

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

焼却炉用耐火物の耐食性を評価する 新規定量指標の検討

A New Quantitative Criterion to Determine Slag Corrosion Resistance of Refractories for Incinerators

Johannes BOERSMA
Annelies NIEWIJK
Zhenlan GAO



焼却炉用耐火物の耐食性を評価する 新規定量指標の検討

A New Quantitative Criterion to Determine Slag Corrosion Resistance of Refractories for Incinerators

Johannes BOERSMA *¹Annelies NIEWIJK *²Zhenlan GAO *³

要 旨

有害廃棄物焼却用のロータリーキルンの耐火物ライニングを最適化するために多くのサプライヤーから供給される耐火物の評価と選定を工業的規模で行おうとすると、キルンの運転期間である約23ヶ月という長期間を要する。また、その試験可能数は隔年もしくは年あたり1～2製品であり、実機での寿命評価は時間がかかりすぎる。一方、実験室でのるつぼ試験で耐火物試料へのスラグの影響を評価するのは迅速だが、従来から行われていたスラグ浸潤領域の目視判断は同じような材質の材料をテストするときは判別が困難で、ときにはその試験結果が誤解を招くこともある。そこで本研究では、10種類の市販アルミナ-クロミアレンガを対象に、るつぼ試験後サンプルの化学組成をSEMおよびEDSを用いて定量分析し、そこで得られたデータから算出した“侵食比”という無次元数で表される定量的な評価基準を用いて上記対象材の耐食性を評価した。この指標と対象材中のクロミア含有量との間には良い相関があることが確認できた。更にこの基準によって得られた定量的な評価結果は実機試験結果とも一致した。

Abstract

Selecting the most suitable refractory lining from various types/grades of products provided by different suppliers for the hazardous waste incineration rotary kiln is not an easy job to reach a 23-month lifetime. Real-life industrial scale test is time-consuming, i.e., only one or two new products can be tested each year or every other year. Crucible test is a fast way to give a first assessment to test the adaptability of a given product to a slag. However, the classic visual observation to determine the slag penetration zone is usually inconclusive when the materials of the same group are tested and can be sometimes misleading. In this study, crucible tests were performed for 10 commercial chromia-corundum bricks from various sources. After examined with detailed analysis with SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), highly precise quantitative values of corrosion zones width for samples are derived. A non-dimensional number, the Wear ratio, is introduced as a quantitative criterion to characterize the refractory corrosion resistance. By using this Wear ratio, a correlation is found with the chromia concentration. Quantitative results obtained by this criterion are in line with the real-life observations of industrial scale tests.

*¹ Technical Manager, Gouda Refractories.

*² Researcher R&D, Gouda Refractories.

*³ R&D Suez Groupe, Suez Groupe.

Veolia Environment社がSuez社の株式に対する公開買付けを行い、2022年1月18日に完了した。2022年1月31日、Meridiam社、Global Infrastructure Partners社、Caisse des Dépôts et Consignations社、CNP Assurances社からなる投資家連合が、新しい企業グループ（新SUEZ社）を設立し商標保有を維持することを目的として、Suez社の事業と資産の一部を買収した。

本報においては著者が所属する事業体がVeolia Environment社であることに留意が必要である。

Veolia Environment filed a public tender offer for Suez shares, which was settled on January 18, 2022. On January 31, 2022 a consortium of investors consisting of Meridiam, Global Infrastructure Partners, Caisse des Dépôts et Consignations and CNP Assurances acquired part of the business and assets with a view to creating a new company named SUEZ which remains the owner of the trademark.

In this context, please note that the entity of which the author is an employee is staying in the perimeter remaining with Veolia.

1. 緒言

焼却は、産業や医療事業から出る様々な有害で危険な廃棄物を無害化するための最も一般的な処理方法の一つである。中でもロータリーキルンと二次燃焼炉を組み合わせた焼却システムは最も柔軟性の高い産廃処理設備であり、液体、固体、気体の様々な形態の廃棄物を処理することができる^{1,2)}。また、焼却可能な廃棄物の化学組成は、専用施設内で焼却しなければならない一部の放射性物質を除き、周期表上のほとんどの元素が該当する³⁾。このように廃棄物の形態や組成は様々であるため、事業の収益性は、焼却する廃棄物の種類と価格、処理設備、特にロータリーキルン、の稼働率に大きく依存する。焼却ラインの停止原因は、ほとんどがロータリーキルンの操業停止によるもので、そのキルンの停止原因のほとんどが耐火物起因である。

有害廃棄物焼却事業のロータリーキルンにおいて、23ヶ月(2年マイナス隔年オーバーホールのための1ヶ月)の寿命を全うする適切な耐火物の選定と開発は、困難な課題である。特に中国などの新興国で生じる地域ごと/日ごと/週ごとに変動する廃棄物市場に強く依存する灰、スラグ、灰とスラグの混合物、からなる多様な廃棄物の流動を伴いながら操業しているロータリーキルンで顕著である。そうした中で耐火物の選択は、理論的アプローチから始まる。このアプローチは、相図、Slag Atlasのような書籍、FactSageやThermal-Calcなどのソフトウェアに基づいて実際の温度と化学成分を想定して実施される。次に、得られた理論的アウトプットが正しいかを検証するために実験が行われる。実験に際しては、実際の使用時の化学的・熱的条件に近づけるように条件が決められる。具体的には、るつぼ試験、ドリップ試験、回転スピンドル試験、回転炉試験⁴⁾があり、このうちのるつぼ試験は、業界で最も広く利用される試験である。

るつぼ試験は、この中でも実験室条件下で耐火物の耐食性を把握するために一般的に用いられる⁵⁾。耐食性は、例えば、目視でスラグ浸透層の寸法を測定することで評価される。るつぼ試験にはいくつかの欠点があるが(機械的・熱的損傷の影響がほとんどない、熱勾配がないなど)、得られた結果は試験したスラグや用途に対する材料の適合性について合理的な一定の方向性を与える(試料の特性の違いが大きい場合)。

るつぼ試験は、異なる種類の耐火物(例えばアルミナ-クロミアレングとアンドルサイトレング)を評価するのに非常に有用であるが⁶⁾1つの材質系内でレングをランク付け

1. Introduction

Incineration is one of the most common treatment methods to eliminate a large range of hazardous and dangerous wastes from industrial and medical business. The incineration line combining a rotary kiln and a secondary combustion chamber (also called post combustion chamber) is the most flexible incineration design, which can process liquid, solid and gaseous wastes^{1,2)}. The chemical composition of the wastes to be incinerated can contain any chemical elements found in the periodic table. There are only some exceptions for radioactive materials which have to be incinerated within dedicated facilities³⁾. Due to the varying composition the profitability of the business relies largely on the types and gate prices of wastes to be incinerated and on the availability of the equipment, especially the rotary kiln. The unavailability of the incineration line is mostly due to the rotary kiln shutdown, for most of which, the refractory damage is the first cause.

Selection and development of suitable refractory materials that have a lifetime of 23 months (2 years minus 1 month for bi-annual overhaul) in a rotary kiln in the hazardous waste incineration business is a challenging task. Especially for the kilns operating in ash, slag, and mixed modes with various waste streams, depending heavily on the local & daily/weekly fluctuating waste market in emerging countries, such as China. For the refractory material selection, the first approach is theoretical. This approach is based on: phase diagrams, books such as Slag Atlas, and software like FactSage or Thermal-Calc. Experimental tests are then used to confirm the theoretical outputs. These tests are designed to approach the real-life service chemical and thermal conditions. Some of the common experimental tests performed are the crucible test, drip test, rotating spindle test and rotary furnace test⁴⁾, of which, the crucible test is the most commonly used test in this industry.

Crucible tests are generally accepted to describe, under laboratory conditions, the corrosion behaviour of refractory materials⁵⁾. Corrosion behaviour is e.g., described by measuring the dimensions of the visible infiltrated zone. Although crucible tests have some disadvantages (no mechanical and/or thermal wear present, no thermal gradient present) the results are giving a reasonable direction about the suitability of the materials for the tested slag/application (when variations between bricks are significant).

Although crucible tests are very useful to

するのは非常に困難である(例えば、焼却プラント管理者が耐火物を発注する前に、異なるサプライヤーから提供された類似の種類の原料で作られた類似の化学組成を持つ複数のアルミナ-クロミアれんがをランク付けすることは困難である^{*4)})。本報告では、材質系内のれんがをランク付けする新規かつ定量的なアプローチを紹介する。なお、本報告で扱った材質系は、アジアとヨーロッパのいろいろなサプライヤーから入手したクロミア含有量の異なるアルミナ-クロミアれんがである。

2. るつぽ試験

2.1 試験材料：アルミナ-クロミアれんが

二次燃焼室付きロータリーキルンは、今日、有害廃棄物の処理に最も一般的に使用されている焼却システムである^{5,7)}。ロータリーキルンにライニングされる耐火物の損耗は、熱衝撃(例えば、常温の液体、固体状またはスラッジ状の廃棄物の投入、キルン回転による熱的・機械的サイクルによる疲労)、機械的衝撃(例えば、ドラム缶のような裁断されていない固体廃棄物の投入)、摩耗(例えば、固体廃棄物)、侵食(アルカリを多く含む熔融灰、廃棄物の組成変化、HF、HCl、SO₂、SO₃のような腐食性ガス)によって引き起こされる。多くの場合、全ての損耗の組み合わせが存在するため(主に、化学的浸透と熱衝撃の複合作用の結果としての剥落による)⁸⁾、ロータリーキルンのライニングは、アルミナ-クロミアれんが(Al₂O₃-Cr₂O₃)が望ましく、特に全て/一部の操業でスラグを処理する場合は有効である。

アルミナ-クロミア耐火物は、化学的安定性が高く、熔融スラグと反応して高温で安定な化合物を生成する傾向があるため、ロータリーキルン焼却炉に一般的に使用されている⁹⁻¹¹⁾。すなわち、スラグと耐火物の界面に固溶体が形成され、スラグと耐火物の相互作用が小さくなり、耐火物のスラグへの溶解が遅くなる。また、熔融スラグとクロミアとの反応により、スラグ中の鉄分が減少し、スラグの粘度が上昇する。それらの結果、耐火れんがへのスラグの浸透深さが減少する⁷⁾。見掛け気孔率、密度、クロミア含有量、冷間圧縮強度、耐スラグ浸透指数、耐スポーリング性などの因子がライニング寿命に及ぼす影響について多くの研究がなされている。その中でアルミナ-クロミア耐火物は、数十年来、様々なサプライヤーによって改良されてきた⁹⁻¹¹⁾。

distinguish between different types of refractory materials⁶⁾ (e.g., corrosion of chromia corundum bricks vs andalusite bricks), it is very hard to rank the bricks within one group of materials (e.g., ranking several chromia corundum bricks with similar chemical compositions made of similar types of raw materials provided different suppliers before placing the purchase order by the incineration plant^{*4)}). In this paper, a novel/quantitative approach of ranking bricks within a group of materials will be presented. The group of materials presented in this paper include chromia corundum bricks from various sources: different suppliers in Asia and Europe, with varying chromia content.

2. Crucible Test

2.1 Materials: a brief introduction on chromium bricks

A rotary kiln combined with a secondary combustion chamber is nowadays the most common used system to treat hazardous waste^{5,7)}. Refractory wear in rotary kilns can be caused by thermal shock (e.g., injection of cold liquid, solid or sludgy waste, fatigue due to thermal and mechanical cycling caused by kiln rotation), mechanical shock (e.g., injection of cold solid waste without being shredded, such as drums), abrasion (e.g., solid waste) and/or corrosion (alkali rich molten ash, changing composition of waste, corrosive gases such as HF, HCl, SO₂, SO₃). As most of the times combinations of all types of wear are present (mainly due to the spalling as a consequence of combined effects from chemical infiltration and thermal shock)⁸⁾, a preferable lining in a rotary kiln is based on chromia corundum bricks (Al₂O₃-Cr₂O₃), especially for the kilns operating totally or partially in slag mode.

Chromia corundum refractory materials are commonly used for rotary kiln incinerators because of their excellent chemical resistance and tendencies to form stable high temperature compounds when reacting with molten slag⁹⁻¹¹⁾. A solid solution may form at the slag-refractory interface, which slows down the interactions between the slag and refractory and slows down the dissolution of the refractory into the slag. The reaction between the molten slag and chromia results in an increased viscosity of the slag, by reducing the iron content of the slag. Consequently, the infiltration depth of

*4 通常、耐火物の製造プロセスはサプライヤーによって異なり、マトリックスの微構造や鉱物組成は違うものとなる。製造プロセスは一般的に営業上、技術上の秘密であってエンドユーザーや顧客は世界中の類似した耐火物からそれぞれの使用に適正なものを決定するのはほとんど不可能である。

The fabrication process usually varies from one to the other supplier, resulting in different microstructure or mineral structure of the refractory matrix. Because the fabrication process is generally commercial and technical secret for all the suppliers, it is almost impossible for the end-user/customer to determine which refractory, among dozens of available similar products in the global market, is suitable or is the best for a given application.

Table 1 Material properties chromia corundum bricks

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Density / g·cm ⁻³	3.46	3.38	3.20	3.53	3.54	3.42	3.35	3.36	3.44	3.43
Porosity / %	12.9	16.1	14.7	12.5	11.5	13.0	13.0	13.4	12.4	13.5
Cold crushing strength / MPa	125	146	121	157	105	111	108	141	117	138
SiO ₂ / %	1.75	0.90	7.40	2.08	2.24	2.21	2.40	1.99	2.38	1.88
Al ₂ O ₃ / %	84.08	84.57	76.58	72.77	79.44	83.42	85.99	79.54	75.58	72.25
Fe ₂ O ₃ / %	0.06	0.10	0.28	0.18	0.07	0.11	0.09	0.10	0.15	0.10
ZrO ₂ / %	3.79	3.92	3.20	4.59	4.19	3.71	5.29	5.50	5.33	4.40
Cr ₂ O ₃ / %	9.57	10.08	11.46	19.65	12.86	9.60	4.77	11.39	14.98	19.80

Table 2 Slag composition, main components

Component	Slag
SiO ₂ / %	26.74
Al ₂ O ₃ / %	9.95
Fe ₂ O ₃ / %	32.55
CaO / %	16.06
Na ₂ O / %	2.42
Cr ₂ O ₃ / %	0.25

これらの研究や実際の焼却炉の運転経験から、気孔率が低く、クロミア含有量が高いものが耐火物ライニングの寿命延長に寄与することが示されている。しかし、焼却炉の運転やプラントの管理者にとって、異なるサプライヤーが提供する複数の類似製品からどのアルミナ-クロミアレンガを選択すべきが悩ましく、特に資金管理上、運転およびメンテナンスのスケジュール/コストなどが絡んでくると、一筋縄ではいかない。そのため、実験室のるつぽ試験から定量的にレンガの耐食性を評価するのに役立つ基準を開発することが必要である。

今回、調査した材質系は、さまざまな供給元から入手したクロミア含有量の異なる10種類の市販耐火レンガ（試料A～J）から構成されている。それらの物理的特性と化学組成をTable 1に示す。

2. 2 実験方法

るつぽ試験用の試料を準備するため、レンガ上面の中心に孔を開けた。孔の直径は40mm、深さは35～45mmである（サンプルCは厚みが薄かったため例外的に深さ20mmとした）。各ボーリング孔には、SUEZ社の有害廃棄物焼却炉の灰抽出装置から採取した30グラムのスラグを充填し、同じレンガから切り出した蓋で覆った。使用したスラグの化学組成をTable 2に示す。

slag into the refractory bricks is reduced⁷⁾. Influences of factors such as apparent porosity, density, chromia concentration, cold crushing strength, penetration index and spalling resistances on the lining lifetime have been studied. Improvement on the refractory formulation have been made by different suppliers since decades⁹⁻¹¹⁾. These studies and real-life incinerator operation experiences indicate that lower porosity and higher chromia concentration contribute to prolonging the lifetime of the refractory lining. For incinerator operation or plant manager, however, it is not straightforward which chromia corundum bricks from several similar products provided by different suppliers should be selected especially when financial, operation and maintenance schedule/cost factors come into play. Therefore, it is necessary to develop some criteria to help in assessing the brick's slag corrosion resistance in a quantitative way from laboratory crucible tests.

The investigated group of materials consists of 10 commercial refractory bricks (Sample A-J) originating from various sources and with different chromia contents. The physical material properties and the chemical compositions are listed in Table 1.

2. 2 Method

The samples for the crucible test were prepared by drilling a hole centrally into the top face of the brick. The borehole has a diameter of 40 mm and a depth of 35–45 mm (except for sample C which has a depth of 20 mm due to the limited height of the supplied brick). Each borehole was filled with 30 grams of slag taken from the output of the ash extractor of one SUEZ's hazardous waste incinerator and covered with a lid that was cut from the same brick. The chemical composition of the slag is presented in Table 2.

All samples were simultaneously fired at 1400 °C in a gas fired kiln, with a heating rate of 1 °C/min and

ガス炉を用い、全てのサンプルを同時に焼成した。昇温速度は1℃/minとし1400℃で96時間焼成後、炉内で蓋をしたまま放冷した。

すべてのサンプルを湿式カッターで半分に切断した。断面を写真に撮り、目視で検査した。

2. 3 試験後試料の切断画像

試験後試料の切断面写真をFig.1～Fig.10に示す。

2. 4 目視観察による浸透深さの測定結果

目視観察により、各サンプルのスラグ浸透深さを測定した。この浸透深さはスラグ層の最上部から黒く変色した部分の下端までとして測定した。その結果をTable 3に示す。

a dwell time of 96 hours at 1400℃. At the end of the test the samples were free cooled in a closed kiln.

After firing all samples were cut in half, making use of a water-cooled cutting machine. The cross sections were photographed and visually inspected.

2. 3 Images of the test results

The photographs of the cross sections of the samples are shown in Fig. 1 to 10.

2. 4 Slag infiltration test results

Based on visual observations, the depth of chemical infiltration was measured for each brick. The depth of this zone is measured from the top of



Fig. 1 brick A.

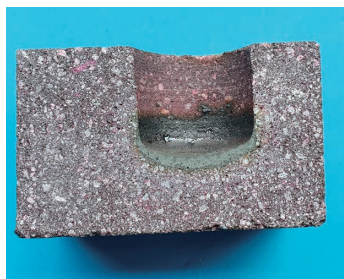


Fig. 2 brick B.

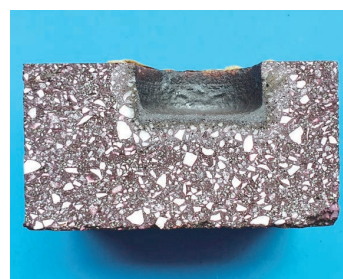


Fig. 3 brick C.



Fig. 4 brick D.



Fig. 5 brick E.

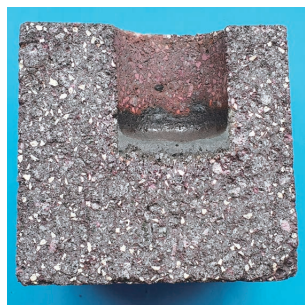


Fig. 6 brick F.

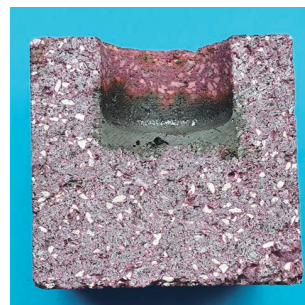


Fig. 7 brick G.

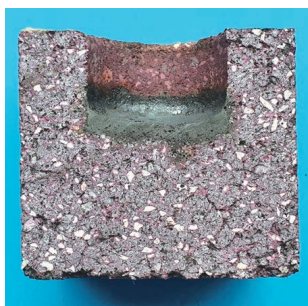


Fig. 8 brick H.

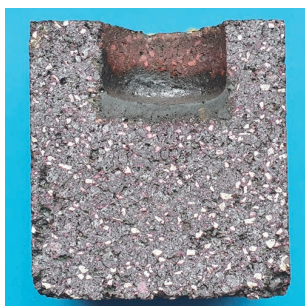


Fig. 9 brick I.



Fig. 10 brick J.

Table 3 Depth of chemical infiltration

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Infiltration depth / mm	3	4	2	4	3	4	5	5	5	4

各サンプルの浸透深さにはわずかな違いが測定された。しかし、浸透層がスラグ、変質れんが、またはその両者で構成されているのかを判断する明確な境界面が存在しないため、目視観察だけでは異なるれんがの耐食性に関する有効な結論を導き出すことはできなかった。この結果より、同様な評価を目的とした研究における目視観察に基づく評価でライニングに最適なれんがを選定するのは困難かほとんど不可能であることがわかる。

3. 定量的評価指標の開発

前節で明らかになったようにれんがの耐食性を目視観察だけで判断するのは難しいため、れんがのランク付けを行う新しい定量的アプローチを開発した。この方法は、それぞれのれんがに対するSEM(Scanning Electron Microscope: 走査型電子顕微鏡)とEDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型分光法)分析を用いたミクロ化学的・ミクロ構造的検討からなる。

3. 1 SEMイメージング

標準のろつば試験に加え、各サンプルの微細構造イメージングと半定量的・化学的ミクロ分析を行った。微細構造は、走査型電子顕微鏡(JEOL JSM-6490LV)により画像化され、データ処理と画像化にはソフトウェアシステムJEOLを使用した。化学的微量分析は、INCAソフトウェアシステムを使用したエネルギー分散型X線分光法(OXFORD X-Act)で行った。すべての試料は、後方散乱電子検出器(BSE)を使用し、作動距離10mm、加速電圧15kV

the slag layer to the end of the dark discolored area. These measured depths are listed in Table 3.

There are slight variations between the infiltration depths of the different samples. However, it is not clear, based on the visual observations, whether these infiltrated zones consist of slag, corroded brick, or a combination of both, because there are no distinctive interfaces. Therefore, it is not possible to draw (based on visual observations of Fig. 1 - 10) a compelling conclusion on the slag resistance of the different bricks. This confirms the general experience in similar research attempts that it is difficult or even impossible to select the most suitable brick for the refractory lining, based merely on these inclusive visual investigation results.

3. Quantitative Assessment Criterion Development

As becomes clear from Section 2.3, it is difficult to determine the corrosion resistance of bricks based solely on a visual observation of the corroded area. Therefore, a novel and quantitative approach for brick ranking is developed. This approach involves a microchemical and microstructural study of each brick, making use of SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analyses.

3. 1 SEM (Scanning Electron Microscopy) imaging

Apart from the standard crucible test, microstructural imaging and (semi) quantitative chemical micro analysis was performed on each crucible test sample. The microstructural imaging

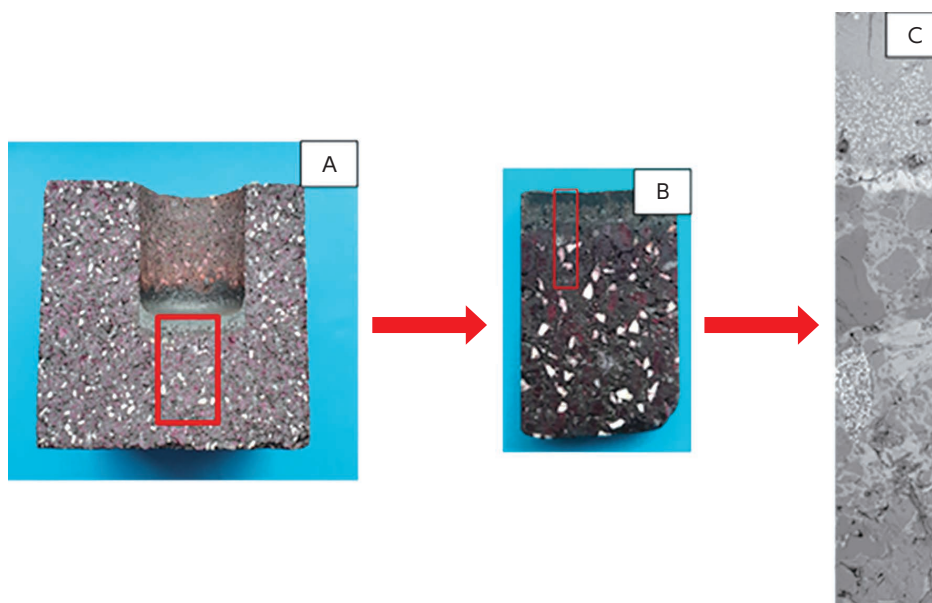


Fig. 11 Sampling scheme, A: crucible test, B: polished sample, C: SEM profile.

のCOMPOモードで画像化した。

3. 1. 1 SEM用サンプルの作製

SEMおよびEDS分析用の試料は、各るつぼの半分から採取し、約1 cm厚にスライス (Fig.11A), 更に約3 × 4 mmの薄片を切り出した (Fig.11B)。切断は水冷して行い、全試料はダイヤモンド懸濁液で研削・精研磨し、0.5 μmの精度に仕上げた。帯電回避のため、カーボンコーティングを施し、各試料について8～9枚のSEM画像からなるプロファイルを作成した (Fig.11C)。

3. 1. 2 SEM観察結果

各るつぼ試験のSEMプロファイルをFig.12に示す。SEMプロファイルではれんが組成と微細構造の不均一性が観察された。また、粒径の異なる大粗粒と様々な組成の微細なマトリックスで組織が構成されていることが確認できた。なお、SEMプロファイルの画像 (Fig.12右側に示されたサンプルJの画像) でスラグ層、反応層、健全層の3つのセクションに細分化できる例を示している。この細分化は、SEMプロファイルの目視観察に基づいていることに留意されたい。

各試料において、スラグがれんがと反応し、新しい反応生成物を形成されているのが観察される。これらはれんが (健全層) とスラグ層の間に明るい層としてみられ、広いバンドと小さな明るいクラスターが含まれている。反応生成物は固溶体である可能性が高く、各サンプルで似た組成を示した。

was performed by scanning electron microscopy (JEOL JSM-6490LV) using the software system JEOL for processing and imaging. The chemical microanalysis was performed by energy dispersive X-ray spectroscopy (OXFORD X-Act) employing the INCA software system. All samples were imaged using the backscatter electron detector (BSE) in COMPO mode, employing, a working distance of 10 mm and an acceleration voltage of 15kV.

3. 1. 1 Sampling

Samples for SEM and EDS analysis were taken from one half of each crucible test. A roughly 1 cm thick slice was cut from the brick (Fig. 11A). A smaller piece of approximately 3 × 4 mm was then cut from this slice (Fig. 11B). The cutting was carried out with water as a coolant. All samples were grinded and then fine polished with diamond suspension in several steps up to a finest grainsize of 0.5 μm. The samples were carbon coated to avoid electric charging. For each sample, a single profile composed of 8 to 9 separate SEM images was constructed (Fig. 11C).

3. 1. 2 Results - SEM imaging

The SEM profiles of each crucible test are displayed in Fig. 12. It is observed that all bricks have an inhomogeneous composition and microstructure. The bricks consist of larger grains with varying grain sizes located within a finer matrix of a varying compositions. In Fig. 12, an example is given of how the microstructure of the profile can be subdivided into three separate sections: slag, reaction zone, brick,

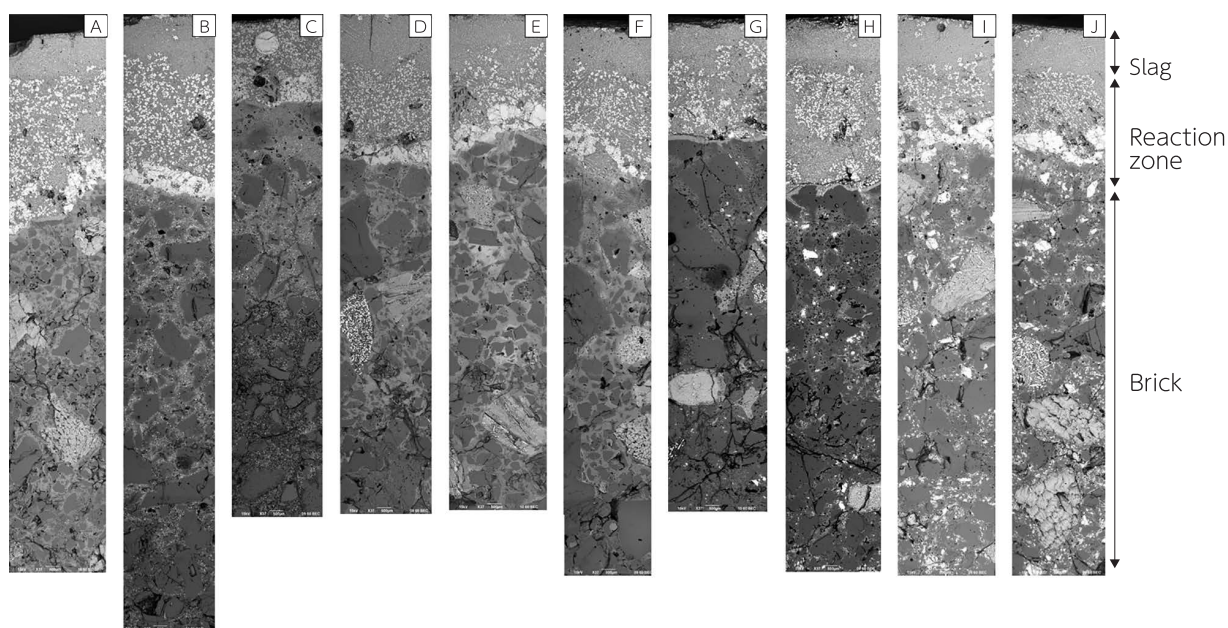


Fig. 12 SEM images of crucible test samples A-J.

3. 1. 3 SEM観察の結論

SEM画像から、すべてのれんががスラグと同様の反応を生じていたことがわかる。ただし、れんがCだけは元のスラグ層が存在しなかった。

3. 2 浸透層のEDS分析

エネルギー分散型X線分光法(EDS)を用いて、各プロファイルの微小領域分析を行った。EDSでは、試料中の小さな領域の化学組成を測定することができる。測定した化学組成は、指定した領域の平均組成となる*⁵。プロファイルの全長にわたって、小さな長方形の領域の分析を行った(Fig.13)。化学組成(ソフトウェアによって酸化物として計算された)は、Fig.13の右側にまとめた。各部位について、スラグの最上面を0mmとしてその部位の中心までの距離(mm)を同じ図に示した。この距離は、SEM画像のスケールバーにより決定した。すべてのサンプルについて、同様な表を作成した。

and brick. Note that this subdivision is based on visual observations of the microstructure in the SEM profiles.

In each sample, the slag has reacted with the brick to form a new reaction product. The reaction product is visible in the image as a brighter layer between the brick and the slag layer. This includes the broader bands as well as the smaller bright clusters. The reaction product is most likely a solid solution and has a similar composition in each sample.

3. 1. 3 Conclusion - SEM imaging

Based on SEM imaging, it can be concluded that all bricks react with the slag in a similar fashion. Only in brick C, no original slag layer is present anymore.

3. 2 Infiltration - EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) analyses

A chemical microanalysis was performed on each profile using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). With EDS, it is possible to measure the

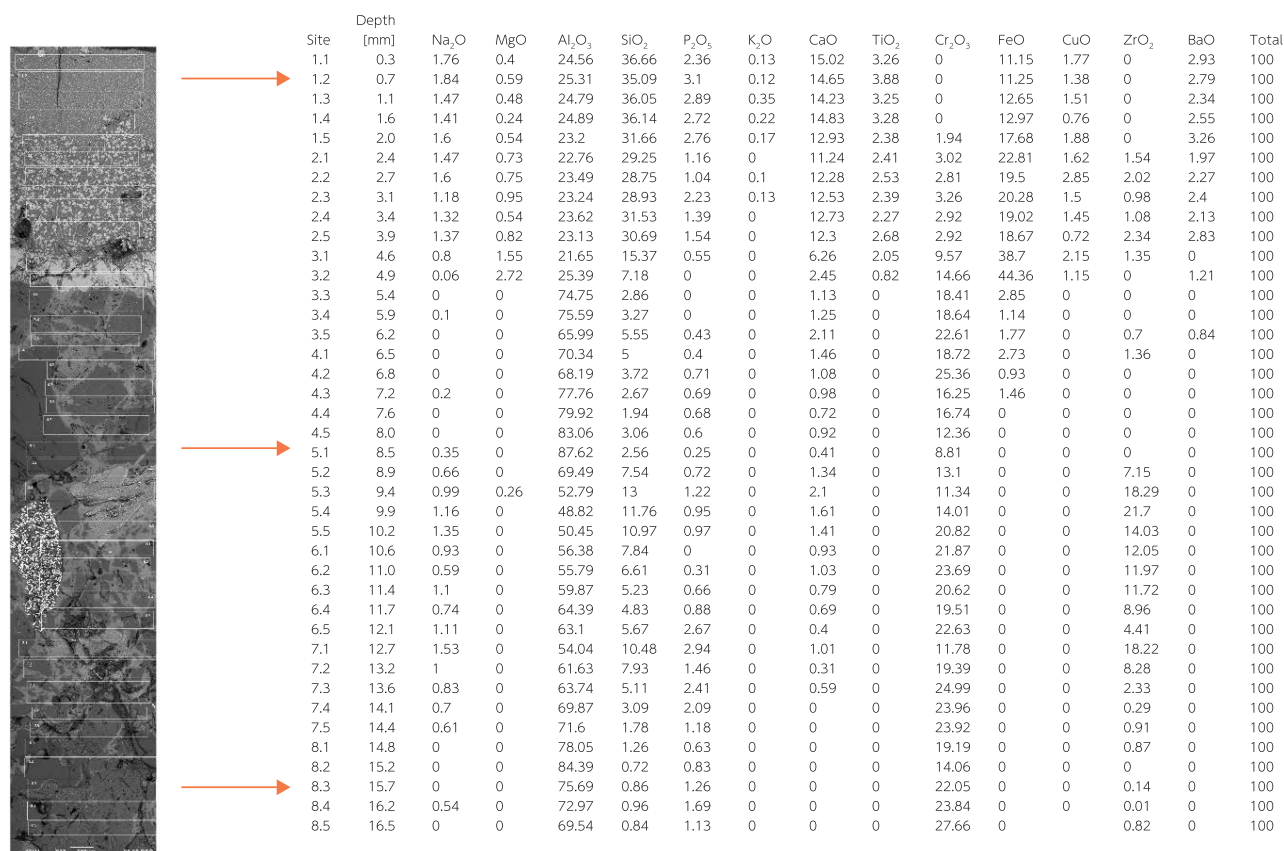


Fig. 13 SEM profile and EDS analyses table.

*⁵ サンプルは不均質であるためそれぞれの濃度はばらついている。例えばアルミナ粒が多くの面積を占める場合マトリックス部に比較してAl₂O₃濃度が高くなる。Because of the inhomogeneous character of the samples, this will result in fluctuating concentrations of elements. For example, in a large part of the chosen area consist of a coarse corundum grain, the Al₂O₃ concentration will be higher compared to an area where the matrix is being measured.

3. 3 定量的評価基準

3. 3. 1 反応層の決定方法

3. 1では浸透深さをSEMプロファイルの目視により3つ(スラグ層, 反応層, 健全層)に細分した。このセクションでは, 試料の微細構造をスラグ, 反応層, れんが(健全層)の3つの部分を, EDSで測定された Cr_2O_3 濃度と Fe_2O_3 濃度をマーカーとして定量的に特定する。 Fe_2O_3 は元来スラグに存在する成分(Table 2)でれんが中ではゼロに近づく(Table 1), 逆に Cr_2O_3 は元来れんがに存在する成分でスラグ中ではゼロに近づくからである。

すべてのサンプルについて, スラグ層の最上部から画像の最下部(れんが内部)に向かって Fe_2O_3 濃度と Cr_2O_3 濃度を測定した。これらのデータを各試料について個別にグラフにプロットした。一例をFig.14に示すが, 深さ0はスラグ層の最上部を示す。

Fig.14におけるそれぞれの区分は次のように定義できる:

- ・スラグ層: Cr_2O_3 濃度 = 0となる試料の上部から始まり, Cr_2O_3 濃度が0以上となる領域
- ・健全層: Fe_2O_3 濃度 = 0となる領域(およびそれ以降)
- ・反応層: スラグとれんがの間の領域で, Cr_2O_3 濃度と Fe_2O_3 濃度の両方が0以上

この基準に基づいて全てのれんがの反応層サイズを決定した。Table 4にその結果をまとめる。

Fig.15では, 反応層の厚さをれんがのクロミア含有量に対してプロットした。この図から, 反応層の大きさと Cr_2O_3 含有量には相関関係がないことがわかる。

セクション2.3ですでに述べたように, スラグ, 反応層, れんがの間には明確な界面が存在しないため, 浸透深さの目視観察のみに基づいてれんがをランク付けすることは不可能である。本セクションでは, これらの正確な界面を決

chemical composition of small distinct areas in the sample. The chemical composition of such an area is an average composition of the surface within the boundaries of a given area^{*5}. Over the entire length of the profile, EDS analyses were performed on rectangular areas (Fig. 13). The chemical composition was determined for each distinct area. The chemical compositions (calculated by the software into oxides) are displayed in a single table as shown in Fig. 13. For each site, the real distance (in mm) of the center of the site with respect to the top of the slag is displayed in the same combined table (see Fig. 13). The distance has been determined using the scale bar on the SEM images. For each sample a table like the one displayed in Fig. 13 has been produced.

3. 3 Quantitative assessment criterion

3. 3. 1 Method – Determination of reaction zone

In section 3.1, the infiltration depth was determined by visual observations that the microstructure of the samples can be subdivided into three separate sections (slag, reaction zone and brick). In the current section, such a subdivision is quantified by making use of the Cr_2O_3 and Fe_2O_3 concentrations measured by EDS, as Fe_2O_3 is present in the slag (Table 2) but approaches zero in the bricks (Table 1) whereas Cr_2O_3 is present in the bricks but approaches zero in the slag.

For all bricks the Cr_2O_3 concentrations as well as the Fe_2O_3 concentration was measured from the top of the slag layer into the sample. These data are plotted in a graph for each sample separately. An example of such a graph is given in Fig. 14, where the sample depth of zero indicates the top of the slag layer.

Now the subdivision (as shown in Fig. 14) can be defined as follows:

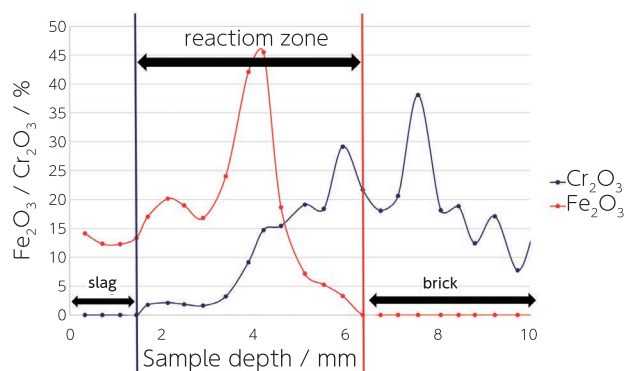


Fig. 14 Cr_2O_3 / Fe_2O_3 concentration.

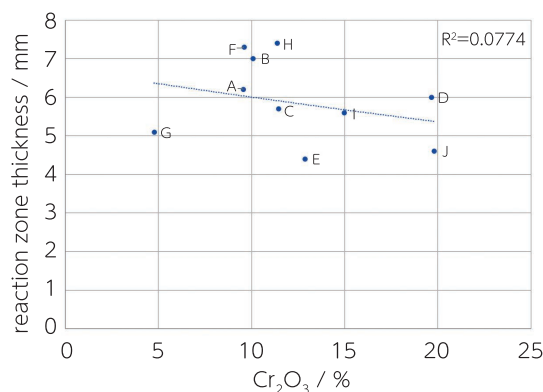


Fig. 15 Correlation on reaction zone thickness vs Cr_2O_3 concentration.

Table 4 Determination of the reaction zone thickness

Brick	Cr ₂ O ₃ = 0 / mm	Fe ₂ O ₃ = 0 / mm	Reaction zone / mm
A	1.3	7.5	6.2
B	1.0	8.0	7.0
C	0.0	5.7	5.7
D	1.6	7.6	6.0
E	1.2	5.6	4.4
F	1.2	8.5	7.3
G	0.6	5.7	5.1
H	1.5	8.9	7.4
I	1.5	7.1	5.6
J	1.5	6.1	4.6

定した (Table 4)。Table 3とTable 4を比較すると、以下のことが観察される：れんがEとJの反応層 (Table 4) は類似している。しかし、浸透深さ (Table 3) は互いになりに異なっている。一方、れんがFとJの反応層はかなり異なっているが (Table 4)、浸透深さ (Table 3) はほぼ等しい。したがって、Fig. 1～Fig.10の変色部分の大きさ (Table 3では浸透深さ) は、侵食反応の大きさ (反応層の大きさ) を表しているとは言い難い。

3. 3. 2 スラグ量で補正した“侵食比”

Table 4から、残留スラグ層の厚さは0.0mm (れんがC) から1.6mm (れんがD) まで異なることがわかる。Fig.12から、スラグ層が残っていない場合 (れんがC) は、すべてのスラグが耐火物マトリックスに浸透して反応し、反応層を形成していると結論づけることができる。もし、るつぽ試験中にスラグの供給が十分であれば (実際の操業では、キルン内にスラグが連続的に導入される)、すべての試料で残留スラグ層は大きくなる。言い換えれば、スラグを多く投入すれば、スラグとはより多く反応し、反応層が大きくなる。

すべてのサンプルのスラグ層の厚さは異なっている。そのため、同じ標準で補正することなく、試料の反応層を直接比較することは不可能である。そこで、すべての試料の反応層の厚さを、基準となるスラグ層の厚さ1mmあたりに対応させた。スラグの厚さを1mmに対応させると、反応層の大きさもそれに応じて補正される。例えば、れんがAのスラグ層が1.5mmではなく1mmになった場合、スラグ層は1.5倍減少する。したがって、反応層の厚さも1.5倍減少するはずである。言い換えれば、スラグの添加量が少

- Slag: the zone, starting at the top of the sample, where the Cr₂O₃ concentration = 0, to the point where the Cr₂O₃ concentration starts to be > 0
- Brick: the zone where the Fe₂O₃ concentration = 0 (and beyond)
- Reaction zone: the zone between the slag layer and the brick, where both the Cr₂O₃ and Fe₂O₃ concentration > 0

Based on these criteria, the dimensions of the reaction zones can be determined for all bricks. These dimensions are listed in Table 4.

In Fig. 15, the reaction zone thickness is plotted versus the chromia content of the bricks. Based on this figure, no correlation can be found between the size of the reaction zone and Cr₂O₃ content.

As it was already stated in section 2.3, it is impossible to rank the bricks solely based on visual observation of the infiltration depth, because there are no distinct interfaces between the slag, reaction zone and brick. In the current section, these exact interfaces were determined (Table 4). When comparing Table 3 to Table 4, the following can be observed: the reaction zones of brick E and J (Table 4) are similar. However, the infiltration depths (Table 3) are quite different from each other. On the other hand, for brick F and J the reaction zones are quite different (Table 4), but the infiltration depths (Table 3) are almost equal. Therefore, it can be concluded that the size of the discolored area (denoted as infiltration depth in Table 3) in Figures 1 to 10 is indeed not representative for the corrosive reactions (size of the reaction zone) taking place.

3. 3. 2 Wear ratio – Correction for lack of slag supply

It is observed from Table 4 that the thickness of the residual slag layer can differ from 0.0 mm (brick C) to 1.6 mm (brick D). From Fig. 12, it can be concluded that if no slag layer is left (brick C), all the slag has infiltrated into the refractory matrix and reacted to form a reaction zone. If there would be enough slag supply during the crucible test (as in actual operation, there is a continuous slag introduction into the kiln), the residual slag layer would be larger for all samples. In other words, if more slag is applied to the sample, the reaction between the slag and brick increases, resulting in a bigger reaction zone.

The thicknesses of the slag layers of all the samples are different. It is therefore impossible to directly compare the reaction zones of the samples without scaling them to the same reference. Instead, the reaction zone thicknesses of all the samples are scaled to a referential slag thickness of 1 mm. When adjusting the slag thickness to 1 mm, the size of the

なければ反応層も小さくなり、逆にスラグの添加量が多ければ反応層も大きくなる。その結果、試験後の材料の侵食度を特徴付ける無次元数値は、次のように求めることができる：

$$\text{侵食比}(-) = \frac{\text{れんが反応層厚み (mm)}}{\text{残留スラグ層厚み (mm)}}$$

この無次元数を適用することで、スラグとの反応性に加えて、各れんがの空隙率と浸透経路も考慮される。スラグがれんがに浸透する能力は多かれ少なかれあるため、侵食試験後の残存スラグ層の厚さは多かれ少なかれ重要になる。

この無次元数は、試料サイズおよびるつぼ試験に提供された初期スラグ量に依存しない。これは、流体力学で有名なレイノルズ数(Re)がパイプ内の流れの層流または乱流の挙動を測定するように¹²⁾、材料の本質的な侵食挙動を測定する。流体内の慣性力(流体を動かし続ける)と粘性力(流体を静止させる)の比であるレイノルズ数になぞらえると、“侵食比”は、スラグと耐火物の界面を越えないようにスラグを保持する能力と、スラグを材料に浸透させる能力の比である。その結果、耐火物の“侵食比”が高いほど耐食性は劣ることになる。

・製品「α」のるつぼ試験で、試料Cのように残存スラグ層の厚さが小さいか、残存スラグがない状態で反応層が厚いという結果が得られた場合、試料Cの“侵食比”は高いか、または無限大である。これは、スラグは耐火物の気孔を容易に通過し材料を侵食できることを示し、この製品「α」は、耐食性が非常に低い。

reaction zones will be corrected accordingly. If, for example, the slag layer of brick A becomes 1 mm instead of 1.5 mm, the slag layer is reduced by a factor 1.5. Therefore, the reaction zone thickness must also be reduced by a factor 1.5. In other words, if less slag is supplemented, the reaction zone should also be smaller and vice versa. As a result, we can obtain a non-dimensional number to characterize the corrosion severeness of the material after the test as:

$$\text{Wear ratio of brick } X (-) = \frac{\text{reaction zone thickness of brick } X \text{ (mm)}}{\text{remaining slag layer thickness of brick } X \text{ (mm)}}$$

By applying this non-dimensional number, in addition to the slag affinity, the porosity and permeability path of each brick are also taken into account. As slag has more or less abilities to penetrate into the bricks this will result in a remaining slag layer thickness more or less important after the corrosion test.

This non-dimensional number is independent of sample size and initial slag quantity provided to the crucible test. It measures the intrinsic corrosion behaviour of the material, as the famous Reynolds number (Re) in fluid mechanics measures the behaviour of the flow as laminar or turbulent in a pipe¹²⁾. By analogy to the Reynolds number, which is a ratio of inertial forces (to keep fluid moving) to viscous forces (to keep fluid stationary) within a fluid, the Wear ratio is a ratio of the abilities to retain the slag beyond the slag-refractory interface to letting slag infiltrating into the material. Consequently, the higher Wear ratio of a given refractory product means the poorer its corrosion resistance:

- If a crucible test of a refractory product called “alpha” gives a result of large reaction zone with a small remaining slag layer thickness or no remaining slag as in Sample C, it has a high Wear ratio or infinite Wear ratio for Sample C. This means that the slag can very easily pass through the refractory porosity and corrode the material. This “alpha” product has very poor corrosion resistance.
- On the contrary, if another product “beta” gives a test result of small reaction zone with a thick remaining slag layer, it will result in a low Wear ratio. It means that this product has an excellent ability to stop the slag infiltration into the lining and retain the slag behind the slag-refractory interface. This “beta” product has a good corrosion

Table 5 Wear ratio

Brick	Remaining slag layer thickness / mm	Reaction zone width / mm	Wear ratio / -
A	1.3	6.2	4.8
B	1.0	7.0	7.0
C	0.0	5.7	+∞*6
D	1.6	6.0	3.8
E	1.2	4.4	3.7
F	1.2	7.3	6.1
G	0.6	5.1	8.5
H	1.5	7.4	4.9
I	1.5	5.6	3.7
J	1.5	4.6	3.1

* 6 ゼロで割るため。
Divide by 0.

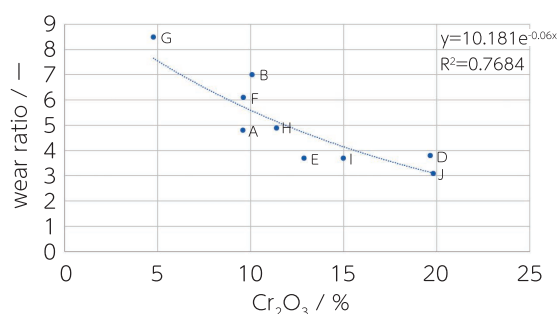


Fig. 16 Correlation Wear ratio vs Cr₂O₃ concentration.

・逆に、製品「β」が、厚い残存スラグ層かつ薄い反応層という試験結果を示した場合、“侵食比”は低くなる。これは、この製品がライニングへのスラグの侵入を阻止し、スラグと耐火物の界面の外側にスラグを維持する能力に優れていることを意味する。この製品「β」は、耐食性に優れている。

全れんがサンプルの“侵食比”をTable 5に示す。

Table 3からは最もスラグ浸透深さが浅いサンプルCが優れるとされたのに対し、Table 5は、試料Cの“侵食比”が最も高く、耐食性が最も低いことを示している*⁷。これは、あるSUEZの有害廃棄物焼却プラントで実際に観察された結果と完全に一致しており、このタイプのれんがの寿命は12ヶ月未満であった(多くの場合6～9ヶ月)。最悪のケースでは、キルン全体の耐火物改修後、わずか3ヶ月しか寿命がもたなかった。Fig.16に“侵食比”とクロミア含有量の関係を示す。

Fig.16から、“侵食比”とCr₂O₃含有量には強い相関があると結論づけられる。すなわち、クロミア濃度が高いほど“侵食比”は低くなる。しかし、この強化効果は直線的ではない。クロミア濃度が高いほど強化効果は低下する。言い換えれば、5%-Cr₂O₃れんがを10%-Cr₂O₃れんがに変更した場合の方が、15%-Cr₂O₃れんがを20%-Cr₂O₃れんがに変更した場合よりも、“侵食比”の低減効果ははるかに大きくなる。このため、さらに高いCr₂O₃濃度(25%以上)が効果的かどうかは疑わしい。これは、別の工場における実際の寿命と一致しており、費用対効果を考慮すると、クロミア含有量は15%が最適である。

3. 4 SUEZのロータリーキルン耐火物の寿命延長

SUEZが運営するあるプラントでは、2016年から2021

resistance.

The Wear ratios of all the brick samples are presented in Table 5.

Contrary to the conclusion that may be made from Table 3 for Sample C with the lowest slag infiltration depth, Table 5 shows that Sample C has the highest Wear ratio, therefore the poorest corrosion resistance *⁷. This is completely in line with the real-life observation on one SUEZ hazardous waste incineration plant, where this type of bricks had a lifetime of less than 12 months (typically 6–9 months). In the worst case, it lasted only 3 months after a whole kiln refractory refurbishment. In Fig. 16, the Wear ratio is plotted against the chromia content.

Based on Fig. 16, it can be concluded that there is a strong correlation between Wear ratio and Cr₂O₃ content. Higher chromia concentration has an enhancing effect on the wear reduction, i.e., the higher the chromia concentration, the lower the Wear ratio. However, this enhancing effect is not linear. The enhancing effect is decreasing with respect to the chromia concentration. In other words: the effect of changing a 5 %-Cr₂O₃ brick to a 10 %-Cr₂O₃ brick will have a much bigger effect on reducing the Wear ratio than the change from a 15 %-Cr₂O₃ brick to a 20 %-Cr₂O₃ brick. The use of even higher Cr₂O₃ concentrations (>25 %) is for this reason doubtful. This is in correspondence with real life experiences from different plants: a chromia content of 15 % is the optimum for cost-effective consideration.

3. 4. SUEZ Rotary kiln refractory lifetime extending experience

One plant operated by SUEZ carried out a sequence of industrial scale tests with different Cr₂O₃ concentrations chromia corundum brick lining from 2016–2021 provided by Gouda Refractories. By switching from the 5 %-Cr₂O₃ brick (LP 85–5 CZ) to a 10 %-Cr₂O₃ brick (LP 85–10 CZ), the lifetime of the refractory lining of the rotary kiln was extended from 9 months (July 2012–April 2017) to at least 13 months (June 2017–July 2018)*⁸. From August 2018 to August 2020, 15 %-Cr₂O₃ brick (LP 80–15 CZ) were used instead of 10 %-Cr₂O₃ bricks. The lifetime of the refractory lining reached 23 months as targeted for continuous two-year service with only one month bi-annual overhaul replacement*⁹.

*⁷ Table 1 よりCは他のサンプルに比較して多量のSiO₂を含有していることがわかり、“侵食比”が大きい理由の一つと考えられる。

Based on Table 1 it can be concluded that brick C, compared to the other bricks, contains a much higher amount of SiO₂, which could be one of the reasons for the higher Wear ratio.

年にかけて、Gouda Refractories社から提供された異なる Cr_2O_3 濃度のクロミアコランダムれんがライニングによる一連の工業規模試験を実施した。5%- Cr_2O_3 れんが(LP 85-5 CZ)から10%- Cr_2O_3 れんが(LP 85-10 CZ)に切り替えることで、ロータリーキルンの耐火物ライニングの寿命は、9ヶ月(2012年7月~2017年4月)*⁸に延長した。2018年8月から2020年8月までは、10%- Cr_2O_3 れんがに代えて15%- Cr_2O_3 れんが(LP 80-15 CZ)を使用した。耐火物ライニングの寿命は、2年に1度の1カ月オーバーホール積み替えのみでの2年間連続使用が可能であり、23ヶ月操業の目標を達した*⁹。

4. 結論と今後の見通し

さまざまな供給源から入手した、クロミア含有量の異なる10種類の市販れんがについて、るつば試験を実施した。るつば試験で得られたサンプルは、従来の方法で目視評価した。これらの「昔ながらの」観察に基づくと、浸透部がスラグなのか侵食されたれんがなのかまたはその両方の組み合わせから構成されているのかが明確でなかったため、れんがの耐食性に関する結論は導き出せなかった。

SEM/EDS分析により、試験後れんが組織は3つに分けられることが確認された：

- ・スラグ層
- ・反応層
- ・健全層

SEM/EDS分析で定義された反応層の寸法は、目視で観察された浸透層の寸法と一致していない。これは、スラグの供給不足を補正していないためと考えられる。そのため、反応層とれんがのクロミア含有量との間に相関関係は認められなかった。試料の寸法と初期スラグ供給量の影響を排除するために、無次元数である“侵食比”を導入した。この無次元数は、反応層の厚さと残留スラグ層の厚さの比として定義され、耐火物の耐食性を定量的に評価する。この“侵食比”が高いほど耐火物の耐食性は劣り、その逆もまた然りである。

4. Conclusions and Perspectives

Crucible tests were performed on 10 commercial refractory bricks originating from various sources and with different chromia contents. The samples from the crucible test were visually analysed in the traditional way. Based on these “old-fashion” observations, no conclusions could be drawn on the slag resistance of the bricks, because it was not clear whether the infiltrated zones consisted of slag, corroded brick or a combination of both.

SEM/EDS analyses confirmed that the infiltration zone can be divided into three separate zones:

- Slag
- Reaction zone
- Original brick.

The dimensions of the reaction zone defined by SEM/EDS analyses are not corresponding with the dimensions of infiltration zones that were visually observed. This can be attributed to the absence of a correction for the lack of slag supply. Therefore, no correlation between the reaction zone and the chromia content of the bricks was found. In order to eliminate the influences of sample dimension and initial slag supply, a non-dimensional number, the Wear ratio was introduced. This non-dimensional number is defined as the ratio between the reaction zone thickness and the residual slag layer thickness and it quantitatively characterizes the refractory's corrosion resistance. The higher this Wear ratio, the poorer the refractory's corrosion resistance and vice-versa.

For the 10 samples tested, a good correlation between the Wear ratio and the chromia content of the bricks was found. Based on the correlation coefficient of 0.7684, it is concluded that the chromia content of the bricks is a key factor to improve the refractory's corrosion resistance, although other material properties (e.g., porosity, permeability, thermal shock resistance) may also play a role in corrosion resistance of chromia bricks. Industrial scale tests of bricks with chromia concentration from 5 % to 15 % confirmed this correlation. The use of this non-dimensional number (Wear ratio)

*⁸ Cr_2O_3 -10%のライニングは13カ月以上耐用できた。しかし、冬場の作業を避けるために夏場に実施している計画的オーバーホールで13カ月稼働後の2018年7月に積み替えた。また、 Cr_2O_3 -10%れんがの稼働期は Cr_2O_3 -5%れんがを使用した時期に比較して高Naの廃棄物焼却量が12000t/年から17000t/年に増大している。

The 10%- Cr_2O_3 lining could survive longer than 13 months. But due to the scheduled annual overhaul in every summer to avoid works in the winter, the lining was completely replaced in July 2018 after 13 months of services. It was also noted that during the period using 10%- Cr_2O_3 bricks, the total waste incinerated was increased from 12000 tons/year to 17000 tons/year with a higher sodium concentration, compared to the period using 5%- Cr_2O_3 bricks.

*⁹ 2017年6月から2018年8月 - Cr_2O_3 -10%れんがと Cr_2O_3 -15%れんがが使用されていた時期の廃棄物焼却量は17000t/年でほぼ一定であった。

The annual total waste incinerated was almost constant at 17000 tons/year from June 2017-August 2018 for the both periods using 10%- Cr_2O_3 and 15%- Cr_2O_3 brick.

試験した10試料について，“侵食比”とれんが中のクロミア含有量との間に良好な相関関係が認められた。相関係数は0.7684と高く，耐火物の耐食性を向上させるためには，れんが中のクロミア含有量が重要な因子であると結論づけられた。ただし，クロミアれんがの耐食性には，他の材料特性（気孔率，耐浸透性，耐熱衝撃性など）も関与していると考えられる。この相関性はクロミア濃度5%から15%のれんがの実機試験で確認された。耐火物の耐食性を評価する方法として，単に古典的な目視による観察よりも，この無次元数（侵食比）を新たな定量的基準の1つとして使用する方法がより信頼性が高い。

スラグに対する耐火物の侵食挙動を評価するための現在の手法の普遍性をさらに確認するためには，複数のスラグ組成と，他の用途に使用される異なる種類のれんがを用いて，同様の追加試験を実施することが興味深い。例えば，クロミア濃度の異なるマグネシアれんがを，異なる鉄鋼スラグで試験することができる。サンプルCのように残存スラグ層がゼロという結果を避けるために，合成スラグを製造し，その組成をより制御された方法で変化させ，侵食力を高めたり低くしたりすることができる。

耐火物の耐食性を予測するための“侵食比”の普遍性を，実験室で実際の工業プロセス条件に近づけてさらに確認するために，本論文で示したるつば試験と並行して，スラグを連続的に供給する侵食試験（フィンガー試験や回転侵食試験など）を実施することができれば有効である。この場合，“侵食比”が実際の工業用途に関与する他の損傷メカニズムに対する耐火物の耐食性を評価する，より普遍的な基準となり得るかどうかを検証することができる。

as one new quantitative criterion among others, is a more reliable way to assess the refractory's corrosion resistance than using merely classic visual observation.

In order to further confirm the universality of current approach to assess the corrosion behaviours of the refractory against slags, it would be interesting to carry out some similar and additional tests with multiple slag compositions and different types of bricks implicated in other types of applications. For example, magnesia bricks with varying concentrations of chromia could be tested with different steel slags. In order to avoid the results of zero remaining slag layer as in Sample C, a synthetic slag can be produced, so that its composition can be altered in a more controlled manner to make it more or less aggressive.

To further confirm the universality of the Wear ratio to predict the refractory corrosion resistance by approaching the real industrial process condition in laboratory, one can additionally run a corrosion test with a continuous supply of slag (e.g., finger test or rotary corrosion test) in parallel to the crucible test presented in this paper. In this case, it can be verified whether the Wear ratio can be a more universal criterion to assess refractory resistance to other damage mechanisms involved in real industrial applications.

References

- 1) Walter R. Niessen, 2002, Combustion and Incineration Process, ISBN 0-8247-0629-3.
- 2) Xuguang Jiang, Yanhui Li, Jianhua Yan, 2019, Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review. Waste Disposal & Sustainable Energy 1:3-37.
- 3) IAEA Safety series No. 108 Design and Operation of Radioactive Waste Incineration Facilities, 1992.
- 4) Denis A. Brosnan, Chapter 3 Corrosion of Refractories, Refractories Handbook edited by Charles A. Schacht 2004, ISBN 0-8247-5654-1.
- 5) Poirier. J & Rigaud. M, 2018. Corrosion of Refractories: Testing and Characterization Methods.
- 6) P. Gehre, C. G. Aneziris, C. Parr, Self-glazing SiC-andalusite Refractories for High Temperature Gasification Applications, Vol 24, No.1, 2015, China's Refractories.
- 7) Poirier. J & Rigaud. M, 2018. Corrosion of Refractories: The Impact of Corrosion.
- 8) AV Weinberg, C Varona, X Chaucherie, D Goeuriot, J Poirier, 2016. Extending refractory lifetime in rotary kilns for hazardous waste incineration; Ceramics International 42 (15), 17626-17634.
- 9) Hisanori Hoshizuki, Hiroyuki Tanida, Satoshi Ota, Yasutaka Yoshimi, Yoshiki Tsuchiya, Improvement to $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ bricks for waste melting furnaces, Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR), 2013.
- 10) Ding Chen, Ao Huang, Huazhi Gu, Meijie Zhang, Zhijun Shao, Corrosion of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ Refractory lining for high-temperature solid waste incinerator, Ceramics International, Volume 41, Issue 10, Part B, December 2015, Pages 14748-14573.
- 11) Hitoshi Chiba, Hitoshi Toda, Shun Kawaguchi, Makoto Ohno, and Fumihito Ozek, Influence of matrix on the corrosion resistance of alumina-chromia bricks for rotary type waste melting furnace, 15th Biennial Unified International Technical Conference on Refractories (UNIECR) 2017, Santiago, Chile.
- 12) O. Reynolds, 1883, An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 174, 935-982. <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1883.0029>.