

技術解説

# 炉材技術開発の歩みと今後の展望

## Development of Refractory Technology

後藤 潔\*  
Kiyoshi GOTO  
新田 法生  
Michio NITTA

花桐 誠司  
Seiji HANAGIRI

河野 幸次  
Kohji KOHNO

筒井 康志  
Yasushi TSUTSUI

### 1. はじめに

炉材（耐火物）技術は鉄鋼製造における“湯道”を司っている。新日本製鐵では炉材ユーザーとしての立場から、材料の開発、選定、築造、保守、廃却の各工程を絶えず変革することで、鉄鋼製造技術を革新し生産基盤を確固たるものにしていく。

当社では様々な炉材技術の開発を推し進め、炉材原単位はここ30年でおおよそ40%低下している（図1）。以下では代表的な開発事例を紹介する。

### 2. 代表的な技術紹介

#### 2.1 高炉炉底用カーボンブロック

高炉炉底用耐火物として当社では1951年よりカーボンブロックを使用している。カーボンブロックは高耐食性と、冷却による保護層形成を容易にするために高い伝熱性を具備する必要がある。使用後カーボンブロックの調査を元に、溶銑浸透を防止し高耐食化、高熱伝導化を進めてきた。近年では、界面の保護層を積極的に形成することで更なる高耐食性化を図っている。

焙焼無煙炭の高い耐食性と人造黒鉛の高い熱伝導性を組み合わせた初期のカーボンブロックでは図2(a)の様に脆

化組織が見られた。酸性スラグに強いアルミナを添加して、溶銑に対する耐摩耗性を向上させ、金属Siを添加し気孔内にSi-O-N ウィスカーを形成させることによって気孔を微細化し、更に成形方法を押し出しからプレス成形に変更して緻密化を図ることにより、現在では図2(b)の様に脆化組織の発生しないカーボンブロックを開発、適用している（図3）。なお1987年には（財）発明協会より全国発明表彰科学技術庁長官賞を受賞した。このカーボンブロックによって新日本製鐵君津製鐵所第1高炉や新日本製鐵大分製鐵所第1高炉の稼働を15年間支え、長寿命化を達成した。また、稼働面の表層溶融鉄の粘度を自ら供給するTiによって増加させることで更なる高耐用化を狙った



図2 従来(a)及び改善後(b)のカーボンブロックの使用後試料

年	炉材原単位 [kg/t-s]	主な炉材技術開発
2010	7.4	耐火物リサイクル
2005	7.8	遠心吹付け工法
2000	7.9	湿式吹付け補修
1995	7.8	難付着性ノズル
1990	9.1	溶鋼鍋不定形化
1985	10.7	混銑車ASCれんが
1980	11.9	マイクログ波乾燥
1976	13.0	大容量火炎溶射

図1 新日本製鐵における主な炉材技術開発

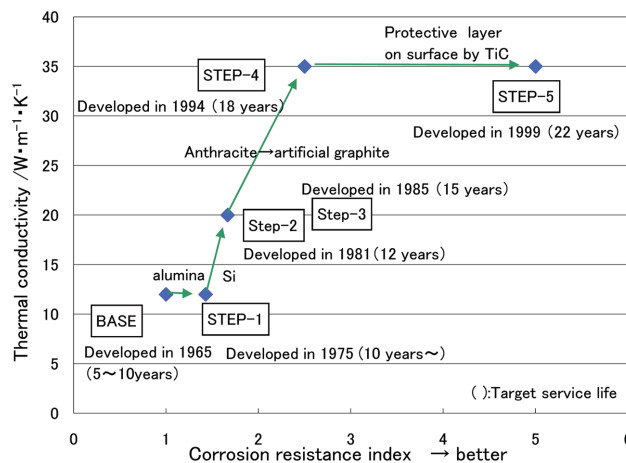


図3 カーボンブロック開発の歩み

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

TiC添加カーボンブロックも最新の高炉で採用を開始し、より長期間の高炉稼働に貢献している<sup>1)</sup>。

## 2.2 マイクロ波乾燥技術

製鉄設備用内張り耐火物は、従来は定型耐火物（れんが）が主流であったが、省エネルギー、機械化に伴う省力化が可能な不定形耐火物の使用比率が増大してきた。1960年代には30%程度であった不定形化率は近年では70～80%へ増大し、高炉樋、取鍋、脱ガス等の窯炉設備に不定形耐火物が使用されるようになった。不定形耐火物は、施工は簡便であるが、乾燥、脱水が必要である。この乾燥時に内部蒸気圧が材料強度を超え、材料が爆発、剥離する爆裂現象が課題となった。当社ではこの爆裂を起こさず、不定形耐火物の乾燥を効率的に行えるマイクロ波乾燥技術を開発し、取鍋、RH、プレキャストブロックの乾燥に適用してきた。

マイクロ波は図4<sup>2)</sup>に示すように、300MHz～300GHzの電磁波の総称である。当社では915MHz及び2.45GHzの両周波数帯域を利用して不定形耐火物の乾燥を行っている。

マイクロ波加熱の原理を図5<sup>2)</sup>に示す。不定形耐火物施工体にマイクロ波を照射すると、施工された不定形耐火物原料及び水の双分子が振動および回転し、内部摩擦が発生し、この摩擦熱により材料の温度が上昇する。水が全部蒸発したあとは、照射されたマイクロ波エネルギーを耐火物原料が吸収し、更に昇温していくことになる。

マイクロ波エネルギーが物質内部で熱に変換されるエネルギーP(W/m<sup>3</sup>)は以下の関係式で表わせる。

$$P \propto f E^2 \epsilon \gamma \tan \delta$$

ここでf：周波数 (Hz) E：電界強度 (V/m) の項は装置因子であり、 $\epsilon \gamma$ ：比誘電率と  $\tan \delta$ ：誘導体損失角の項は材料因子となる。またこの材料因子の項は周波数及び温度依存性を有する。マイクロ波加熱の特徴として内部加熱、選択加熱、昇温速度制御の3点が挙げられる。

1979年に広畑製鐵所 100 t 取鍋での実用適用を開始し、その後名古屋製鐵所、大分製鐵所、君津製鐵所の各取鍋にて実機化した。取鍋熱風マイクロ波乾燥装置の模式図を図6<sup>3)</sup>に示す。熱風管より熱風を送風し。マイクロ波は導波管を介して炉内に伝送する。マイクロ波の均一照射技術としてモードスターラーと反射板を組み合わせる方式を採用し、均熱化を図っている。

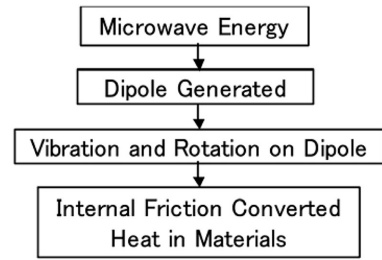


図5 マイクロ波加熱の原理<sup>2)</sup>

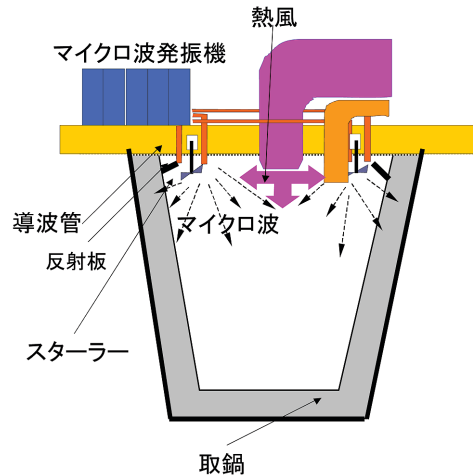


図6 マイクロ波乾燥装置の概念図<sup>3)</sup>

## 2.3 溶射補修技術

当社が耐火物の火炎溶射補修技術の開発に着手したのは1972年である。溶射バーナーの大容量化を推進し、50kg/hから始まり、20年後には6000kg/hの施工能力を有する大容量溶射バーナーを完成した。一方実炉にはコークス炉<sup>4)</sup>、RH等の脱ガス炉<sup>5)</sup>、取鍋<sup>6)</sup>、転炉<sup>7,8)</sup>にて各炉に応じた適正な施工能力を保持するものを実用に供し、施工、材料両技術を含めた総合技術として有効に使用している。

高温高速の火炎中で耐火粉末を加熱し、耐火物壁面に達するまでに溶融または半溶融状態にすることが、良好な溶射体を得るための必要条件である。当社は気体燃料としてプロパンガスを選定し、プロパンガス-酸素バーナーを開発し、その大容量化をはかりながら耐火性、緻密性並びに耐用性の極めて高い溶射体を得ることができる火炎溶射システムを開発した。

良好な輸送性と溶融性を保持する材料で優れた溶射体を形成するためには、補修する窯炉の操業条件を考慮した溶

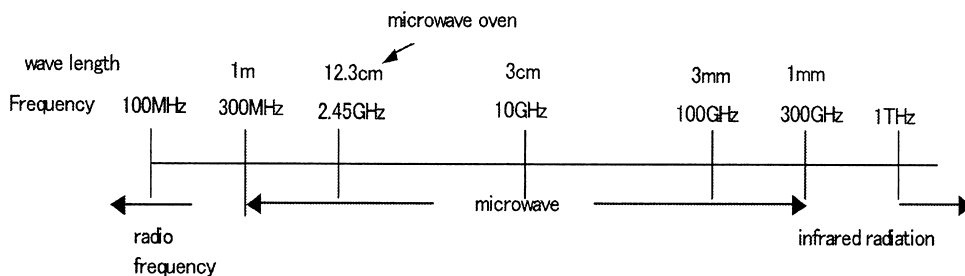


図4 マイクロ波の周波数と波長<sup>2)</sup>



図7 転炉用溶射装置

射材料の選択も無視できない。特に、高温雰囲気炉と精錬窯炉とはおのずとその材料組成を変える必要があり、熱間容積安定性、耐摩耗性、耐スラグ性など使用する環境に適合した材料の選択が溶射技術の有効性を左右する。

溶射技術では溶射バーナーの性能が最も重要で、特に施工能力、バーナーの大きさ、安全性を重視して開発を進めた。バーナーを構成する火炎孔は安全性の面から小孔径、多数配列が原則であり、大容量化に伴って火炎孔の数が多くなっている。材料噴出孔にも火炎孔と同じ考え方を適用し、火炎中に材料を均一分散・噴射させることができる効率の高い溶射バーナーを設計し使用している。

バーナー以外の装置上の進歩も無視できない。酸素、プロパンガス、材料、冷却水を安全で円滑に搬送するための多流体用スィベルジョイント構造、さらにガス流体の安全な制御装置、均一で安定した材料の切り出し機構など、実用上支障となる要素を可能な限り排除した機能を付加した。図7は、実用化された転炉用溶射装置である。なお大容量火炎溶射技術は1988年度に(財)大河内記念会より大河内記念生産賞を受賞した。

溶射技術の効果を最大限に発揮させるために、施工法の最適化も重要である。特に溶射距離、材料供給量、バーナー移動速度、母材の予熱温度および母材表面のクリーニング等が重要である。

直近では、火炎溶射技術は全社に実用展開したコークス炉炭化室診断補修装置に適用し<sup>9)</sup>、高精度精密溶射の施工を具現化し、コークス炉の延命に貢献している。

## 2.4 耐火物リサイクル技術

製鉄所では多くの種類の耐火物が、精錬処理そして搬送用の各窯炉に使用されている。耐火物の損傷が進行し、操業の安定性が確保できなくなると、稼働設備に使用されている耐火物は廃棄されるが、近年この使用済み耐火物の発生量の低減は大きな課題で、このため廃棄耐火物の有効活用が一層重要となっている。当社はここ数年、各製鉄所で耐火物リサイクルの取り組みを進めてきた(図8)<sup>10)</sup>。

鉄鋼プロセスでは多種多様な品質、成分の耐火物が使用され、その種類は数百種類にも及ぶ。しかしながら、使用



図8 使用済み耐火物のリサイクル設備(大分製鉄所)

済み耐火物にはスラグや地金等の不純物の混入が多く、そのまま耐火物として再利用する場合、耐火物の耐用性が低下する問題があった。そのため、使用済み耐火物の新規耐火物への添加率は約10%~20%にとどまっており、その多くは製鉄所構内の路盤材等として利用されてきた。

当社は、使用済み耐火物の耐火物としてのリサイクル率を高めるため、使用済み耐火物のグレードに着目し、使用条件の比較的過酷ではない用途への適用を拡大するとともに、使用済み耐火物の粉碎原料の粒度分布を考慮した多量添加技術を開発した。さらにプロセス面では、多種多様な使用済み耐火物の分別回収や選別作業を一元的に実施し、効率的なリサイクル原料再生設備とリサイクル耐火物製造設備を開発した。これにより、耐火物の耐用性低下の主要因であるスラグや地金の選別処理が可能となり、不純物を含みやすい中粒や微粉までリサイクル対象が拡大した。

これらの技術・プロセス開発により、新規耐火物への使用済み耐火物の添加率を最大約80%まで高めるリサイクルシステムを確立し、2009年度に(財)クリーン・ジャパン・センターより、資源循環技術・システム表彰“経済産業省産業技術環境局長賞”を受賞した。

## 3. おわりに

新たな鉄鋼製造プロセスを実現し、かつコスト低減と窯炉設備の稼働をより安定させるために、高度な炉材技術が求められる。また鉄鋼のみならず、高温プロセスには必ず炉材技術が必要となる。他方、グローバル化に伴う耐火物調達先と技術適用先は今後ますます拡大していく。担保、深化させてきたユーザーとしての炉材技術の真価を発揮する機会はますます増えて行くであろう。

## 参考文献

- 1) 新田法生:新日鉄技報.(384), 111 (2006)
- 2) 平 初雄, 中村壽志:新日鉄技報.(388), 69 (2008)
- 3) 平 初雄, 松井泰次郎:耐火物. 60 (3), 141 (2008)
- 4) 平櫛敬資, 福岡弘美, 松尾正孝:燃焼協会第14回コークス部会 1978, p.37

- 5) 福岡弘美, 松尾正孝, 浜井和男, 島田康平, 松島美継, 中村倫人: 鉄と鋼. 67 (4), S164 (1981)
- 6) 平櫛敬資, 松尾正孝, 前田一夫, 島田康平, 磯村福義, 松尾三郎: 耐火物. 37 (2), 72 (1985)
- 7) 萩原 武, 松尾正孝, 前田一夫, 村橋照善, 石松宏之, 松島美継,

- 土井章弘: 鉄と鋼. 68 (4), S175 (1982)
- 8) 前田一夫, 石井章生, 原田茂美: 耐火物. 47 (8), 341 (1995)
- 9) 境田道隆, 阿波靖彦, 杉浦雅人, 中嶋 淳, 中村 功, 笠井清人, 野口敏彦, 塚本義則: 新日鉄技報. (384), 63 (2006)
- 10) 花桐誠司, 松井泰次郎: 耐火物. 63 (3), 114 (2011)



後藤 潔 Kiyoshi GOTO  
設備・保全技術センター  
無機材料技術部長 Ph.D.  
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



筒井康志 Yasushi TSUTSUI  
設備・保全技術センター 無機材料技術部  
炉材エンジニアリンググループ  
マネジャー



花桐誠司 Seiji HANAGIRI  
設備・保全技術センター 無機材料技術部  
炉材技術企画グループリーダー



新田法生 Michio NITTA  
設備・保全技術センター 無機材料技術部  
マネジャー



河野幸次 Kohji KOHNO  
設備・保全技術センター 無機材料技術部  
マネジャー