

使用後耐火物のリサイクル技術

Recent Improvement of Recycling Technology for Refractories

高嶋章伍* 今川浩志
Shogo TAKASHIMA Hiroshi IMAGAWA

抄 録

近年、耐火物を取り巻く環境問題は重要な課題である。製鉄プロセスにおいては、多くの工程で各窯炉設備の使用条件に対応した耐火物が使用される。耐火物の損傷が進行し、その機能を満たさなくなると耐火物は解体処理をされる。従来、解体された使用済み耐火物の多くは、再利用されることなく産業廃棄物として埋め立て処理が行われてきた。しかし、近年の製鉄所構内での埋め立て工事竣工に伴う、外部埋め立て処理費削減と耐火物原料価格高騰の観点から、使用済み耐火物のリサイクル量増加のニーズが高まってきている。そこで、リサイクル量増加のため、使用後耐火物の選別技術開発、多量リサイクル技術開発及び、リサイクル適用用途拡大に取り組んだ。

Abstract

The environmental problems caused by refractories become an increasingly important issue in the recent years. Many kinds of refractories are used in the iron and steelmaking process in the steel industry. The refractory waste generate when they are damaged and the production of steel becomes unstable. As usual most of used refractories have been ended up in a landfill without recycling. However, there is a growing need for recycling from the point of view of cutting down on costs of disposal by landfill outside a steelmaking mill and purchase of new refractories. Therefore, we have developed a selecting technology and voluminous recycling technology and have found a new use of used refractories.

1. はじめに

製鉄プロセスにおいては、多くの工程で各窯炉設備の使用条件に対応した耐火物が使用されている。耐火物の損傷が進行し、その機能を満たさなくなると耐火物は解体処理

をされる。図1に耐火物リサイクルフローを示す。解体処理後は必要に応じ、選別／粉碎／磁選／分級／乾燥工程を経て、再度、耐火物へのリサイクルもしくは、副原料（転炉用造滓材等）としての使用を実施している。耐火物リサイクルや副原料へのリサイクルを行うための品質要求を満

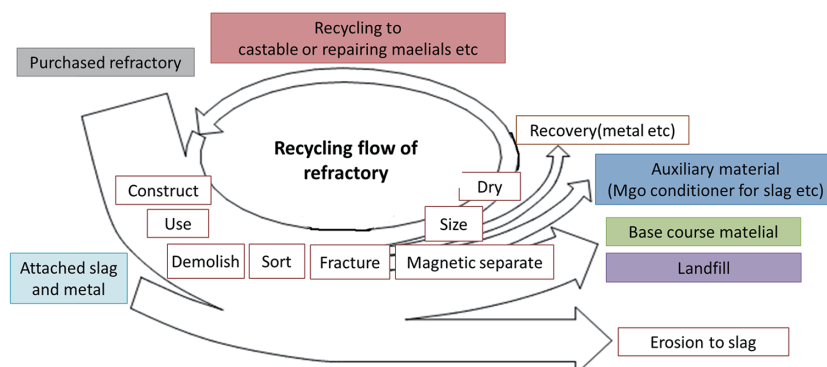


図1 耐火物リサイクルのイメージ
Schematic flow of refractories

* 九州製鉄所(八幡地区) 製鋼部 炉材室 主査 福岡県北九州市戸畑区飛幡町 1-1 〒 804-8501

たさない場合や経済合理性を考慮し、外販や路盤材化もしくは埋め立て処理を行っている。近年の環境問題への関心の高まりと耐火物原料価格高騰を受け、日本製鉄(株)においても埋め立て処理量の削減と経済合理性の高いリサイクル用途の開発に取り組んでいる。本報では、一般的に最も経済合理性の高い、使用済み耐火物リサイクルの取り組みについて報告する。

2. 耐火物リサイクルにおける課題

2.1 従来耐火物リサイクル技術と課題

従来、使用済み耐火物のリサイクル技術として、スライディングノズルプレートの再生技術²⁾や使用後れんがの再生³⁾、精錬用造滓材への適用⁴⁾、特定の使用後れんがの破碎粒を不定形耐火物へ添加する方法⁵⁾、等が報告されている。しかし、その多くの技術は、限定された用途での適用手法のため、発生する耐火物に対して、およそ20%程度のリサイクルが上限であり、残る多くの使用済み耐火物が埋め立て等の最終処分に向けられていた。

2.2 環境変化における新たな課題

従来、リサイクルされない使用済み耐火物の多くは、製鉄所構内の埋め立てや路盤材に使用されていた。1990年代になると、各製鉄所構内での埋め立てが次々と竣工することになり、各所で廃棄耐火物量削減のニーズが高まってきた。そのため、耐火物リサイクルの対象も、特定の使用済み耐火物から、発生した使用済み耐火物の全量を対象とすることに変化してきた。

図2に国内での耐火物生産量とそのうちの不定形比率の推移を示す⁶⁾。製鉄プロセスで使用される耐火物は、省エネルギー化や省力化を目的に、れんがから不定形耐火物への切り替えが進み、れんがの適用用途は、操業条件が過酷で耐火物の損傷が著しく大きい部位や漏鋼に対しての最後の要となるパーマレンが等に特化されてきている。また、使用する耐火物原料も高純度化や高機能化が求められるようになったため、れんが等への使用済み耐火物のリサイク

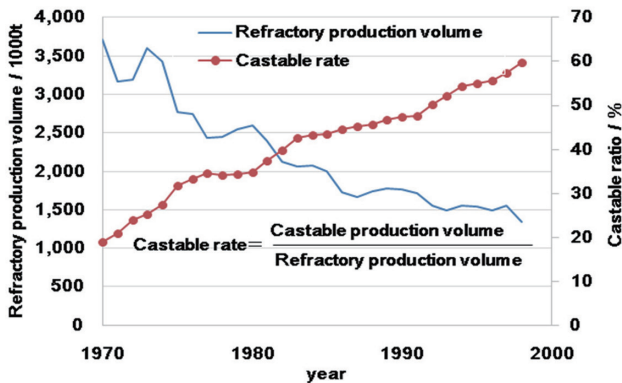


図2 耐火物生産量と不定形耐火物比率の変化
Changes in refractory production volume and castable rate

ル用途は極めて制限を受けることとなった。そのため、使用済み耐火物リサイクルの拡大を図るためには、不定形耐火物を対象とした再原料化のための選別技術の確立と、従来よりも多量にリサイクル原料を使用する適用技術の確立が重要な課題であった。

3. 開発技術

3.1 選別技術

製鉄所に導入されている耐火物リサイクルの一例を図3に示す。破碎や選別、分級といった耐火物処理のフロー自体は、従来より行われてきたものである。その中で、近年、耐火物リサイクル拡大のために導入された技術について以下に示す。

3.1.1 選別技術の必要性と課題

使用済み耐火物にはメタルやスラグ等の耐火物にとって有害な成分が含まれているため、耐火物原料としてリサイクルするためには、これらの有害成分の除去が必要である。有害成分除去の必要性の例として、図4に各耐火物骨材成分に対して有害な成分となるFeOの混入量と熔融温度の関係を示す。各耐火物原料とも、FeO混入量の増加に伴い、耐火度の低下を示す。その他にも、混入したFeO成分の酸化やスラグ成分との反応による体積膨張により亀裂が発生し、耐火物の異常損傷を招く原因となることが知られている。

また、選別技術面の課題として、既存の選別方法では、重機やコンベア上に取り付けたリフティングマグネット

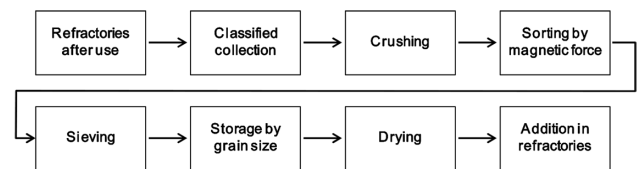


図3 使用後耐火物のリサイクルプロセスフロー
Recycling processing flow of the refractory after use

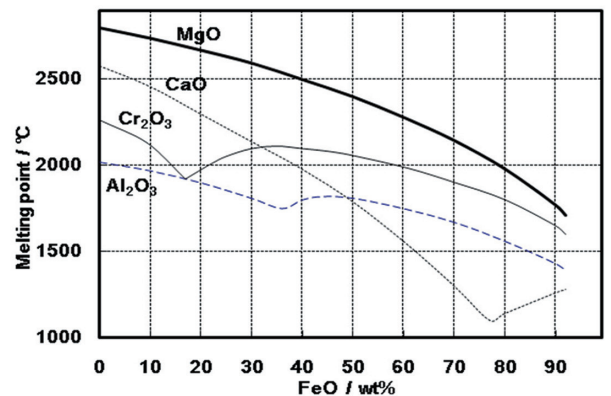


図4 FeO含有量と耐火物融点の関係
Relation between the FeO mixture amount and the melting point of the refractory

鉄分を吸着させ除去する方法や、目視による手選別作業が主に行われてきた。しかし、これらの手法では、耐火物内に混入した弱い磁性の鉄成分などの選別が出来ないことや、作業者の負荷が大きい等の課題があった。更に、特定形状を持たない不定形耐火物では、選別するために、まず適当な大きさとするための破碎が必要になるが、破碎後形状の大小に関わらず、使用後の耐火物中に有害成分であるFeOやスラグ等の浸潤層が存在するため、特に細かい粒径での破碎粒に対し、目視選別を行わなければならない、作業を困難にする要因となっていた。特に、カーボンを含まない不定形耐火物は、カーボン含有不定形耐火物と比較し、スラグの浸潤層の厚みが大きい、有害成分の除去が困難である。一方で、カーボン含有耐火物は、スラグ浸潤により、耐火物の色調の変化が小さく、目視による選別が困難である。

3.1.2 高磁力選別装置の導入

図5に磁力選別装置の概略図を示す。従来の磁力選別では、選別用のコンベア上に設置された吊り下げ式の磁力選別機が多く使用されている。使用済み耐火物に付着した地金等の強磁性物は、この磁力選別機により効率的に除去することが可能であったが、磁石と選別対象物の距離が離れているため、耐火物中に混入した微小な鉄成分や弱磁性のスラグ等の選別には不向きであった。そこで、選別対象物との距離が最小になるプーリー式を採用し、10000G以上の磁力を有する高磁力選別装置が導入され、徹底した選別除去が行われるようになった。これにより、目視による選別作業が困難な小形状の破碎粒についても、直接高磁力選別機にかけることで、良品/不良品の判別が可能になった。

図6は、比較的純物成分の量が多い、非カーボン含有

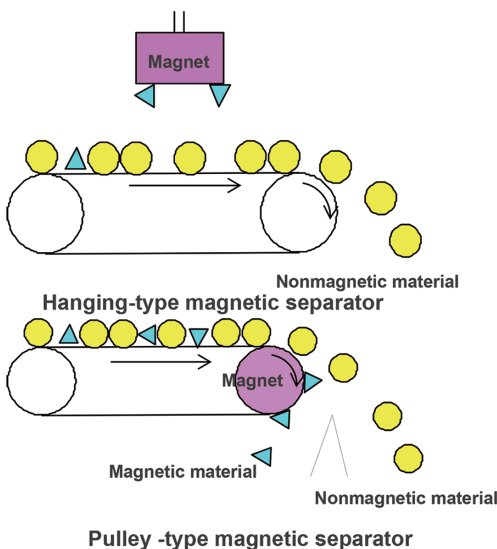


図5 磁力選別装置の概略図
Schematic diagram of magnetic separator

系不定形耐火物の使用後品の破碎後に粒径5~10mmに選別して行った磁力選別の結果である。いずれの結果も、10000G以上の磁力での選別を行うことで、金属、酸化物、化合物を含めたFe量であるtotal-Fe量を2wt%レベルまで低減させることが可能であった。

また、実際の磁力選別装置の導入の際には、選別作業上の処理能力を考慮して、吊り下げ式とプーリー式の磁力選別機を併用し、処理能力の優れた吊り下げ式の磁力選別機により地金等の強磁性物を除去した後に、選別精度に優れたプーリー式磁力選別機により弱磁性物を除去する方式が効果的である。

3.1.3 色彩選別装置の導入

前述の高磁力選別装置以外に、不純物の浸潤により比較的色調の変化のあらわれやすい非カーボン含有系耐火物を対象に、磁性を持たない有害成分であるスラグ成分の除去を目的に色彩選別装置の導入も進められた。図7に色彩選別処理の概略図を、図8に色彩選別前後の耐火物を示す。本装置は、非カーボン含有系不定形耐火物を主な対象とし、あらかじめバックグラウンドにバージン耐火物の色調を設定しておき、スラグ浸潤による耐火物の色調変化をCCDカメラで判別し、不良品に対してエアガンを噴射するこ

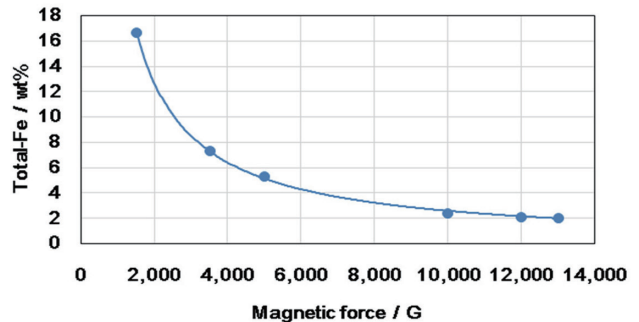


図6 印可磁力とFe含有量の関係
Relation between magnetic force and total-Fe amount in the refractory

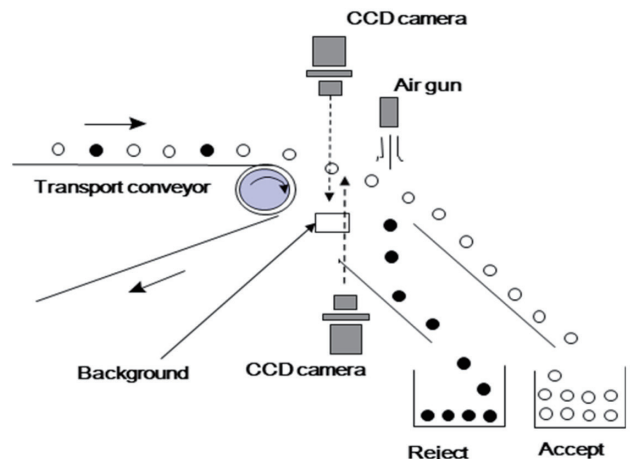


図7 色彩選別処理の概略図
Schematic diagram of the color sorting process

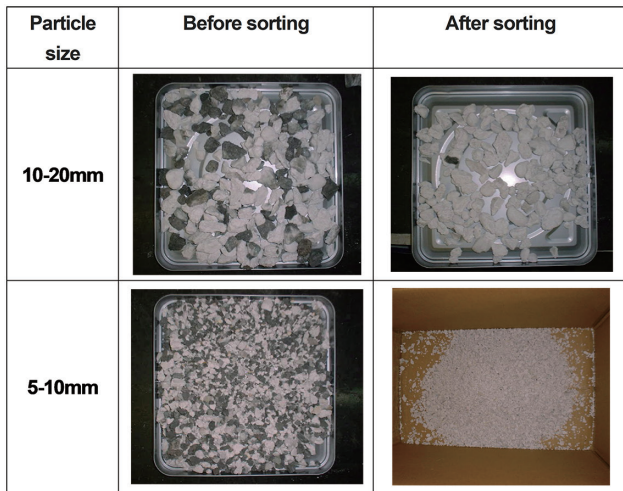


図8 色彩選別前後の耐火物外観

Recycling refractory before and after the color sorting process

とで飛行距離を変え、選別する装置である。これにより、スラグの浸潤したリサイクル原料とスラグの浸潤していないリサイクル原料に分別することで、より高品位なりサイクル原料の選別が可能になった。

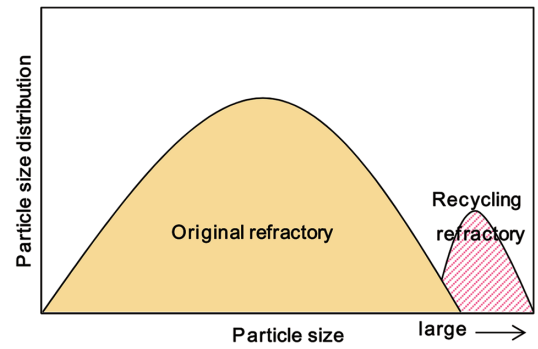
なお、色彩選別装置の能力差として、粒径が大きくなるとエアガンの能力が不足し、選別精度が低下するが、このような場合には、目的とするリサイクル原料の品位に合わせ、装置能力を設定するか、適切な粒度に合わせて再破碎する必要がある。

以上使用済み耐火物に混入した有害成分の選別除去方法について、良質なりサイクル原料の回収方法について述べてきた。選別に注意が必要なことは、良品に対するしきい値を高くすると、当然再使用するリサイクル原料の量が減ってしまうため、以降に述べる耐火物の適用用途に合わせて選別のしきい値を変更し、目的とする品位に応じたりサイクル原料の製造計画を立案し、運用して行うことが重要である。

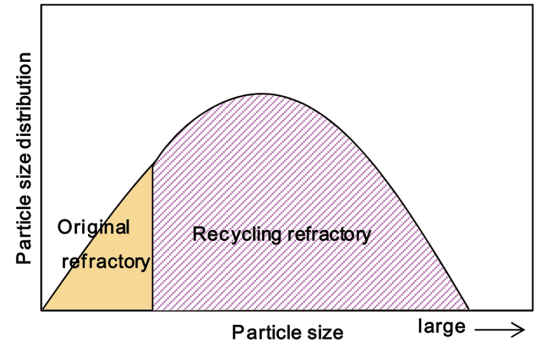
3.2 リサイクル原料多量適用技術

従来の不定形耐火物へのリサイクル原料多量添加技術は、図9に示すように、オリジナルの不定形耐火物原料の持つ粒度構成に対して、リサイクル原料の粒度はその粒度範囲外の大粒径用に添加使用する。一般的に外掛け添加と呼ばれる適用方法であった。

この場合、リサイクル原料の添加量は、オリジナル耐火物の持つ充填性を維持させるために、適用する材質ごとに添加量の上限が存在し、リサイクル原料の多量適用は困難であった。更に、適用可能な粒径は大粗粒域に、施工方式は流し込み施工に限定されるため、適用用途に多く制約を設ける方式であった。言い換えれば、リサイクル原料を更に多量に適用するためには、従来の不定形耐火物の粒度構成の範囲において、不定形耐火物の特性を損なわずに添加



Outer percentage addition method



Out-in addition method

図9 リサイクル耐火物添加量増加方法の概念図
Schematic diagram of the recycling refractory addition method

する技術が必要であった。

このため、リサイクル原料の使用量増加を図る目的で、Andreasenの連続粒度分布式等の適正粒度構成を指標とし⁷⁾、不定形耐火物の粒度域ごとにリサイクル材を添加し、新規の原料と併せて適正な粒度構成にする方式(out-in方式)が考案された⁸⁾。更に、本方式を用いることでリサイクル原料の適用用途は従来の流し込み施工のみにとどまらず、吹付け材やこて塗り補修材等の様々な不定形耐火物に対応が可能であるため、リサイクル原料の適用用途を大幅に拡大することが可能になった。

3.3 リサイクル耐火物適用用途の開発

リサイクル原料の適用範囲が拡大することによって、将来的に回収する使用済み耐火物中にも既にリサイクル原料が含まれることになり、リサイクル原料の繰り返し使用が行われることになる。このことにより、耐火物原料にとっての有害成分が少しずつ濃化することが懸念された。これに対し、リサイクル原料の適用用途を適用部位に応じた高級原料で構成されるものから低級原料で構成される耐火物に分類し、リサイクル原料添加耐火物は、高級耐火物として使用した後は、中級耐火物へ使用するといったOne-Rank Down方式が考案されている⁹⁾。図10に実際に本方式を用いて評価したリサイクル原料の添加量と耐用性の関

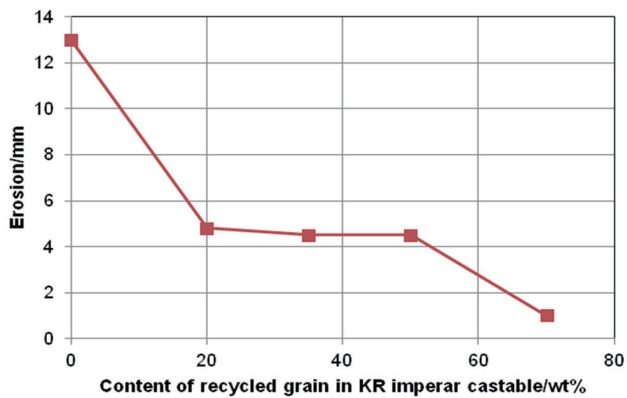


図 10 リサイクル原料の添加量と耐用性の関係
Relation between the addition amount of recycling refractory and resistance properties of castable

係を示す。

高級リサイクル原料であるスライディングノズルプレートレンガを中級原料で構成される不定形耐火物へ添加することにより、不定形耐火物の耐用性向上が確認され、従来に比べ実機での寿命は2割以上向上する結果が得られた¹⁰⁾。

その他にも、低級耐火物の適用用途としては吹付け補修材等が対象とされており、適用量が増大しているが、その作業性の改善を目的としたリサイクル原料連続混練機等の専用装置も開発されている¹¹⁾。

また、新たなリサイクル原料の活用先として、熱間圧延用炉の炉床れんがの保護材としての適用方法も開発されている¹²⁾。従来、堆積したスケールが炉床耐火物に浸潤固着するため、スケール解体時にれんがごと解体する必要があったが、炉床れんが表面に適切な粒度構成のリサイクル耐火物原料を保護材として施工することで、解体時の大幅な省力化と補修費用削減効果が得られている。

更に近年では熱間圧延用炉等の長寿命設備で多く使用されているセラミックファイバーのリサイクル技術も開発された。こちらはこれまで述べてきた塊状の使用済み耐火物とは一線を画するが、低かさ比重のために、処理作業やコ

ストの負荷が大きくなっていた使用済みセラミックファイバーを解繊し、成型することで、リサイクル使用が可能となった¹³⁾。

4. まとめと今後の展望

近年、使用済み耐火物の回収、選別、適用に関する新たな技術開発が進んだことにより、従来は特定の耐火物に限られていた耐火物リサイクルを、製鉄リサイクルプロセスで発生する使用済み耐火物全体を対象としたリサイクルプロセスへと発展することが可能となり、製鉄プロセスの現場での最終処分量の大幅な削減が報告されている¹⁴⁾。今後も、耐火物使用技術の変化に対応しながら、環境調和型社会への貢献に向けた新たな耐火物リサイクル技術の開発を継続していくことが必要である。

参照文献

- 1) 今川浩：耐火物. 68 (9), 441-445 (2016)
- 2) 桑原明夫, 三木隆, 川村俊夫, 伏見哲郎：耐火物. 47 (7), 348-352 (1995)
- 3) 今井一成, 高田隆夫：耐火物. 45 (3), 136 (2005)
- 4) 中坪修一, 天野肇, 立石亨, 新貝元：ふえらむ. 1 (5), 367-370 (1996)
- 5) 大久保勝弘, 三島健士, 古賀道和：耐火物. 57 (10), 533-536 (2005)
- 6) 大和次夫：耐火物. 63 (9), 426-434 (2011)
- 7) 石川誠：耐火物. 56 (6), 296-303 (2004)
- 8) 新保章弘, 花桐誠司：金属. 81 (9), (2011)
- 9) 花桐誠司, 松井泰次郎, 新保章弘, 麻生誠二, 犬塚孝之, 松田強志, 榊澄夫, 中川仁：新日鉄技報. (388), 93-98 (2008)
- 10) 芳山純一郎, 久保吉一, 今西正記：CAMP-ISIJ. 18, 124 (2005)
- 11) 丸山茂之, 野中克美, 内藤裕, 元木英二, 前田眞一, 中西康次：耐火物. 57 (7), 362-366 (2005)
- 12) 高橋尚巳, 板楠元邦, 河野幸次：耐火物. 68 (2), 96-97 (2016)
- 13) 特許第 4524146 号 (2010.06.04)
- 14) 花桐誠司, 松井泰次郎：耐火物. 63 (3), 114-122 (2011)



高嶋章伍 Shogo TAKASHIMA
九州製鉄所(八幡地区)
製鋼部 炉材室 主査
福岡県北九州市戸畑区飛幡町1-1 〒804-8501



今川浩志 Hiroshi IMAGAWA
九州製鉄所
製鋼部 炉材室長