

日本製鉄(株)における耐火物技術の進展と今後の展望

Progress and Future Prospect of Refractory Technology in Nippon Steel Corporation

竹内 友英* 多喜徳 雄
Tomohide TAKEUCHI Norio TAKI

抄 録

耐火物技術は、高品質な鉄鋼製品の低コストかつ安定した製造を実現するため、製鉄技術の進歩や操業条件の過酷化とともに発展してきた。さらには、操業安定化のための点検診断技術、環境調和としての使用済み耐火物のリサイクル技術、作業環境改善としての築炉作業の機械化、自動化にも取り組んできた。主に2000年以降における耐火物技術を取り巻く環境とこれまでの取り組みを概説し、今後の展望について述べた。

Abstract

Refractory technology is one of the key technologies in the steel industry and was developed with advances in iron and steelmaking technology that often required rigorous operating conditions such as high temperatures, severe corrosion, and prolonged processing. Refractory technology comprises a very wide range of technologies, from the study of durable or low-cost materials to the setting or design of refractory linings that contribute to low-cost, stable and high-quality steel production. In recent years, the development of refractories has been expanded to fields such as inspection and diagnostic technology for stabilizing the life of refractories, recycling of used refractories as an environmentally conscious system, and automation of furnace construction work to improve the working environment. This paper provides an overview of the environment surrounding refractory technology of the 2000s, an overview of the technology development, and an outlook for the future.

1. はじめに

鉄鋼業において、耐火物は鋼材の製造コストや品質に与える影響が大きく、極めて重要な位置を占めており、需要家要求の多様化、高度化に伴う製鉄技術の進歩や操業条件の過酷化とともに発展してきた。特に、生産性向上とコスト改善の両面から長寿命化技術開発を、築炉設備の老朽化に対しては診断技術や補修技術の開発を進めてきた。すなわち、製鉄部門におけるコークス炉の高炉齢化、高炉の大型化、製鋼部門における予備処理工程の多様化(脱珪、脱硫、脱燐、脱炭の分離)、二次精錬比率の上昇、連続铸造機の生産性向上(高速化や稼働率向上)などに対応して、耐火物への要求も高度化してきたと言える。

一方で、団塊の世代を中心とした熟練層が製造現場の第一線から退き、世代交代が急速に進んだことも近年の大きな変化の一つである。技能伝承を円滑に進めるとともに、

経験に頼らないスキルフリー化が求められ、点検診断技術の開発や作業の標準化に取り組んできた。

また、環境経営の観点から、製鉄所構内で発生する廃棄物の系外排出をゼロとする“ゼロエミッション”が求められており、使用済み耐火物のリサイクルを推進してきた。

さらには、少子高齢化が進む中で、ともすれば3K職場と言われる築炉現場の環境を改善するために築炉作業の機械化、自動化にも取り組んでいる。

日本製鉄(株)の耐火物技術の振り返りとしては、前回の新日鉄技報の耐火物技術特集号(2008年)以来12年ぶりとなる。ここでは、前回特集号以後を中心に、主に2000年以降の耐火物技術の歩みを述べるとともに、今後の課題についても考えてみることにする。なお、耐火物技術の詳細については本特集号の各論文・報告を参照されたい。

* 設備・保全技術センター 無機材料技術部長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

2. 2000年以降の鉄鋼用耐火物を取り巻く環境の変化

2.1 耐火物生産量と輸入量の推移

日本国内の耐火物生産量(全産業向け合計)を図1に示す²⁾。耐火物の日本国内生産量は1990年代に低下し、図2に示すように輸入品に置き換えられてきた³⁾。足元の国内生産量は1000~1100千tレベルで推移している。

鉄鋼向けの耐火物の輸入品としては、汎用性の高い一般的な焼成れんがや中級グレード以下のマグネシア-黒鉛(MgO-C)質不焼成れんが等が主体である。また、コークス炉や熱風炉の建設に使用される珪石質れんがやシャモット質れんがもそのほとんどを海外からの輸入に依存している。一方で、鋼品質に大きな影響を与える連続鋳造用ノズルを主体とした機能性耐火物、生産性が高く輸入品に対して競争力のある不定形耐火物、一部の高級グレード(高耐用品)の耐火れんがなどは引き続き国内で生産されている。

耐火物の輸入量は1990年代後半から急拡大し2008年に388千tに達したが、2009年以降は、急激に減少し2016年には177千tとピークであった2008年の半分以下となった。これは北京オリンピック(2008年)を契機とした中国国内の大気汚染対策強化のために主に原料工場の稼働停止や運搬制限がなされたこと、中国国内の賃金上昇や為替の影響によって中国からの輸入品の価格が割高となり一部の品種で国産品の競争力が相対的に増したことから、2017年からはさらに環境規制が厳しくなり中国の天然マグネシア鉱山の

採掘規制やれんが焼成炉の操業規制がたびたび行われ供給不安が広がったこと、などがその要因として挙げられる。しかし現状は耐火物原料を含めて中国からの輸入に大きく依存しており、調達面でのリスク分散は大きな課題と言える。

2.2 粗鋼生産量と鉄鋼向け耐火物販売量の推移

世界および日本国内の粗鋼生産量を図3に示す⁴⁾。世界の粗鋼生産量は1992年の7.2億tから徐々に増加し、2000年代に入るとBRICs、とりわけ中国の経済成長とともに急増し2004年に10億tを超えた。2008年のリーマンショックで一旦低下したものの、その後も順調に伸び続け、2018年にはついに18億tを超えた。一方で日本国内の粗鋼生産量は2010年に1.1億tに回復して以降は横ばいで推移しており、直近はむしろ漸減傾向にある。

鉄鋼向けの耐火物販売量を図4に示す²⁾。概ね国内生産量と同様の傾向であるが、直近の2016~2018年度は生産

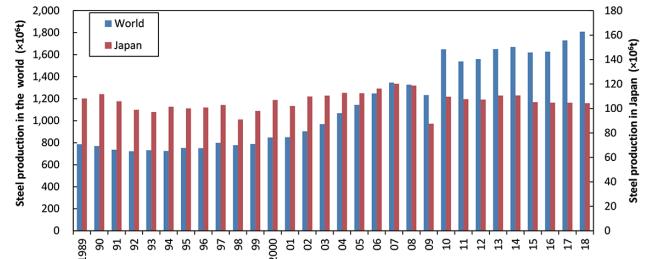


図3 粗鋼生産量推移
Transition of steel production

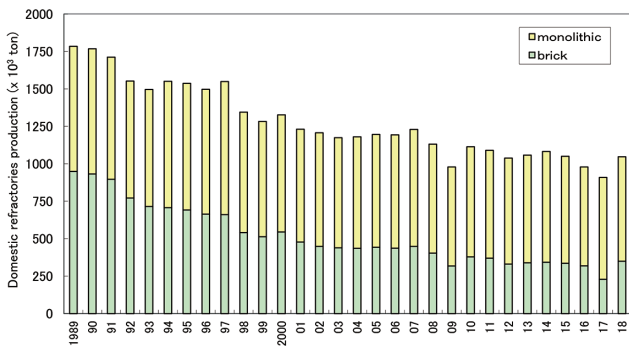


図1 国内耐火物生産量推移
Domestic refractory production

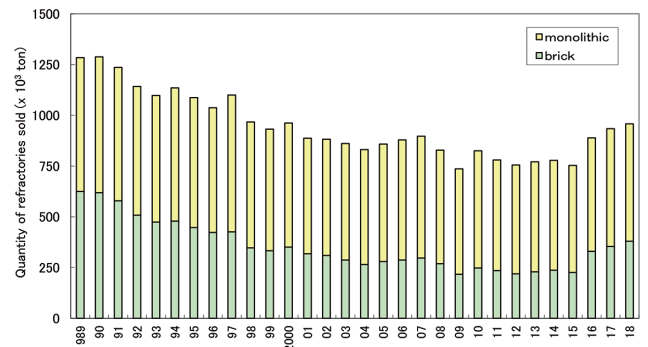


図4 鉄鋼向け耐火物販売量推移
Transition of quantity of refractories sold for steel industry

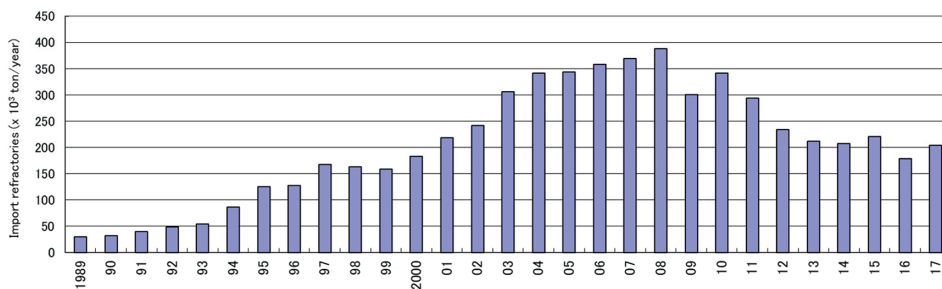


図2 輸入耐火物量推移
Transition of amount of import refractories

量に比べて販売量が増加している。

2.3 国内鉄鋼業における耐火物原単位の推移

前出の鉄鋼向け耐火物販売量を国内粗鋼生産量で除した国内鉄鋼業における耐火物原単位を図5に示す。耐火物寿命延長や補修量の適正化等の取り組みにより耐火物原単位は順調に低下してきた。2008年のリーマンショックで一時的に悪化したものの、その後も漸減し2014年には7.0kg/tレベルになっていたが、2016年以降急激に上昇に転じている。一つは定形耐火物(れんが)の販売量が急増しており、設備老朽更新に伴う建設用れんがの需要が増大したものと考えられる。また、鉄鋼各社で設備トラブルによる減産が顕在化した時期でもあり、安定生産重視の操業(余裕のある炉寿命設定や過剰な補修等)が志向された影響もあるものと推察される。

2.4 国内および海外の研究開発環境

海外における耐火物技術関連の研究開発は、欧州と中国において特に活発に行われている。

欧州はドイツにあるヨーロッパ耐火物センターを中心に各国の大学、公的研究機関、企業が幅広く連携している。大学や公的研究機関が基礎研究と人材育成を担い、耐火物メーカーは応用的な研究や製品開発に特化しており、鉄鋼メーカー等の耐火物ユーザーはあまり関与していないようである。また、欧州が中心となってFIRE(Federation for International Refractory Research and Education:国際耐火物研究教育連盟)が運営されている⁹⁾。欧州内外から大学・公的研究機関10機関と企業12社が参加する世界的ネットワークであり(日本からは名古屋工業大学が参加)、参加企業各社が社員を大学に派遣するプログラムを通じて次代を担うエンジニアの育成を進めるとともに、国際的な研究と産業コンソーシアムを目指した活動を展開している。

中国は大学を中心とした研究開発体制をとっている。9つの大学に耐火物に関する研究室が設けられ、学部生約1500名、大学院生約200名が在籍しており、世界最大の人材供給基地ともなっている。また、各大学には高温材料研究所や炉ライニング技術の工学研究センター等も設置さ

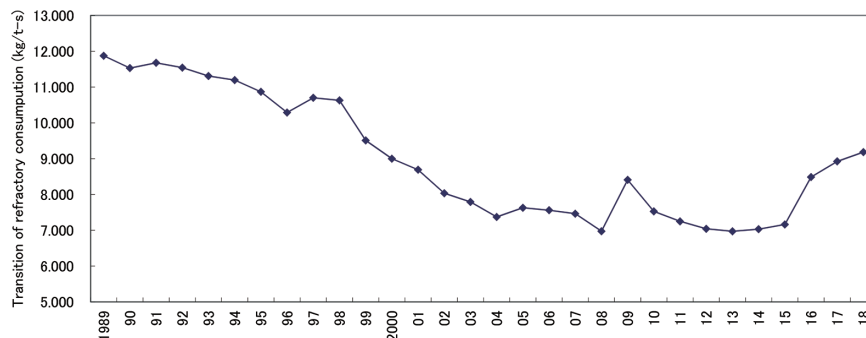


図5 耐火物原単位推移
Transition of refractory consumption

れ、国家重点研究施設として位置付けられている。

一方で、日本における耐火物技術研究の担い手は民間部門が中心であり、耐火物メーカーと鉄鋼メーカーをはじめとするユーザー側が連携して開発を進めることに特徴がある。公的研究機関の中で耐火物の研究を行っているのは京都工芸繊維大学や名古屋工業大学、岡山セラミックス技術振興財団等の数機関に限られ、基礎研究と人材育成・供給の体制が不十分と言わざるを得ない。

3. 日本製鉄における鉄鋼製造プロセスと耐火物の変遷

3.1 製鉄工程

高炉については図6に示すように高炉改修毎に炉容拡大を図り、2020年4月時点で稼働中の12基中9基が内容積4000m³以上(内7基は5000m³以上)の大型高炉となっている。そのため炉底カーボンブロックなど大型高炉での高出鉄比に耐え得る耐火物の開発を進めてきた。熱風炉については、炉齢が古いもので40年を超えており更新時期を迎えている。熱風炉の延命対策の推進と更新が検討される中で、診断・補修技術の高度化にも取り組んでいる。

コークス炉の炉齢分布を図7に示す。2008年から順次新設や更新に取り組んでおり、全28炉団中11炉団が炉齢12年以下となっている。一方で炉齢40年以上の老朽炉が16基を数え、今後も更新を続けていかなければならない。また、この更新タイミングでの実用化を目指してSCOPE21

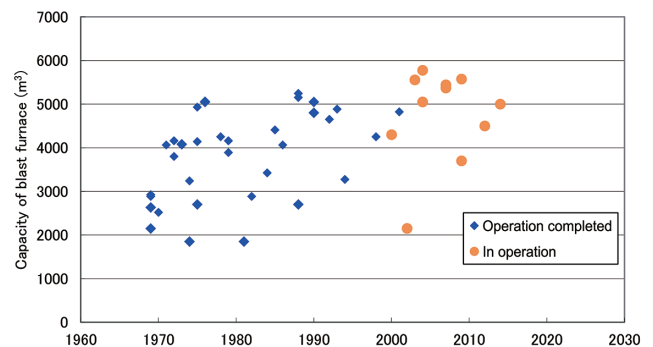


図6 日本製鉄における高炉炉容推移
Transition of capacity of blast furnace in Nippon steel

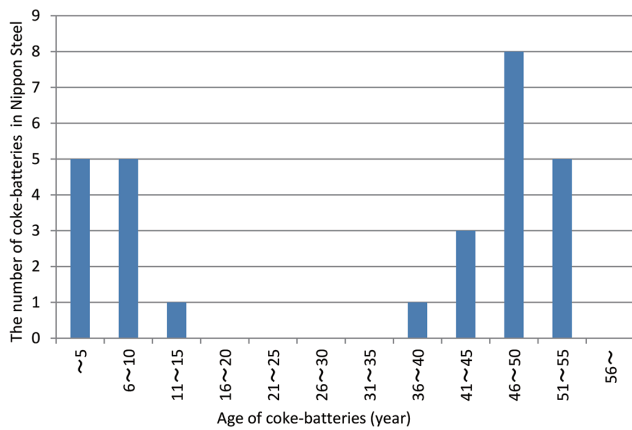


図7 日本製鉄におけるコークス炉炉齢
Age of coke-batteries in Nippon steel

プロジェクトが進められ、2008年に大分、2013年に名古屋にて実機化している⁶⁾。稼働炉の長寿命化対策としては熱間積替えの実施のほか、熱間で高精度に炉壁を診断、補修する装置(DOC: Doctor of Coke Oven)の開発が進められ、2003年の大分への導入を皮切りに各製鉄所への導入を順次進めてきた⁷⁾。

3.2 製鋼工程

製鋼工程における予備処理・一次精錬工程については混銑車、溶銑鍋、転炉を精錬容器として利用し、脱炭処理の前に脱珪、脱硫、脱磷を行う溶銑予備処理と転炉の上底吹き化という今日のプロセスが1980年代までにほぼ出来上がった。その後、さらなる精錬効率向上を図るため、脱硫工程の分離(インジェクション法、KR(Kanbara Reactor)法)、脱磷・脱炭工程の分離(LD-ORP(LD-Optimized Refining Process)法、MURC(Multi-Refining Converter)法)が進められ、今日に至っている。近年は、原燃料の劣化問題が顕在化しつつあり、特に溶銑中のシリコン濃度の上昇は溶銑予備処理工程での脱珪処理の負荷増大を招いている。各プロセスに適した耐火物として、MgO-C質やアルミナ-炭化珪素-黒鉛(ASC)質等の不焼成れんがの改良を進めてきた。また、転炉におけるオンラインでの耐火物保護としてスラグプラッシュコーティング(SSC)を実機化し、適切なスラグ成分や温度等の条件を見出して効果的に活用している。

一方、二次精錬工程においては、従来からの厚板向け溶鋼の脱水素処理に加え、IF(Interstitial Free)鋼などの脱炭処理のニーズが急増した。また、RH(真空脱ガス)設備に関しては連続的に処理を行うことで槽内温度を維持し耐火物コスト低減や転炉吹き止め温度低減が可能となることから、一般処理鋼種へのRH軽処理の適用拡大と熱間耐火物補修設備の導入による全量RH処理を一部の製鉄所で実施している。脱ガス槽用耐火物は溶製する鋼種が多種多様となる中で操業条件にあわせた材質選定と開発がより重要と

なっている。

連続 casting 工程においては生産性の向上に向けた高速 casting 化や casting 断面拡大、多連続 casting 化等、また品質高度化に向けては非金属介在物、内部欠陥、中心偏析の低減対策が進められてきた。連続 casting 用耐火物に関しては溶鋼の流量制御、酸化・汚染防止、飛散・流出防止といった基本機能に関する信頼性の向上やさらなる高度化が求められている。例えば、タンディッシュドライコーティング技術は施工に水を用いないため水素ピックアップ防止に高い効果を上げている。また、母材との焼き付きが生じにくいいため使用後の解体作業時間を短縮でき、母材の損傷も抑制できる。

3.3 圧延工程

熱間圧延用鋼片加熱炉においては、省エネルギーの観点からリジェネレイティブバーナー化とセラミックファイバー化が進められてきた。しかし、炉内に飛散する酸化スケール等によるセラミックファイバーの損傷が大きい場合は、耐スケール性に優れるカルシウムアルミネート系断熱キャストブル⁸⁾や、従来の耐火ライニングの背面に高性能断熱材を適用する場合もある。

薄板用連続焼鈍炉は、炉内耐火物が脱落して生じる板疵の対策と省エネルギーの観点から、耐火断熱れんがからセラミックファイバー+ステンレス鋼板被覆への転換を順次進めてきた。一方で、近年の高強度鋼板等のニーズに対応した高温操業化に伴って、ステンレス鋼板の劣化が進み課題となっている。

4. 日本製鉄における耐火物技術の進展と今後の展望

これまで述べてきた外部環境と生産設備の変化に対応して耐火物技術が取り組むべき主要な課題は、以下の4点である。

- ①操業条件苛酷化に対応した高耐用化
- ②操業・設備安定化のための診断技術の高度化
- ③築炉工に依存しない工法や機械化技術の開発
- ④使用済み耐火物の系外排出ゼロ化

これらの課題に対応して、日本製鉄において取り組んできた耐火物技術開発について表1にまとめた。全体の傾向は補修等の施工技術、リサイクル技術、評価・解析技術等が中心となっている。製鉄所からは実機寿命延長等の取り組みも多く報告されている。その内容も耐火物材料技術のみならず、耐火ライニング構造、操業技術、施工技術、補修技術、測定・診断技術等に総合的に取り組んだものが多い。

4.1 操業条件苛酷化に対応した高耐用化

操業条件苛酷化は主に劣質原燃料の使用拡大、ハイエンド鋼種や難製造鋼種の生産比率拡大、品質向上や生産性向

表1 日本製鉄における主要耐火物技術の変遷
Progress of new refractories technology in Nippon Steel

	2000–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2018
Material	<ul style="list-style-type: none"> Applying of plasma spray gunning technique to ZrO₂-C Low thermal conductivity for MgO-C Nano-technology MgO-C Carbon block with TiC for blast furnace Insulating refractories for reheating furnace 	<ul style="list-style-type: none"> Chrome-free brick for second refining process MgO-C brick with excellent thermal fatigue resistance Improvement of shotcrete material for torpedo car 	<ul style="list-style-type: none"> Coating material for ceramic fiber blanket Foaming thermal insulation castable Anti-clogging Immersion nozzle (AI nozzle) 	<ul style="list-style-type: none"> Control of peeling slag protection layer at MgO-C brick
Construction of brick lining	<ul style="list-style-type: none"> Monolithic lining technique for upper part of RH degassing 	<ul style="list-style-type: none"> Improvement of brick lining of for corn of BOF 		<ul style="list-style-type: none"> Reinforcement of the support structure for ceramic fiber blocks in reheating furnace Structural stabilization by improving the bottom lining in electric furnace Improvement of the lance injection port refractory for desilicization of molten iron in torpedo car
Mechanization of brick work	<ul style="list-style-type: none"> Microwave drying I for monolithic refractories Microwave drying for of RH 	<ul style="list-style-type: none"> Microwave drying II for monolithic refractories 		
Repair and diagnosing technique	<ul style="list-style-type: none"> Rotary shot repair method 	<ul style="list-style-type: none"> Repair and diagnosing technique for coke-oven chamber Shortening the time required to change the converter tap hole non-destructive diagnostic technology for refractories using radiation 	<ul style="list-style-type: none"> Hot Quick Mixing Injection and Mist Injection (H-QMI) Dry coating technology for tundish Quick Mixing Shotcrete (QMS) 	<ul style="list-style-type: none"> Improvement of hot injection process Application of mist injection shot technology to tundish coating material
Demolish and recycle technique	<ul style="list-style-type: none"> Recycle technique for refractories in NSC Auto-ripping machine for refractory maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> Recycle technique for refractories in Nagoya, Oita, Yawata and Kimitsu Works 	<ul style="list-style-type: none"> Technology for applying recycled refractories to reheating furnace 	
Evaluation method	<ul style="list-style-type: none"> Application of stepwise heating method to MgO-C brick X-ray photography method for slag penetration in magnesia brick Mechanical characteristics with coarse-grained to monolithic refractory The design of Al₂O₃-C ladle shroud suitable for long-time use and reuse Analysis of brick structure using the rigid bodies-spring model Basic study of alkali resistance in reduction atmosphere 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluation of cyclic thermal treatment for corrosion resistance of MgO-C brick Evaluation of characteristic image of Al₂O₃-C by TEM Evaluation method for corrosion resistance of refractories for degasser 	<ul style="list-style-type: none"> Microstructural analysis of refractories for blast furnace main through Technology to control the adhesion of inclusions to submerged nozzles 	<ul style="list-style-type: none"> Acoustic emission evaluation of cracks generated during bending fracture of MgO-C brick

上を目的としたプロセス変更等によって生じ、これまでも高耐用材料や補修技術の開発にて対応してきた。

例えば、高炉炉底用のカーボンブロックにおいては、大型高炉での高出銑比操業に対応すべく高耐用化開発を進めてきた。図8にその開発推移を示す。溶銑に対する耐食性の向上、溶銑侵入を抑制する気孔微細化、稼働面温度を低下させる高熱伝導性に加えて、稼働面近傍の溶銑の粘性を上げて溶損を抑制する機能を付与した新たな材質を開発した^{9,10)}。

また、転炉用のMgO-C質れんがにおいては、LD-ORP法やMURC法をはじめとする新プロセスが適用されてい

く中で、転炉の稼働率を高めるために高耐用化(長寿命化)が求められてきた。MgO-C質れんがの損耗原因は黒鉛の酸化消失やMgOの還元消失(MgO-C反応)による組織劣化であるが、ナノレベルの炭素原料を活用した低黒鉛化技術¹¹⁾やMgO微粉量を削減することでMgO-C反応を抑制する技術を開発してきた(図9)¹²⁾。

ほかにも、高性能分散剤を適用して添加水分を大幅に低減した緻密質アルミナ-マグネシア質不定形流し込み材や自溶性材質を適用した難付着性ノズル^{13,14)}などを開発してきている。

また、熱間補修技術に関しては、粉体をエア搬送し、ノ

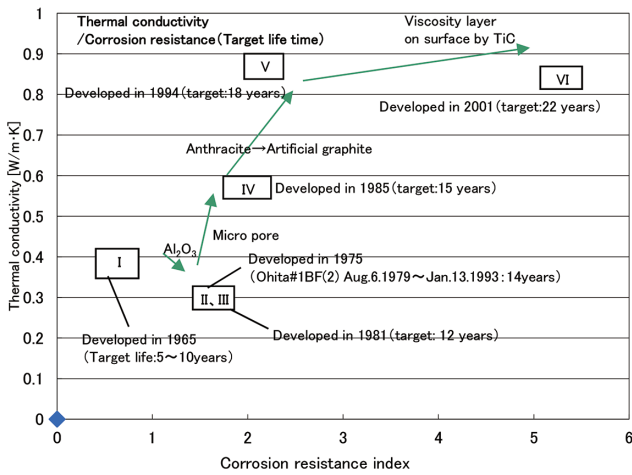


図8 カーボンブロックの開発推移
Development of carbon block

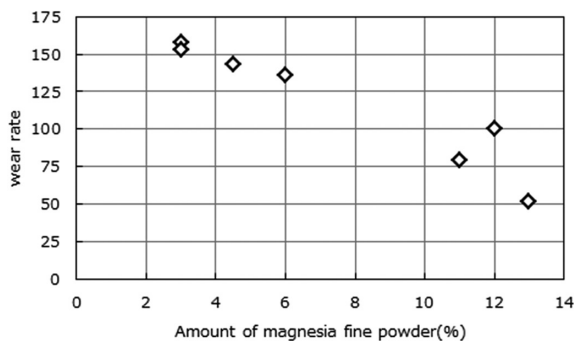


図9 MgO-C 質れんがにおける MgO 微粉量と損耗速度の関係
Relationship between amount of MgO fine powder and wear rate on MgO-C brick

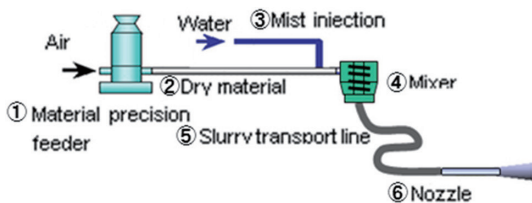


図10 連続・瞬間混練吹付装置構成
Schematic diagram of H-QMI

ズル先端で水を添加する乾式吹付工法が主流である。この工法は粉体と添加水との混合が不十分であるため添加水分が過剰となり施工体組織が高気孔率で不均一になる欠点がある。そこで、新たに開発した連続・瞬間混練機構を適用して低水分化による緻密化、高耐用化を図った連続・瞬間混練吹付補修技術(H-QMI)を実用化した^{15,16)}。図10にH-QMI装置の概略を示す。また、冷間補修専用としては、材料搬送にエア搬送やポンプ圧送を用いないことで水分添加量を低減して高品質な施工体が得られる高耐用吹付補修技術(ロータリーショット¹⁷⁾、瞬間混練ショット(QMS)^{18,19)}を開発、実用化している。

4.2 操業・設備安定化のための診断技術の高度化

操業苛酷化や設備老朽化を背景として、操業・設備安定化が重要になっており、耐火物技術の面からは診断技術の高度化が求められている。近年進展した例としては、レーザープロフィールメータやサーモビューア(赤外線カメラ)によるオンライン診断装置の導入が挙げられる。特に、レーザープロフィールメータは、急速な情報技術の進展により大量のデータを高速に処理できるようになったことから、レーザースキャナを用いた3D測定を短時間で行うことが可能となり、各製鉄所に導入して活用している^{20,21)}。熱間での耐火物残存の定量的な把握が可能となったことから、操業・設備安定化のみならず、耐火物を極限まで使い切ることで耐火物コストの低減にも寄与している。

一方で、熱風炉や加熱炉、焼鈍炉といった操業中に炉内を確認することができない密閉型の長周期炉の診断技術についても開発を進めている。さらには、AIやビッグデータ解析といった最新の情報技術を活用し、耐火物の損傷状況をより正確にとらえ、操業条件との関係から将来の損耗を予測し、補修計画に反映させるような、次世代型の診断システムを実現していく必要がある。

4.3 築炉工に依存しない工法や機械化技術の開発

今後も大型設備更新の継続が想定される中で、少子高齢化による人手不足が進行すると考えられる。このような環境下では、専門職である築炉工に依存しない簡易な工法の開発によって、人手の確保のみならず現場の環境改善や工期短縮を実現して、設備更新を遅滞なく進めていく必要がある。これまで不定形化による省力化は進められてきたが、一方で今れんが積みは人手に頼っている。今後はれんが積み作業の機械化、自動化にも取り組んでいく必要がある。また、熱間の耐火物補修のような暑熱重筋作業についても機械化、遠隔化を進めていかなければならない。

4.4 使用済み耐火物の系外排出ゼロ化

これまで使用済み耐火物の系外排出を削減するためにリサイクル技術の開発を進め、分別回収、運搬、破碎、分級、梱包、品質管理といった操業・設備技術と不定形耐火物への配合技術の高度化により、2000年代に君津・名古屋・八幡・大分各製鉄所にて設備化、工程化し²²⁾、耐火物コストの低減にも貢献してきた。また、不純物の多い低級品についても転炉造滓材、路盤材への活用等の用途開発を進め、埋め立て処分量の大幅な削減を実現している。今後は、引き続き使用後耐火物の用途開発や活用しやすい材質の開発を進めて系外排出ゼロ化(ゼロエミッション)を実現するとともに、環境負荷の低い不定形耐火物や不焼成れんがへの転換や窯炉の断熱強化をさらに進めることで二酸化炭素排出量の低減に取り組んでいく必要がある。

5. おわりに

本稿では、主に2000年以降における耐火物を取り巻く環境変化と耐火物技術の開発・実機化概要について述べた。この20年間は、中国をはじめとする外部環境の変化や新興ミルの拡大による競争の激化、世代交代の急激な進展等、激動の時代であったが、今後も耐火物技術を取り巻く環境は益々厳しくなると考えられる。

耐火物技術は、これからの厳しい競争を勝ち抜くための高効率安定操業を支える競争力の源泉の一つであるとの認識のもと、各工程技術部門、設備技術部門とも緊密に連携し技術先進性の一翼を担っていく。

参照文献

- 1) 松井泰次郎 ほか：新日鉄技報. (388), 41 (2008)
- 2) 耐火物協会：耐火物協会会報. (829), 12 (2019)
- 3) 耐火物協会：耐火物協会会報. (829), 26 (2019)
- 4) 日本鉄鋼連盟：会社別生産実績
- 5) Rigaud, M. et al.: Silicates Industriels. 71 (5/6), 79 (2006)
- 6) 上坊和也 ほか：日本製鉄技報. (413), 185 (2019)
- 7) 境田道隆 ほか：新日鉄技報. (384), 63 (2006)
- 8) Garsel, D. Van. et al.: Proceedings of UNITECR1999, 1999, p.181
- 9) Nitta, M. et al.: 21C-11: UNITECR2003 Congress, Osaka, 2003, TARJ
- 10) Miyamoto, S. et al.: 14-E-15: UNITECR2019, Congress, Yokohama, 2019, TARJ
- 11) 田村信一 ほか：耐火物. 61 (5), 241-247 (2009)
- 12) 梅田真悟：特開 2007-297246
- 13) 辻野良治：鉄と鋼. 80, 765 (1994)
- 14) 緒方浩二, 天野次朗, 森川勝美：耐火材料. (152), 24 (2004)
- 15) 花桐誠司 ほか：耐火物. 64 (3), 120 (2012)
- 16) 古田洋一 ほか：耐火物. 64 (3), 121 (2012)
- 17) 今川浩志 ほか：耐火物. 60 (9), 488 (2008)
- 18) 花桐誠司 ほか：耐火物. 65 (1), 30 (2013)
- 19) 古田洋一 ほか：耐火物. 65 (1), 32 (2013)
- 20) 澤井重人：日本鉄鋼協会第94回耐火物部会大会. 鹿島, 2016-6, 私信
- 21) 森田浩二 ほか：CAMP-ISIJ. 23 (2), 955 (2010)
- 22) 花桐誠司 ほか：新日鉄技報. (388), 93 (2008)



竹内友英 Tomohide TAKEUCHI
設備・保全技術センター 無機材料技術部長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



多喜徳雄 Norio TAKI
設備・保全技術センター 無機材料技術部
無機材料技術室長