



技術解説

鋳鉄溶解炉に使用される耐火物について



鈴木 裕之* 西村 有司**

1. はじめに

耐火物とは、高温で軟化または溶融しにくい非金属無機材料であり、種々の原料、材料などを加熱、焼成、溶融、分解するための工業窯炉の構築に使用される非金属材料である。

耐火物の定義としてJISには、「使用温度が1500℃以上の定形耐火物及び最高使用温度が800℃以上の不定形耐火物、耐火モルタル並びに耐火断熱レンガ」とされている。

各種の工業炉に使用される耐火物では、高温で長時間の加熱あるいは温度変化に対して材料自体が化学的・機械的变化をしにくい性質が必要となる。金属系の材料は、高温での連続使用に適さず、この様な用途には適していない。

また工業炉の場合は単に温度要因のみでなく、鉄、銅、アルミ、ガラスなどを溶融するときには溶融物との接触や加熱に際し発生するガス、スラグ、粉じんなどの接触を考え、耐火物の耐溶損性や耐浸透性などを考慮する必要がある。

本稿では特に鋳造現場で使用される鋳鉄溶解炉(保持炉を含む)に使用される耐火物について記述する。

2. 鋳鉄溶解炉について

鋳鉄鋳物製品の製造現場では、鋳鉄溶湯を得るために溶解～保持工程があり、工業炉として主としてキュポラや誘導炉が使用されている。従来はキュポラによる溶解が主体であったが、近年は、環境改善やCO₂削減などから、るっぽ型誘導炉による溶解が多くなっている。

キュポラは、コークスの燃焼熱を利用して鉄を溶解させるシャフト型の溶解炉で、その大きさや機能から、煉瓦～不定形まで様々な種類の耐火物が使用される。

誘導炉は、電磁誘導によって金属内に発生するジュール熱で溶解を行う電気炉の一種で、鋳鉄溶解工程における誘導炉では、るっぽ型誘導炉が多く使用され、耐火物に主ライングとして耐熱性と経済性からシリカ質の不定形耐火物が一般に使用されている。

同じ誘導炉でも、溝型誘導炉は主として溶湯保持に使用され、国内では主ライングとして耐食性(耐溶損性)に優れるアルミナ質不定形耐火物が一般に使用されている。

* 日本ルツボ株式会社 H. Suzuki

** 同 Y. Nishimura

3. 耐火物の種類

耐火物とは、熱に抵抗性のある原料を主体とした工業材料で、熱を利用する設備またはそれに関連する炉に使用され、高温を必要とする産業（鉄鋼業、鋳造業、廃棄物処理業など）を支える重要な工業材料といえる。金属材料の多くは高温で連続使用すると、酸化する（錆びる）ことが多いため、この様な用途には適していない。

耐火物は、成形～焼成工程を経た定型耐火物と、現場で必要な形状に施工してから使用する不定形耐火物に分類できる。

定形耐火物と不定形耐火物を大別すると、定形耐火物は、耐火レンガやるつぼなどの一定の形状をもつもの、不定形耐火物は、キャスタブル・プラスチック材・ラミング材など定形でない粉体状（練り土状）のものとなる。近年、不定形耐火物を事前に定形化し成形品としたプリシェイプ（プレキャスト）と呼ばれる耐火物も広く使用されている。定形耐火物と不定形耐火物の分類を図1に示す。

近年は、耐火物の技術進歩により耐用が伸びたことや、鉄鋼業鋳造業の生産量減少などにより耐火物全体の生産量は減少している。また、耐火物では不定形耐火物が、定形耐火物と比較して製造工程に成形・焼成工程がないことより製造上エネ

耐火物は、

- 1) 一定の形状をもつものを定型耐火物
- 2) 定形でない粉体状（練り土状）を不定形耐火物
と大きく大別することができる。



図1 定形耐火物と不定形耐火物の分類

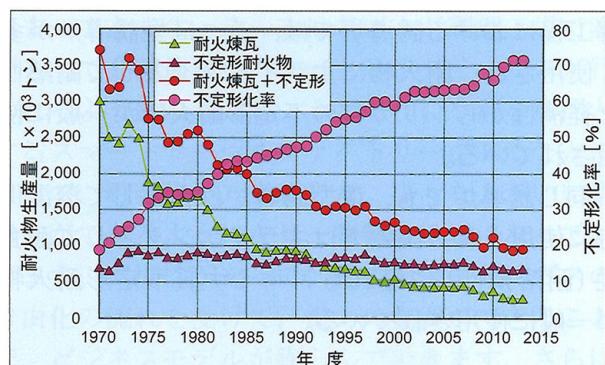


図2 耐火物の生産量推移と不定形化率

ルギーの消費が少なく省エネルギーとなり、短い納期、高い労働生産性を可能としていることから生産比率が多くなっている。耐火物の生産量推移と不定形化率を図2に示す。

耐火物を構成する原料の組成は、融点の高い酸化物系が多いが、非酸化物系（C系、SiC系）、複合系（酸化物系と非酸化物系の複合系）などもある。化学的性質から、酸性耐火物、中性耐火物、塩基性耐火物に大別されるが、これは、高温で酸性耐火物の物質と塩基性耐火物の物質が互いに反応しやすく、融点が下がるなどの傾向があるためこのような分類が利用される。たとえば、酸性耐火物は、塩基性スラグとの接触場所には使用に適さないなどの材質適応時の参考に使用される。耐火物の組成分類を表1に示す。

表1 耐火物の組成分類

	分類	種類	化学成分
酸化物系※)	SiO ₂ 系	珪石、溶融石英	SiO ₂
	Al ₂ O ₃ 系	アルミニア、高アルミニア	Al ₂ O ₃
	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 系	ローラー、シャモット	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂
	ZrO ₂ 系	ジルコニア	ZrO ₂ ・SiO ₂ , ZrO ₂
	MgO系	マグネシア	MgO
	MgO-Cr ₂ O ₃ 系	マグクロ	MgO-Cr ₂ O ₃
	MgO-CaO系	ドロマイド	MgO-CaO
非酸化物系	MgO-Al ₂ O ₃ 系	スピネル	MgO・Al ₂ O ₃
	C系	カーボン	C
	SiC系	炭化ケイ素	SiC, C
	SiC-C系	炭化ケイ素-カーボン	SiC, C
複合系	SiC-Si ₃ N ₄ 系	炭化ケイ素-窒化ケイ素	SiC, Si ₃ N ₄
	MgO-C系	マグネシアカーボン	MgO, C
	Al ₂ O ₃ -C系	アルミニカーボン	Al ₂ O ₃ , C
	Al ₂ O ₃ -SiC-C系	アルミナ炭化ケイ素カーボン	Al ₂ O ₃ , SiC, C

※) RO：塩基性耐火物、R₂O₃：酸性耐火物、
R₂O₃：中性耐火物と称する場合がある（Rは基を示す）。

また、耐火物は適応される炉体や部位によってさまざまな形状や施工方法を適応することができる。耐火物分類を表2に示す。

表2 耐火物分類

分類	種類	施工	特色
定型品	煉瓦 プリシェイプ（PC）品	煉瓦積みには 技術が必要 施工に工数必要	乾燥が不要（容易）
流し込み材 (キャスター)	汎用タイプ 特殊(低水分高性能)タイプ	加水混練 流し込み施工	乾燥が必要 施工が容易
プラスチック材	プラスチック材（硬い） パッティング材（柔い）	硬い：ライマー施工 柔い：手で施工	乾燥が必要 施工が容易
湿式ラミング材 スタンプ材	湿り気のある練り土状	ランマー施工	乾燥が短い 施工が容易
乾式ラミング材 ドライ材	加水無く、粉体のまま 使用	振動工具	乾燥が不要 施工が容易

4. 耐火物の特性

炉に使用される耐火物の目的は、炉を高温から保護すること、安全性を確保することがあげられる。このため、用途に応じた特性を持つ多種類の耐火物が存在する。耐火物の主な特性を表3に示す。

表3 耐火物の主な特性

基礎組成	化学成分、鉱物組成
一般物性	比重、気孔率
強度特性	圧縮強度、曲げ強度
容積安定性	線変化率、熱膨張率
耐熱性	耐火度
保温性	熱伝導率
耐食性	溶融物(金属・スラグ)に対する抵抗性
耐スパール性	吸熱急冷に対する抵抗性
耐ガス性	ガス成分による抵抗性
耐酸化性	炭素系耐火物の酸化に対する抵抗性
耐酸性	酸に対する抵抗性
耐薬品性	各種薬剤に対する抵抗性

工業炉は各種目的に合わせて設計されるためその機能を発揮するために適合する耐火物を、特性面・機能面・施工面・経済面で選定し適用することが重要である。

5. キュポラへの耐火物の適応

キュポラへの耐火物の適応例を図3に示す。

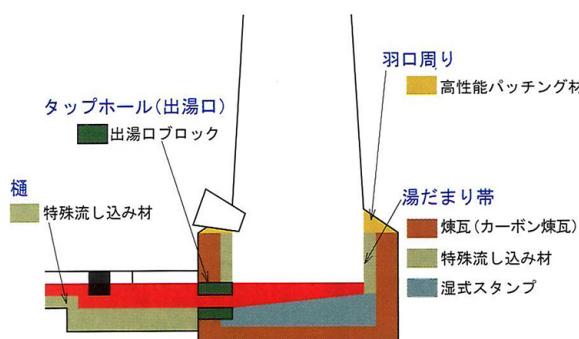


図3 キュポラへの耐火物の適応例

予熱帯と呼ばれる羽口より上部は、挿入物の溶解が無いため、煉瓦のみもしくは水冷により耐火物ライニングのないものも多い。

羽口より下部は溶解帯となり溶融金属や溶融スラグとの接触があるため、耐溶損性をもつ耐火物が必要となる。

またキュポラ本体より樋へ出湯される部位の出湯口部位や出湯後に溶湯とスラグを受けて分離を

行う樋部位も耐火物としては過酷な部位となり、高い耐溶損性が必要となる。これらキュポラへの耐火物の必要特性例を表4に示す

表4 キュポラへの耐火物の必要特性例

部位	必要特性	説明	適用耐火物
湯だまり帯	耐熱性 耐食性 熟伝導率	◆溶湯・スラグに対する耐侵食性必要 ◆水冷構造の場合は熟伝導率	煉瓦 湿式スタンプ材 特殊流し込み材
羽口周り	耐熱性 耐食性 施工性	◆溶湯・スラグに対する耐侵食性必要 ◆細部への充填必要	高性能 パッティング材
樋 サイフォンボックス	耐熱性 耐食性	◆溶湯・スラグに対する耐侵食性必要	特殊流し込み材

水冷構造のキュポラでは、缶体鉄皮水冷を利用し耐火物を冷やすことで耐溶損性向上に寄与するよう鉄皮内部の耐火物に熱伝導率の高いカーボンレンガが使用される例が多い。場合によって湿式ラミング材や流し込み材も使用される。

表5 実際に使用される耐火物の特性例

使用部位	湯だまり		羽口周り	樋	
	形態	カーボン煉瓦	スタンプ材	パッティング材	流し込み材
化学成分(%)	F.C 63 Al ₂ O ₃ 20 SiC 13 —	F.C 5 SiO ₂ 23 Al ₂ O ₃ 65 SiC 25	F.C 12 SiO ₂ 12 Al ₂ O ₃ 73 —	F.C 3 SiO ₂ 1 Al ₂ O ₃ 68 SiC 24	1450 °C 烧成 圧縮強度 53MPa
特性	曲げ強度 13MPa	1450 °C 烧成 圧縮強度 53MPa	1450 °C 烧成 圧縮強度 15MPa	1400 °C 烧成 圧縮強度 34MPa	1400 °C 烧成 圧縮強度 34MPa

実際に使用される耐火物の特性例を表5に示す。

キュポラ本体から樋にかけては、溶湯とスラグとの接触があるため、耐火物はアルミナ系ベースで炭素や炭化珪素が配合された複合系が一般に使用されている。

6. るつぼ型誘導炉への耐火物の適応

るつぼ型誘導炉への耐火物の適応例を図4に、必要特性例を表6に示す。

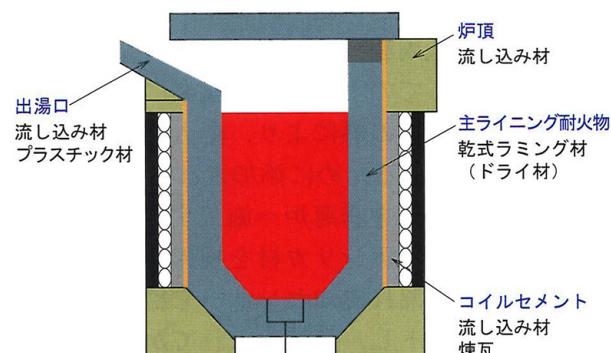


図4 るつぼ型誘導炉への耐火物の適応例

表6 るつぼ型誘導炉の耐火物の必要特性例

部位	必要特性	説明	適用耐火物
炉頂	耐熱性 強度	コイル上部の保護	流し込み材
主ライニング	耐熱性 耐食性	溶湯・スラグに対する耐侵食性必要	乾式ラミング材 (ドライ材)
コイルセメント	耐熱性 耐食性	コイルの保護	流し込み材煉瓦
出湯口	耐熱性 耐食性	溶湯・スラグに対する耐侵食性必要	流し込み材 プラスチック材

るつぼ型誘導炉の主ライニングでは、湯漏れセンサーの誤作動を防止するためや溶解部位背面にコイルがあることから、水分を含む耐火物の使用は好ましくないため、水分を含まない粉状の乾式ラミング材が使用される。乾式ラミング材は、振動を与えることで自重により充填するように設計されており、施工時に各種手法で材料へ加振を行う。また、施工には金属製型枠が使用され施工後は溶解材料と共に溶解するのが一般的で乾式ラミング材は溶解の加熱で硬化し操業に耐える強度を発現する。

鉄鉱溶解の乾式ラミング材は、誘導炉シリカ材が一般に使用される。誘導炉シリカ材は比較的安価で、耐熱性(<1650°C)があり、鉄鉱の操業温度に耐えることから、溶解現場で広く使用される。

誘導炉シリカ材に使用されるシリカ原料は、主として天然に産出する天然シリカと人工的に生産する電融シリカがある。天然シリカは、結晶構造の変化で昇温により独特に膨張する特性をもち、電融シリカは昇温による膨張が非常に小さい特性をもち、コスト的には一般に電融シリカの方が高い。

誘導炉シリカ材では、膨張収縮の特性やコストメリットによって、天然シリカのみで構成された製品や、天然シリカと電融シリカを組み合わせて製造された製品などがあり、操業形態や誘導炉の特色(高周波・低周波)に合わせて使用されている。バインダーとしてのホウ酸は、操業による加熱するわち鉄鉱溶解時の熱により、耐火物に操業に耐えうる強度を与えるために添加される。

誘導炉シリカ材を誘導炉へ施工する場合は、まず炉底部分に誘導炉シリカ材を投入し振動によって充填させ、湯漏れ検知センサーや絶縁物などをコイル側へセットし、型枠を入れてから、誘導炉

シリカ材を投入し振動によって充填させる。施工後は、型枠内に溶解物を入れて、誘導炉に通電し型枠ごと溶解して、誘導炉シリカ材を焼結させる。この作業はシンターと呼ばれ、通常操業より少々高温で溶湯を数時間保持したのちに通常の操業へ入ることが多い。

この様に誘導炉シリカ材は、鉄鉱溶解誘導炉用に設計された、振動による耐火物の充填→昇温(加熱)による耐火物の強度発現という特色を持つ耐火物であることがわかる。

7. 溝型誘導炉への耐火物の適応

溝型誘導炉への耐火物の適応例を図5に、必要特性例を表7に示す。

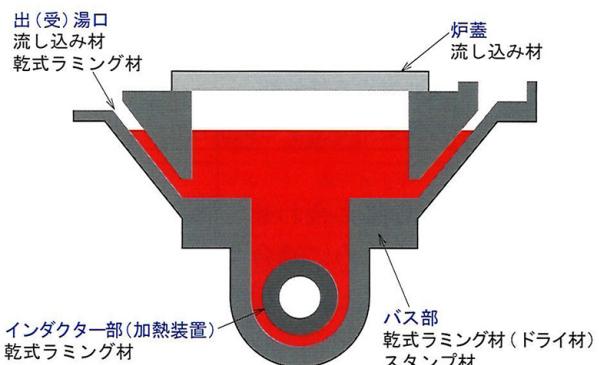


図5 溝型誘導炉への耐火物の適応例

表7 溝型誘導炉の耐火物の必要特性例

部位	必要特性	説明	適用耐火物
炉蓋	保溫性	溶湯の保溫	流し込み材
バス部	耐食性	溶湯・スラグに対する耐侵食性必要	乾式ラミング材 (ドライ材)
インダクター部	耐熱性 耐食性	加熱装置で高温になるため耐熱性も必要	乾式ラミング材 (ドライ材)
出湯口 受湯口	耐食性 強度	溶湯・スラグが動くため耐侵食性と強度必要	乾式ラミング材 特殊流し込み材

溝型誘導炉は、溶湯を保持するバス部と溶湯の保溫を目的に加熱を行うインダクター部がありそれぞれに使用する耐火物が異なる。

バス部では、長期耐用が必要なことから耐火物はシリカ系ではなく耐食性の高いアルミナ系が一般に使用される。日本では工期の関係から、乾燥工程が短い乾式ラミング材が使用されるが、外国などで予備炉があり工期に余裕のある場合は流し込み材を使用する例もある。

インダクター部では、コイルがあることから、水分を含む耐火物の使用は好ましくなく、乾式ラミング材が使用される。またインダクター部は加熱装置であり、高温・過酷使用となることから耐火物は耐熱性の高いアルミニナ・マグネシア系が使用される。実際に使用される耐火物の特性例を表8に示す。

表8 溝型誘導炉で実際に使用される耐火物の特性例

使用部位	炉蓋	バス部	インダクター部	受湯口・出湯口
形態	流し込み	乾式ラミング材	乾式ラミング材	流し込み
化学成分(%)	Al ₂ O ₃ 53 SiO ₂ 41 —	SiO ₂ 4 Al ₂ O ₃ 89 SiC 4	SiO ₂ 1 Al ₂ O ₃ 89 MgO 7	SiO ₂ 4 Al ₂ O ₃ 85 SiC 9
特性	1400 °C 焼成 圧縮強度 31MPa	1400 °C 焼成 圧縮強度 76MPa	1400 °C 焼成 圧縮強度 32MPa	1400 °C 焼成 圧縮強度 98MPa

8. 新技術について

鉄溶湯を得るためにのるっぽ型誘導炉での溶解が近年増加してきたことはすでに述べた。このるっぽ型誘導炉に使用される炉材について、耐用を伸ばすために、定形シリカ質ルツボ品（プリシェイプ品）を開発した。

るっぽ型誘導炉では不定形材の誘導炉シリカ材が広く使用されているが、定形耐火物を使用することにより図6の様な利点がある。

のことから、シリカ質流し込み材を開発し、シリカ質プリシェイプ品として誘導炉へ適用できるようにした。

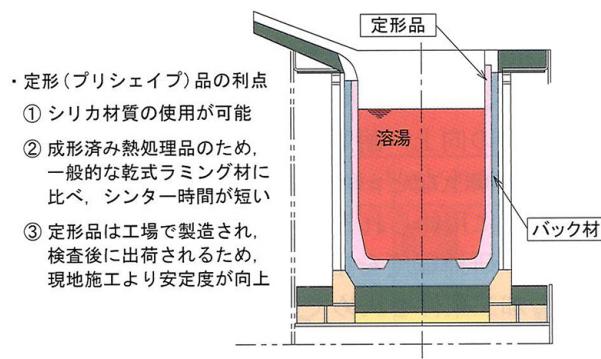


図6 定形耐火物を使用することの利点

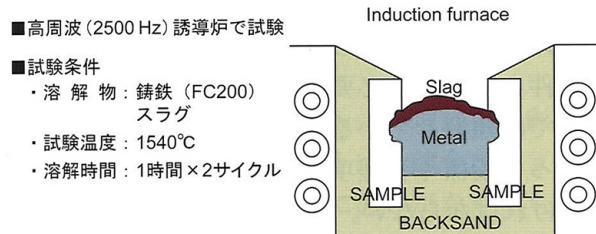


図7 耐食性評価実験の実験条件

評価として、高周波誘導炉を使用してシリカ質プリシェイプ品と従来の誘導炉シリカ材の耐食性比較を実施した。図7に実験条件を示す。

実験したサンプルは、樹脂含浸を行った後にダイヤモンドカッターにて切断してその溶損量で評価を行った。この実験結果を表9に示す。

表9 耐食性評価実験の実験結果

サンプル	溶損量※ (mm)	溶損比率	切断面写真
シリカ質定形 (プリシェイプ品)	8.1	100	
電融シリカ材 (乾式ラミング材)	9.4	116	

※ 溶損比率は数字小が良

この実験結果より、定形シリカ質プレキャスト品は、従来の誘導炉シリカ材と比較して溶損量が小さく、耐食性が高いことが分かった。

尚、本品は実炉供試を行い、耐用が25%向上した実績がある。

9. まとめ

鉄溶浴保持炉に使用される耐火物について、その種類特性から各種工業炉への適用を示した。

耐火物はその名が示す通り、火（高温）に耐える物（材料）であるが、その原料構成、製品形態、施工条件などで様々な形態が存在し、工業炉の特色を生かすために各種工夫がなされていることがわかる。

耐火物メーカーは、機能向上のために日々研究を重ねているが、このことは耐火物の耐用を向上させ、長寿命化や省エネルギー化に寄与している。工業炉の発展を支えるものとなっている。

鉄溶浴保持炉に使用される耐火物も重要な役割を担っており、今後も使用用途に応じた進化を続けていくこととなる。