速度場を計算する。
 - ・乱流モデルはstandard k- ϵ を使用する。
 - ・解析時間を5 ms (時間ステップ: 0.01 ms) とする。
 - ・初期条件は領域全体で速度0 mとする。
 - ・配管内では20, 150, 240 Nm³/hのアルゴン均一流とする。
 - ・領域の側面と底面は平滑面とする
 - ・領域上部は解放領域として流体が流入出する条件とする。
- 鋼の特性としてTable 1に示した値を使用した。

2. 2 実験モデル (水モデル実験)

転炉底吹きの実験条件をシミュレーションするため、330トン転炉の1:14の実験モデルを透明なポリプロピレン容器内に構築した。このモデルは幾何学的、力学的、運

in the case of PROP-4, 30 tubes of 1.9 mm and 30 tubes of 2.1 mm were distributed alternately in a symmetrical manner.

A transient analysis of a small cylindrical region around the tuyere outlet with a diameter of 90 mm and a height of 120 mm was conducted, being the control volume for analysis.

For simulations, the following parameters were considered:

- ・Isothermal system at 1823 K (1550 °C).
- ・Incompressible fluids.
- ・Argon density estimated by the ideal gas law considering the bath temperature and an extra pressure of a 2 m steel column.
- ・In the dispersed region, argon forms 2 mm diameter bubbles.
- ・Velocity fields calculated for each phase.
- ・Turbulence taken into account by the standard k- ϵ model.
- ・Simulated physical time: 5 ms (time step: 0.01 ms).
- ・Initial and boundary conditions
- ・Initial condition: steel at rest inside the entire domain.
- ・Injector ducts: uniform flow of 20, 150 or 240 Nm³/h of argon.
- ・Lateral and bottom of the domain: hydraulically smooth walls.
- ・Top of the domain: opening condition allowing the exit of all phases and eventual entry of steel.

The steel properties were listed in Table 1.

2. 2 Physical modeling

To simulate the operating conditions of a BOF bottom with tuyeres during bottom blowing, a physical model was built in a transparent polypropylene container, with a scale of 1:14 compared to a 330 ton vessel. The method consists of establishing criteria for geometric, dynamic, and kinematic similarity. A cylinder was used as a project, representing a cut of the tuyeres region. Fig. 5 and 6 show the scheme of the physical modeling of the tuyeres.

Water was chosen as the fluid for simulation because the kinematic viscosity and flow lines are similar to those of liquid steel. Compressed air will be used to simulate argon injected through the tuyeres.

Fig. 7 shows the tuyeres printed in 3D, being the Standard and the Proposal.

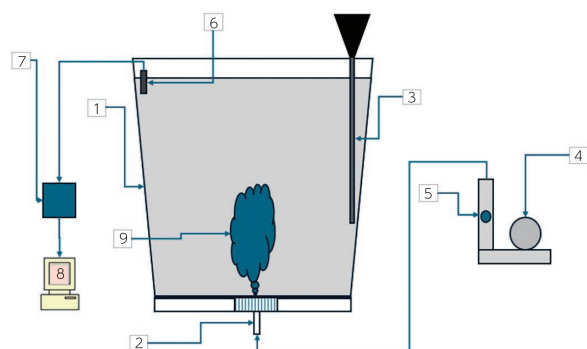


Fig. 5 Scheme of the tuyeres physical modeling.

Subtitle

- 1 Ladle
- 2 MHP
- 3 KCl additon
- 4 Manometer
- 5 Rotameter
- 6 Conductivity meter
- 7 Date Collector
- 8 Data Storage
- 9 Air Plume



Fig. 6 Assembly of the tuyeres physical model.



Fig. 7 Tuyeres on the 3D Printer.

動学的な相似基準に基づいており、MHPの一部を切り取った円柱を用いた。Fig.5およびFig.6に実験モデルを示す。このシミュレーションでは、水を流体として使用した。粘性率と流動線が溶鋼に近似しているためである。吹込みガスとして圧縮空気をを用いた。Fig.7に3Dプリンターで作成した「標準モデル」と「新設計モデル」のMHPの画像を示す。

2. 3. 1 混合時間の評価

混合時間を評価するために白金製の導電率センサーを準備し、水と塩化カリウム (KCl) の水溶液に電流を通し、その電流値を記録した。KClを加え、3Dプリンターで作製したノズルモデルから圧縮空気を注入して攪拌、KClの分布が均一になると溶液の電気伝導率が一定値になる。著者 (2011) は同じ方法の実験で羽口の状況がLD転炉の混合時間に与える影響を評価した。混合時間は、導電率が最終値の $\pm 5\%$ に達した時点とした。

圧縮空気流量は、校正済み回転計を用いて測定した。今

2. 3 Experiments

2. 3. 1 Evaluation of mixing time

To evaluate the mixing time under various conditions, a conductivity sensor made of platinum will be fabricated. Its function is to record electrical currents passing through the aqueous solution of water and potassium chloride (KCl). By adding KCl, it homogenizes as agitation is promoted by the injection of compressed air through the tuyeres. As a result, the electrical conductivity of the solution changes, reaching a constant value when KCl is evenly distributed. Lima (2011) used the same procedure to evaluate the mixing time in a physical model of the LD converter by studying different tuyere configurations. As a criterion for stopping the mixing time, it was when reaching $\pm 5\%$ of the final conductivity value, the mixing time is obtained.

For measuring the injected air flow rate, the use of calibrated rotameters connected to the compressed air supply network is proposed in this work. In this case, a standardized value of 40 l/min was set at a pressure of 0.5 bar. For the assembly of the tuyeres, parts made in the 3D printer were used, with the current design (EAR-2438) and Proposal (PROP-4). These tuyeres will be connected to the compressed air supply network, controlling the inlet pressure and flow rate (l/min).

2. 3. 2 Evaluation of tuyeres wear rate

To simulate wear, a soluble polymer 3D printing material was used. It is intended to measure the wear rate (g/min) during bottom blowing air injection. The test parameters of the water model simulation were a) flow rate = 40 liters/min; b) total blowing

回の実験では圧力0.5 bar, 流量40 l/min.を標準値とした。ノズルモデルとして「標準モデル」と「新設計モデル」の2つモデルを使用して流量と圧力をコントロールして圧縮空気を供給した。

2. 3. 2 MHP損耗速度評価

MHPの損耗を再現するために、可溶性ポリマー3Dプリンティング材料を用いて、ボトムブロー中の損耗率を測定する実験を行った。この水モデル実験では流量40 l/min, 総ブロー時間を40 sに設定し、「標準モデル (EAR-243)」と「新設計モデル (PROP-4)」を比較した。

3. 結果及び考察

3. 1 数値シミュレーション

150 Nm³/hの均一流量でアルゴンガスを吐出させた場合の、0 msから1.2 msの間における流体力学シミュレーションによる計算結果をTable 2, Table 3に示す。

「標準モデル (EAR-2438)」と「新設計モデル (PROP-4)」の性能を比較するために、吐出初期に近い時間 ($t=0.2$ s) を基準にした。2つのモデルは高さが同じで直径が異なるため、それぞれの場合のシミュレーション領域の体積は異なる。従って、シミュレーションにおけるモデルは、最初と同じガス流量で異なる体積の溶鋼を攪拌し、

time = 40 sec. Same conditions were carried out for both current design (EAR-2438) vs Proposal (PROP-4) for comparison.

3. Results and Discussion

3. 1 Numerical simulation results

Comparative images between the quantitative results of the fluid dynamic simulation of the argon gas injection effect through the mathematically modeled tuyere, at a uniform flow rate of 150 Nm³/h, during 0 ms to 1.2 ms, can be seen in Table 2.

To compare the performance of the tuyeres PROP-4 and EAR-2438, an instant of time close to the initial one ($t=0.2$ s) was taken as a reference, as:

As the two tuyeres have the same height and different diameters, the volume of the simulated domains in each case is different.

Therefore, the tuyeres in the simulations agitate initially different volumes of steel with the same gas flow rate, which vary over time with different relative speeds. Comparison is facilitated when the volume of steel has practically not changed in each case, which occurs close to the beginning of the simulation.

Table 2 Quantitative results: throughout the simulation-150 Nm³/h (EAR-2438)

Time / ms	Gas Volume / m ³	Steel Volume / m ³	Interfacial Area / m ²	Specific Interfacial Area / m ⁻¹
0.0	7.63E-19	7.63E-04	0.00E+00	0
0.2	2.33E-05	7.40E-04	1.32E-02	565.8
0.4	4.65E-05	7.17E-04	1.87E-02	402.1
0.6	6.97E-05	6.94E-04	2.13E-02	305.5
0.8	9.29E-05	6.70E-04	2.28E-02	245.2
1.0	1.16E-04	6.47E-04	2.39E-02	205.5
1.2	1.39E-04	6.24E-04	2.48E-02	178.1

Table 3 Quantitative results: throughout the simulation-150 Nm³/h (PROP-4)

Time / ms	Gas Volume / m ³	Steel Volume / m ³	Interfacial Area / m ²	Specific Interfacial Area / m ⁻¹
0.0	1.36E-18	1.36E-03	0.00E+00	0
0.2	2.34E-05	1.33E-03	1.43E-02	613.7
0.4	4.66E-05	1.31E-03	2.36E-02	505.9
0.6	6.98E-05	1.29E-03	3.03E-02	434.0
0.8	9.30E-05	1.26E-03	3.53E-02	379.3
1.0	1.16E-04	1.24E-03	3.91E-02	336.7
1.2	1.40E-04	1.22E-03	4.22E-02	302.2

時間と共に異なる相対速度で変化する。シミュレーション初期はそれぞれのケースで溶鋼の体積が実質的に同等であるため、両者の比較に適している。

Table 2 と 3 に強調表示した値を比較すると、「新設計モデル (PROP-4)」の比表面積が高いことがわかる。これは、溶鋼と注入されたガスバブルの相互作用が大きいことを意味する。この場合、熱力学的反応を促進する利点がある。

定量的な評価の結果は次の通りである。「新設計モデル (PROP-4)」は、直径が交互に配置されているため、各吐出孔からのガスジェットの合体が少ない。その結果、攪拌される溶鋼の体積も大きくなるにもかかわらず、見掛けのガス界面の面積が大きくなった。これは、溶鋼とガスの相互作用が、「標準モデル (EAR-2438)」より「新設計モデル (PROP-4)」の方が大きいことを示し、溶鋼と吐出ガスとの間の熱および物質移動速度が大きいことを示唆している。

Fig.8に、150 Nm³/hのアルゴンガス流量における「標

In comparison with the highlighted values in Tables 2 and 3, it can be observed that the Specific Interfacial Area was higher for the new Proposal. This implies a greater interaction between the metal and the injected gas bubble. In this case, a benefit to facilitate the involved thermodynamic reactions. The quantitative results presented indicate that:

The PROP-4 tuyere, due to its alternating diameters, provides less coalescence of the gas jets from each hole. As a result, the specific gas interfacial area is greater for the PROP-4 tuyere, even though the agitated steel volume is also greater. This indicates that the metal-gas interaction is greater for the PROP-4 tuyere than for the EAR-2438 tuyere, which may imply higher rates of heat and mass transfer between the liquid steel and the injected gas.

To visualize the fluid dynamic effects, Fig. 8 show a comparison between the effect of argon gas flow rate at a flow rate of 150 Nm³/h, during 0 ms to 1.2 ms, comparing the standard situation and the proposal.

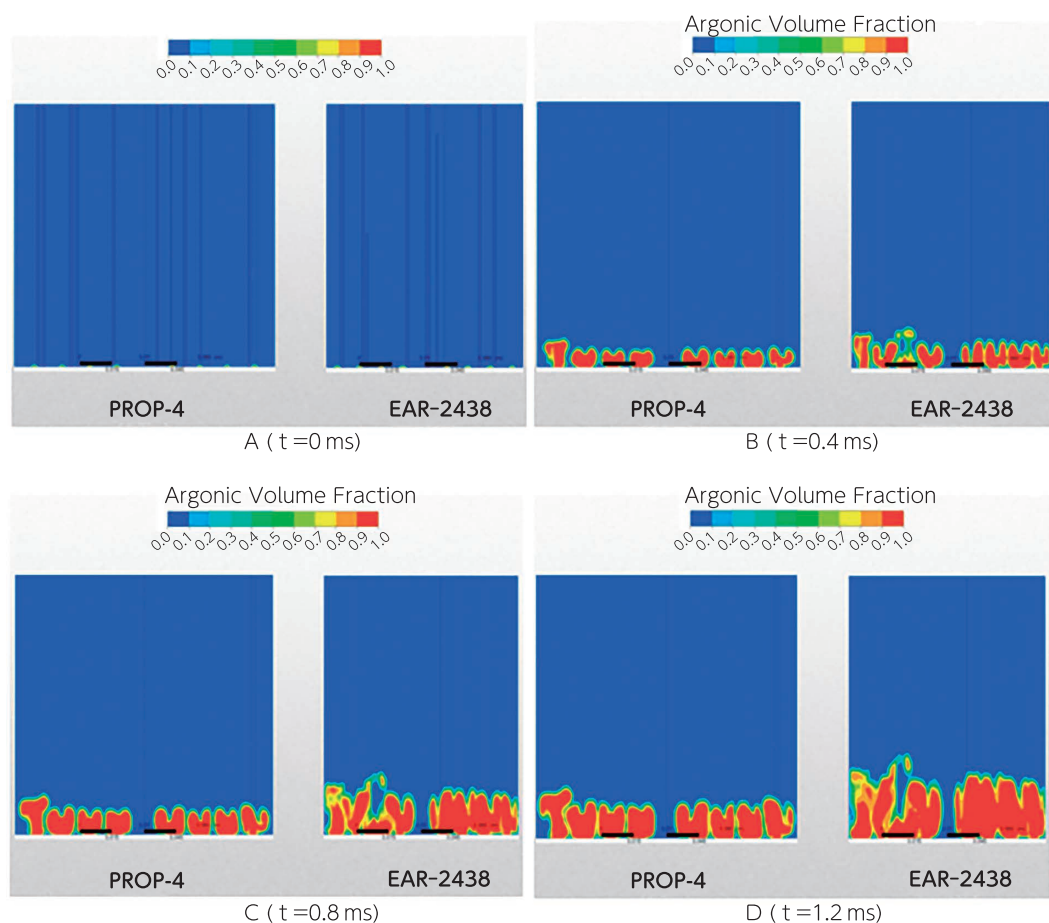


Fig. 8 Evolution of the argon jet comparative between PROP-4 and EAR-2438 (time 0 to 1.2 ms).

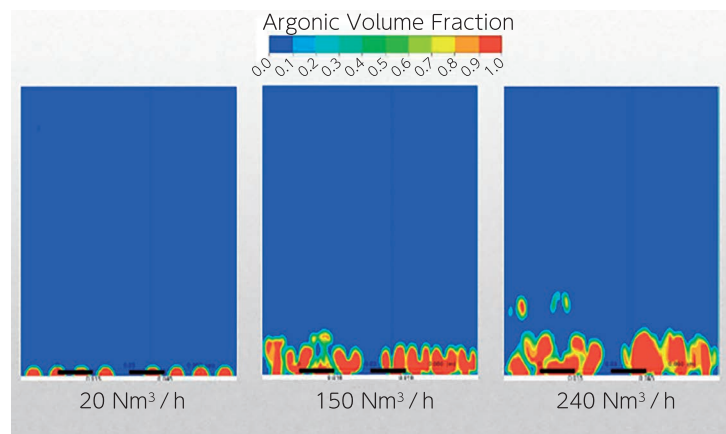


Fig. 9 Flow rate comparison for EAR-2438.

準モデル (EAR-2438)」と「新設計モデル (PROP-4)」の 0 ms から 1.2 ms の間のガス流れを示す。同流量、同じ進行時間で比較すると、「標準モデル (EAR-2438)」では 0.4 ms でガスジェットにネックが形成され、バックアタック現象を示すガスジェットからの完全な離脱が観察された。一方、「新設計モデル (PROP-4)」では同様の現象は発生しないことが分かった。

「標準モデル (EAR-2438)」において、流量が 20, 150, 240 Nm³/h の場合の計算結果を比較すると、流量が最も低い場合、ガス吐出は均一で安定しており、ガスは細管の間で膨張し、Fig. 9 に示すようにその表面を覆う傾向があると結論される。流量が徐々に増加すると、各孔からのガス流の大きさと形状が不均等になり、さらに、気泡が時折離脱する (後に破断を生じる) などの遷移領域の流れが発生し始める。これらの遷移領域の流れのパターンは、バックアタックによる MHP の損耗を引き起こす。

2 つのノズルを定量的に比較した結果、鋼浴に伝達される総運動量によって評価される鋼浴攪拌能力は「新設計モデル (PROP-4)」がわずかに有利であるがほぼ同等であった。一方、「新設計モデル (PROP-4)」はその周囲でより低速での攪拌を促進するため、損耗が少ないと考えられる。さらに、「新設計モデル (PROP-4)」は気泡の離脱傾向が低く、その結果、バックアタック現象の影響を受けにくいと考えられる。

3. 2 混合時間

Fig. 10 に、攪拌実験における「標準モデル (EAR-2438)」および「新設計モデル (PROP-4)」電気伝導度の時間変化のプロットを示す。混合完了時間の基準として電気伝導

When compared at the same flow rate and evolution time, the formation of a neck in the gas jet at 0.4 ms in EAR 2438 (standard) is observed, and its complete detachment from the jet, showing the back attack phenomenon. The same does not occur in the Proposal PROP-4 (new design).

The comparative analysis of the flow rates of 20, 150, and 240 Nm³/h for the Standard Case (EAR-2438) allows concluding that for the lowest flow rate, the gas outlet is stable and homogeneous, with the gas expanding between the holes of the tuyere tending to cover its surface, Fig. 9. With the progressive increase in flow rate, the gas flow from each hole become unequal in size and shape; additionally, transient patterns begin to occur, including occasional detachment of bubbles, which may later rupture. These transient patterns can lead to refractory wear through the mechanism of Back Attack.

Quantitative results comparing the two proposals indicate that both tuyeres have virtually the same bath agitation capacity measured by the total momentum transmitted to the bath, with a slight advantage for Tuyere PROP-4. Nevertheless, Tuyere PROP-4 promotes agitation at lower speeds in its surroundings, which may lead to less wear. Additionally, Tuyere PROP-4 shows a lower tendency for bubble detachment and, consequently, may be less susceptible to the “back-attack” phenomenon.

3. 2 Mixing time

After measuring the electrical conductivity in bottom stirring tests, graphs were plotted for each configuration, as observed in Fig. 10.

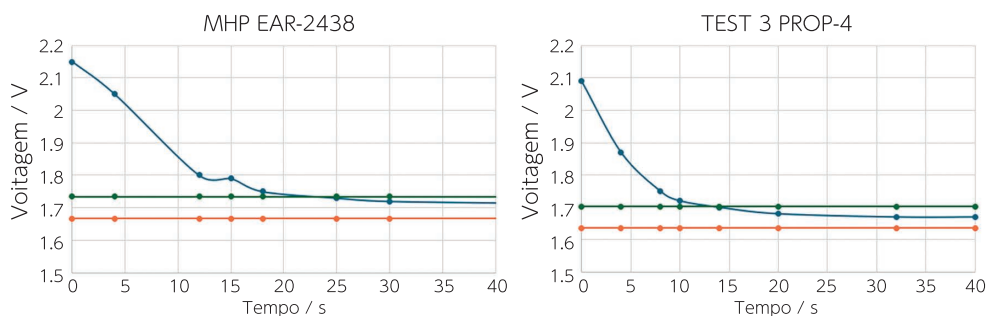


Fig. 10 Mixing time (EAR-2438 and PROP-4).

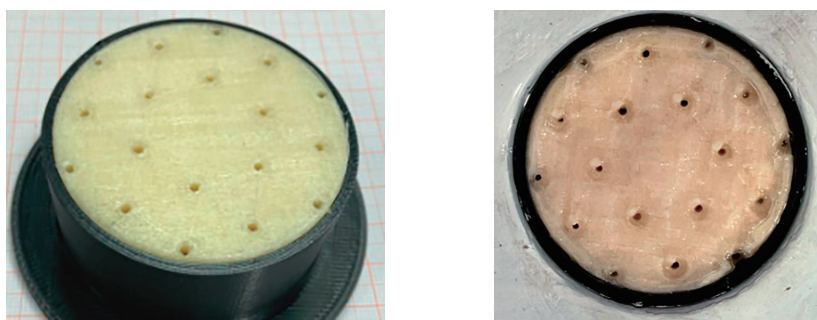


Fig. 11 Wear tests on the tuyere specimens using water soluble polymer as 3D printing material.

度の変動が最終的な安定値から $\pm 2\%$ になる時間を設定した。3回の試験結果から、「標準モデル(EAR-2438)」の平均安定化時間は23.7秒であった。一方、「新設計モデル(PROP-4)」では9.7秒であり、つまり、混合完了時間が「標準モデル(EAR-2438)」に対しておよそ14秒短縮された。この結果は、「新設計モデル(PROP-4)」が複合吹錬の品質、すなわち生産効率の向上に寄与することによる転炉吹錬における鉄歩留まりの向上を示唆していると考えられる。

3. 3 MHP損耗速度

Fig.11に実験前および実験後の溶融性ポリマー3Dプリンタ材で作製したMHPモデルを示す。流量60 l/min, 吐出圧力0.5 kgf/cm²で30分間試験を行った後、試料を取り外してモデルの溶解速度を測定した。モデルの損耗は明確に目視で確認でき、円錐形のくぼみがノズル孔周辺に見られた。「標準モデル(EAR-2438)」では、0.13 g/min.という損耗速度を示し、「新設計モデル(PROP-4)」では、試験後0.115 g/min.を示した。つまり「新設計モデル(PROP-4)」のノズル損耗速度は11.5 %減少した。

As a criterion for evaluating mixing time, it was decided to use a variation of $\pm 2\%$ from the final stabilization value. In other words, when the value falls within this range, the elapsed time is recorded. In this case, the stabilization time for EAR-2438 in three tests was 23.7 seconds (average). For the new proposal PROP-4, in three tests, it was 9.7 seconds (average). A reduction in mixing time by 14 seconds is excellent for validating the new technology. This reduction implies an improvement in the quality of combined blowing, greater efficiency, which translates to better metal yield in the BOF.

3. 3 Tuyere wear

After 30 minutes of testing at a flow rate of 60 l/min and injection pressure of 0.5 kgf/cm², the worn tuyere was removed to measure the dissolved rate. Wear on the nozzles was evident, with a conical formation (depression) and connection between nozzles, resulting in wear across the nozzle area as a whole. Fig. 11 shows the new tuyere and after wear tests.

The proposed PROP-4 configuration showed a rate of 0.115 g/min after testing. The current project

4. 結言

転炉底吹き羽口に関して計算解析および水モデル実験により、「標準モデル (EAR2438)」および「新設計モデル (PROP-4)」を比較、評価したところ以下の結果が得られた。

- ・数値シミュレーションにより「新設計モデル」において鋼浴槽中における気泡の比表面積が増加を確認、冶金学的効果の向上が期待できる。
- ・数値シミュレーションによると「新設計モデル」では吐出されるガスの状態が変化し、バックアタック現象は確認されなかった。
- ・水モデル実験によると「新設計モデル」の混合時間は、「標準モデル」より14秒短縮された。
- ・水モデル実験によると「新設計モデル」の損耗速度は11.53 %の減少がみられた。

これら計算およびラボ実験の結果は、様々な意思決定の助けとなるものである。自然科学に基づく方法でこの技術の潜在的な可能性が明らかになった。次のステップは、冶金効率と耐火物の損耗を測定するための実炉試験である。

EAR 2438 presented a higher rate of 0.13 g/min. In other words, there was a reduction of 11.53 % in the wear rate due to the new tuyere proposal.

4. Conclusions

According to both numerical and physical modeling results, it was possible to compare the two tuyere configurations, and it was found that:

- There were improvements in terms of surface area in the new proposal, resulting in better metallurgical outcomes;
- Numerical simulation shows profile differences, and the back-attack phenomenon is not observed in the new proposal;
- Mixing time was reduced by 14 seconds compared to the standard tuyere configuration;
- In wear tests shows 11,53 % reduction, indicating high potential for industrial use.

These results, both mathematical and physical, assist in decision-making. Through the scientific method, we have proven the high potential of this technology, with the next step being industrial testing for measurements of metallurgical efficiency and refractory wear.

References

- 1) LIMA, H. Modelagem Física do Sopro Combinado. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2011. (Dissertação de Mestrado).
- 2) LIMA, H et al, Physical Modeling of Combined Blown – Steelmaking and Refractory – The 6th European Oxygen Steelmaking Conference (EOSC), September, 2011 – Stockholm/Sweden.
- 3) SINGH, V., KUMAR, J, BHANU, C., AJMANI, S. K., DASH, S. K. Optimisation of the Bottom Tuyeres Configuration for the BOF Vessel Using Physical and Mathematical Modelling. Isij International, v. 47, n.11, p1605, 2007.
- 4) SU, C. J., CHOU, J. M., LIU, S. H. A Study on the Effect of Botton Blowing Conditions on Refractory Erosion in the Ironmaking Smelter by Water Modeling. Taiwan: Kaohsiung, 1999.
- 5) RICCI, M., WATERFALL, S., SUN, S. Optimization of Botton Stirring in the 165-tonne Electric Arc Furnace at Arcelor Mittal Dofasco. Austria: RHI Bulletin, 2008.
- 6) BARÃO, C. D. Sopro Combinado – Curso Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio. Vitória: Associação Brasileira de Metais, 2005.
- 7) LEE, M. S., EVANS, T., J. Control of Refractory Back Attack and Tuyere Metal Penetration During Bottom Gas Injection in the BOF. Iron & Steelmaker, 2003.