

技術報告

不定形耐火物の施工技術

Construction Technology of Monolithic Refractories

佐藤 三男*
Mitsuo SATO

石川 瑛
Akira ISHIKAWA

抄 録

不定形耐火物の施工技術が不定形耐火物の耐用に対して与える影響は大きく、施工技術開発は不定形耐火物を使いこなす上でユーザーにおける大きな課題である。流し込み施工において重要となるのは、低水分、緻密で均一な施工体とすること、施工時間が短く作業性に優れることである。不定形流し込み施工の施工技術の開発及び実機への適用状況について概説した。

Abstract

Effect of monolithic refractory construction technology is significant. Development of construction technology is a major issue for users in using monolithic refractory. What is important in the casting is to have a low water content, high density and homogeneous structure, a short construction time, and good workability. The development of construction technology for monolithic refractories and the application status to steelmaking plant are outlined.

1. 緒 言

不定形耐火物は、施工される設備の形状、ライニング設計に応じて自由に成形できる点の特徴であることから、その施工方法は非常に多岐にわたっている。代表的な施工方法としては、流し込み工法、吹付工法、圧入工法、打ち込み工法、成形加工法がある。不定形耐火物の改良と施工技術の開発は深く関係しており、両者が入り組み合って発展を遂げてきた。特に施工の流し込み化は省力化の効果が大きいいため、多くの技術が開発、適用されてきた。加えて、定形耐火物がユーザー側では築炉、予熱を行って操業に適用されるのに対して、不定形耐火物、特に流し込み耐火物ではユーザー側で混練、流し込み、加振施工、養生、脱枠、乾燥、予熱を経て操業に適用される(図1)。したがって、施工技術が不定形耐火物のパフォーマンスに対して与える影響は大きく、施工技術開発は不定形耐火物を使いこなす上でユーザーにおける大きな課題である。そこで、本報では不定形耐火物のうち流し込み耐火物を対象として施工技術の開発について述べる。

2. 流し込み耐火物の変遷

流し込み施工される不定形耐火物(流し込み耐火物, キャ

スタブル耐火物)は1970年代初頭に登場、急速に普及し、それまでのラミング材を置き換え施工の省力化に貢献した。初期の流し込み耐火物はクレイボンドキャストブルと呼ばれるもので、粘土鉱物の解膠、凝膠を利用して固化するものであった¹⁾。当初は加熱炉、均熱炉の壁、天井等の雰囲気炉内張り材として使用され、その後、改良がなされ、製鋼取鍋、製鉄種の溶鉄や熔融スラグに接する部位に適用

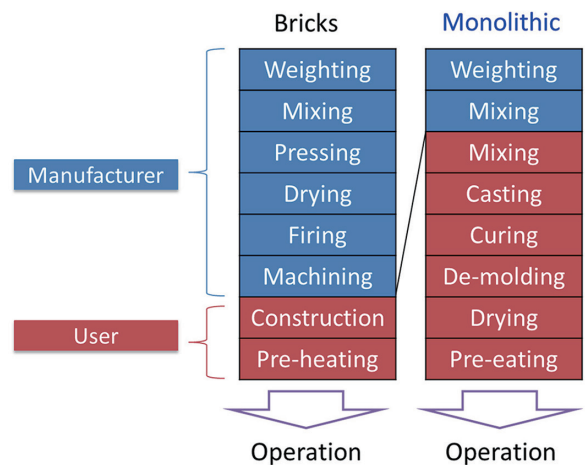


図1 定形耐火物と不定形耐火物の製造・施工工程
Manufacturing and installation process of brick and monolithic refractory

* 東日本製鉄所(君津地区) 製鋼部 炉材室 主幹 千葉県君津市君津1 〒299-1141

されるようになった。

その後、低セメントキャストブルが開発され、流し込み耐火物としての使用が急速に拡大した²⁾。それまで一般的であったアルミナセメントキャストブルは混練水量が多いことによる充填密度の低さ、及びアルミナセメント中のCaOに起因した耐火性の低下が問題であったが、低セメントキャストブルでは超微粉と分散剤を組み合わせることで、低水分で緻密、高強度の施工体を得ることが可能となった。一方で低水分化により緻密化されたことによって、従来のキャストブル以上に爆裂に対する配慮が必要となることや、アルミナセメントの極微量の溶解成分が作業性や硬化性に影響を及ぼすため、可使時間や硬化時間の管理の厳格化などの施工面で新たな課題が発生した³⁾。これらを背景として低セメントキャストブルを使いこなし、さらなる低水分・緻密化のための多くの施工技術の開発が行われてきた。

3. 流し込み耐火物の施工

流し込み耐火物の施工は主に混練、流し込み、養生、脱枠、乾燥の工程から成る。施工において重要となるのは、低水分、緻密で高強度で均一な施工体とすること、施工時間が短く作業性に優れることである。各施工工程における解決すべき課題と技術開発について以下に記載する。

3.1 混練

3.1.1 概要

流し込み耐火物は異なった種類及び粒度の原料を種々の割合で組み合わせた複合材料であり、特殊なものを除いて水と混練して流動性を持たせ流し込み施工を行う。添加水は水和反応などによって使われる結合水と、それ以外の非結合水に分けられる。非結合水は粒子間隙に強く拘束され流動性に寄与しない拘束水と、自由に動きまわり混練物の流動性に寄与する自由水に分けることができる⁴⁾。混練工程の目的は、結合のために水と粉末原料が均一となるように混合すること、流動性を確保することである。

流動性の確保には十分な量の水の添加が必要であるが、一方で、水分が過剰になると自由水の脱水による気孔の増加により耐火物の強度の低下、耐食性の低下につながる。また混練時間も混練物の流動性に影響し、一般に短い混練時間では材料が十分に解膠せず流動性が不足し、過剰な混練は混練物の温度上昇による流動性の低下を招くことがある。以上から混練工程では水分量、混練時間の管理を、混練物の流動性(フリーフロー、タップフロー等)を指標として行うのが一般的である。

一般に耐火物やミキサーの種類により均質で十分な流動性を持つ混練物を得られる水分量、混練時間は異なる。低水分で均一な施工体を得ることが耐火物の耐用性向上につながると考えられるため、耐火物に合わせた混練機の機種選定や混練条件の最適化が流し込み耐火物を使いこなす上

での課題である。以下に不定形耐火物の混練に使用されている代表的なミキサーを記載する。

3.1.2 各種混練機⁵⁾

(1) 中速縦軸混練機

混練作用はブレードの回転に伴うせん断が主である。液体の粘性や粒度などはそれぞれの機種で適用範囲が異なるが、適用できる粘性の制約はほとんど無い。ブレードの回転は20～600rpm程度が一般的である。代表的なものにスパイラルミキサー(万能ミキサー)、ナウタミキサー、ボルテックスミキサー(図2⁵⁾)やウェイトミキサー(平型ミキサー)がある。

(2) 中速横軸混練機

混練作用はブレードの回転に伴うせん断が主である。粉体の粒度は比較的粗いものに適用できるが、比較的粘性の低い0.3～0.4Pa・sまでの耐火物を混練する装置である。代表的なものにリボンミキサー、パドルミキサー、スパイラルフローミキサー(図3⁵⁾)がある。

(3) その他の混練機

製鉄所での耐火物の混練では一般的には使用されていないが、上記以外に1000rpm以上の高速回転による強力なせん断により、細かい粉体であっても十分な分散性を発揮できる高速アジテート式混練機と呼ばれる装置があり、代表的なものにヘンシェルミキサーがある。

その他にブレードやホイールの様な攪拌機構が無く、振動盤上で混合物をランダム方向に飛散させながら拡散混合を行う装置としてオムニミキサーがある。

3.1.3 ミキサーの種類がキャストブルの混練物と施工体に与える影響

溶鋼鍋のキャストブルの混練に用いるミキサーは混練物及び成形体の特性に影響を及ぼすものと考えられるが、詳しい研究例は少ない。そこで日本製鉄(株)では6種類のミキサーを用いて同一のキャストブルを混練し、混練物と成

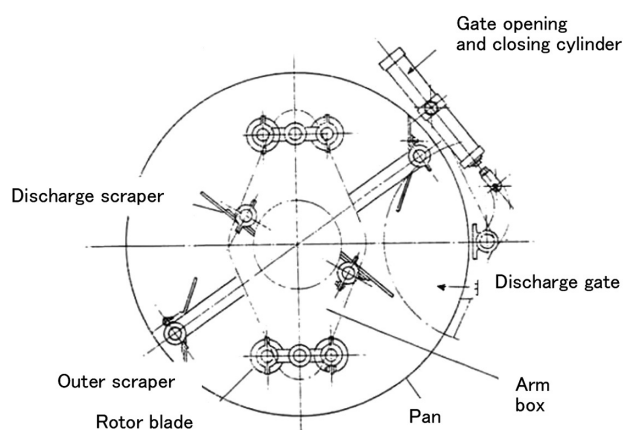


図2 ボルテックスミキサーの構造⁵⁾
Structure of Vortex mixer⁵⁾

形体の特性を調査した。ミキサーは万能、ナウタ、ヘンシェル、リボン、オムニ、モルタル(平型)を用いた⁶⁾。調査の結果、ヘンシェルミキサーによる混練物は最も高流動性で、エア量は最も低く、施工体は低気孔率、高弾性率、高強度で高耐食性であった(表1)。

一方、ナウタミキサーの場合はその対極にあった。また、施工体の気孔径分布を測定したところ、ヘンシェルミキサーの場合は有機繊維径に相当する径の気孔が検出されなかった。ヘンシェルミキサーでキャストブルを混練することで高流動性の混練物と緻密で高強度の施工体が得られたが、これは同ミキサーの高速回転による強力な混練により、

有機繊維が破壊されたことが一因であると考えられる。混練強度が高い混練方法を用いると、低気孔率、高強度、高耐食性の施工体となり、耐火物の高耐用化が期待できる。

3.2 流し込み、加振

3.2.1 概要

混練後は所定の形状を得るために型枠への流し込みを行う。流し込み時に混練物に巻き込まれた気泡の浮上除去や混練物が型枠内の細部まで充分に行き渡るようにする必要があるので、バイブレーターや中子振動などによる加振を行うが、加振を与えすぎると骨材と微粉の分離が発生して不均一な施工体となるため、適切な方法、時間で加振を行う必要がある。使用する耐火物の粒度構成や、型枠の形状などに合わせた機種選定や加振条件の調整が必要である。以下に加振装置の具体的な例を示す。

3.2.2 加振の種類

(1) 内部振動方式(棒状バイブレーター)

混練物の中に振動機を挿入し、混練物に直接振動を与える方法である。振動時間は耐火物の種類や振動機の性能に応じて決定するが、耐火物表面の沈下が認められなくなり、ほぼ水平となる状態を目安として材料分離が生じない範囲で決定する。

(2) 外部振動方式(型枠振動機)

型枠(中子等)に振動機を取り付ける、あるいは型枠の外側から外部振動機を接触させる方法である。一般的には型枠にエネルギーが吸収されるため、加振の影響範囲は型枠の表面に限られ、混練物内部への加振効果が少ない。そのため、棒状バイブレーターの補助として用いられることが多い。

3.2.3 キャスタブルの加振条件とその特性の関係

キャストブル耐火物の流し込み施工においては、加振方法によってキャストブルの流動性が大きく変化する。そこで加振方法、特に振動の各要素(加速度、周波数、振幅)とキャストブルの粘度との関係の調査を行った⁷⁾。振動の3要素(加速度、周波数、振幅)の間には以下の関係がある。

$$a = d \frac{(2\pi f)^2}{1000}$$

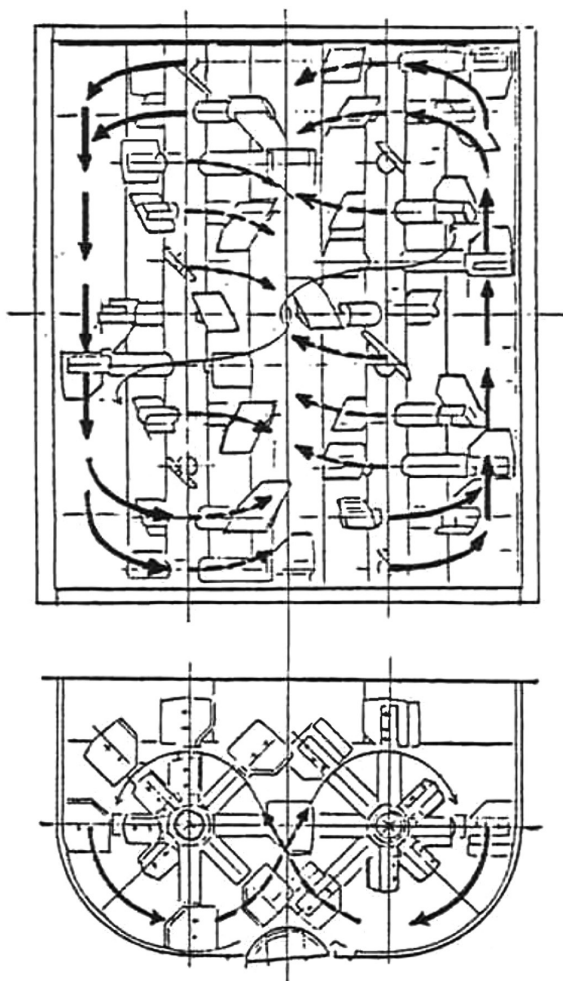


図3 スパイラルフローミキサーの構造⁵⁾
Structure of spiral flow mixer⁵⁾

表1 ミキサー毎の混練物の特性
Properties of mixture and set body of the castable

Mixer	Cake	Nauta	Henschel	Ribbon	Omni	Pan	
Tapping flow	141	108	209	126	140	111	
Apparent porosity (%)	Dried at 110°C for 24h	19.1	19.5	17.2	19.2	18.9	20.0
	Fired at 1000°C for 6h	21.7	22.6	21.0	22.0	21.8	23.2
	Fired at 1400°C for 6h	24.4	25.6	22.1	24.8	24.4	25.4

表2 キャスタブルの加振条件
Castable vibration conditions

Number	Material	Frequency /Hz	Acceleration /g	Amplitude (single) /mm
1	Alumina-spinel	20	0.16	0.10
2	Alumina-spinel	20	0.33	0.20
3	Alumina-spinel	20	1.50	0.93
4	Alumina-spinel	60	1.50	0.10
5	Alumina-spinel	60	3.00	0.20
6	Alumina-magnesia	20	0.16	0.10
7	Alumina-magnesia	20	0.33	0.20
8	Alumina-magnesia	20	1.50	0.93
9	Alumina-magnesia	60	1.50	0.10
10	Alumina-magnesia	60	3.00	0.20

間、外部の衝撃などから保護するために、静置した状態で養生を行う。硬化時間は材料の種類や気温により異なるため、型枠を取り外す場合は硬化状況を確認してから行う必要がある。養生後の耐火物は水分を含んでいるため、ガスバーナー等を用いて乾燥を行う。窯炉設備の生産性向上(非稼働時間短縮)のため乾燥時間の短縮化が求められているが、乾燥工程では爆裂について留意する必要がある。

乾燥工程では施工体内部に残留している水分が加熱により気化し、発生する水蒸気は耐火物内の気孔を通じて耐火物外に排出される。水蒸気の発生速度が排出される速度を上回った場合に、耐火物内部の水蒸気圧が上昇する。この水蒸気圧が耐火物の強度を超えた時に爆裂と呼ばれる耐火物の破壊現象が発生すると考えられている。爆裂は耐火物の破片が周囲に飛散する危険なトラブルであると同時に、耐火物の再施工を必要とし、設備生産性を損なうトラブルである。爆裂の危険を伴う昇温時の温度領域(300℃以下)では慎重に乾燥を行う必要があるため、緩やかな温度上昇となるように調整が行われている⁸⁾。また300℃以上の温度域での乾燥に関しても施工体内部の残留水分を取り除くために長時間保持が行われる。使用する耐火物の材料強度、通気率、施工厚み等に応じて乾燥パターンの設定が行われるが、低水分施工した緻密な施工体においても爆裂トラブルを発生させずに乾燥時間を短縮化する技術が求められる。

3.3.2 乾燥方式の種類

(1) ガスバーナー

現在の主流はコークス炉ガス(COG)等を燃料として空気や酸素と混合して燃焼を行う方式である。“通気性固体”である金網やセラミックファイバーをガス通路に配し、ガス顕熱を個体輻射に変換し、伝熱促進や燃料使用量の削減を行うプロセスも開発されている⁹⁾。火炎の形状や空燃比によって均熱性や燃焼効率が変化するため、形状に合わせた最適なバーナーの選択が必要となる。

(2) マイクロ波

マイクロ波による耐火物内の水分子の発熱により乾燥を行う方式であり、熱伝導に拠らない内部加熱が特徴である。ガスバーナーによる乾燥に比べ、不定形耐火物の表面と背面の温度勾配が付きにくく、短時間で乾燥ができる。マイクロ波では雰囲気は加熱されず、不定形耐火物の表面からの抜熱が起こるため、その対策が必要である。

3.3.3 不定形耐火物のマイクロ波乾燥技術

日本製鉄では耐火物表面からの抜熱の対策として、図5に示す熱風管より熱風を送風し、熱風とマイクロ波を複合化した方式を確立した¹⁰⁾。熱風マイクロ波乾燥法は、取鍋、脱ガス槽等の不定形耐火物の乾燥に適用されている。取鍋の熱風マイクロ波乾燥は、1979年より100t規模の取鍋で

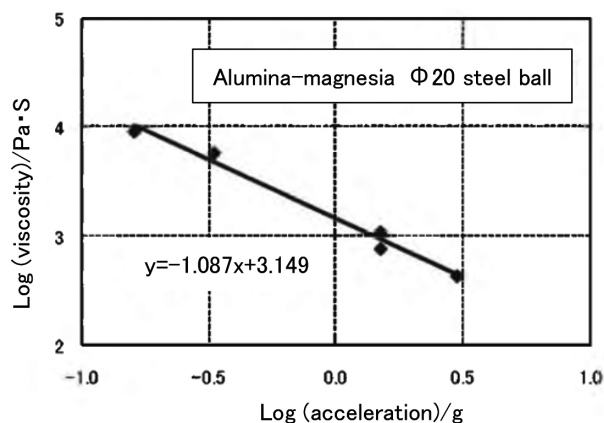


図4 キャスタブルの粘度と加速度の関係
Relationship between castable viscosity and acceleration

ここに d は振幅 (mm), a は加速度, f は周波数 (Hz) である。

表2に示す条件で測定した混練物の粘度と、加速度、周波数、振幅との関係を調べると、加速度と良い相関が見られた。アルミナ-マグネシア質キャストブルについて加速度と粘度の関係を両対数で示したのが図4であり、良い直線関係が見られた。キャストブルの粘度に大きく影響を与える振動に関する要素は加速度であり、流し込み時の加振の加速度を上げることで、キャストブルの流動性を確保することが可能となるため、加速度の高い条件で施工することで、さらなる低水分化と高耐用化が可能である。

3.3 養生, 乾燥

3.3.1 概要

キャストブルの施工後は十分に硬化が進行するまでの

始めて実用化され、現在では 300t 規模の取鍋の乾燥も可能となっている¹¹⁾。ガスバーナー乾燥法と同様にマイクロ波をいかに均一に照射するかが重要であり、このために導波管への反射板の取り付け及びスターラーの構造が重要な技術となる。

図 6、7 に示すようにガスバーナー乾燥法に比較して熱風マイクロ波乾燥法は不定形耐火物表面と背面との温度勾配が付きにくく、均一乾燥が可能である。100t 取鍋の乾燥時間と乾燥エネルギーの比較例を表 3 に示す。ガスバーナー乾燥では平均 100Nm³/h のコークス炉ガスを使用して

24 時間で乾燥していたのに対して、マイクロ波乾燥法は 8 時間で乾燥が可能となり、大幅な乾燥時間の短縮が達成された。このマイクロ波による均一乾燥の技術により緻密な施工体を爆裂等のトラブルなく、安定的に乾燥することが可能となる。

4. ミキサーの高出力化、流し込み方法の最適化⁹⁾

一般に流し込み耐火物の高耐用化には低水分施工による緻密化が有効である。3.1.3 に述べたように、高速混練することで高フローの混練物で緻密かつ高強度の施工体が得られることが示唆された。この結果は高速混練により低水分施工が可能となり、かつ得られる施工体の耐食性も向上できる可能性を示している。この知見に基づき、東日本製鉄所君津地区第一製鋼工場の溶鋼鍋において低水分施工に向けた施工の改善を実施した¹²⁾。

まず低水分、高粘性材質を混練することを想定し、ミキサーの攪拌能力を 30kW から 55kW にアップした。さらに従来の回転速度一定方式からインバーター制御によって混練速度が可変できるようにミキサーを改造し、高速混練化を図った。また、低水分での流し込み性を改善するためにホッパーの改造と棒状バイブレーターを導入し、耐火物の乾燥には緻密な施工体を爆裂等のトラブルなく、安定的に製造するためにマイクロ波乾燥を適用した。低水分施工を狙った流し込み試験を表 4 に示す条件で行った。従来に比較して 20% 高速化した混練と、流し込み装置の改善により、

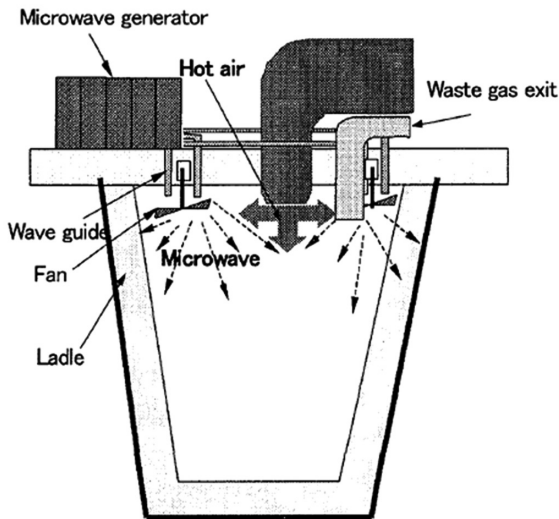


図 5 マイクロ波乾燥装置の概要¹⁰⁾
Outline of microwave drying equipment¹⁰⁾

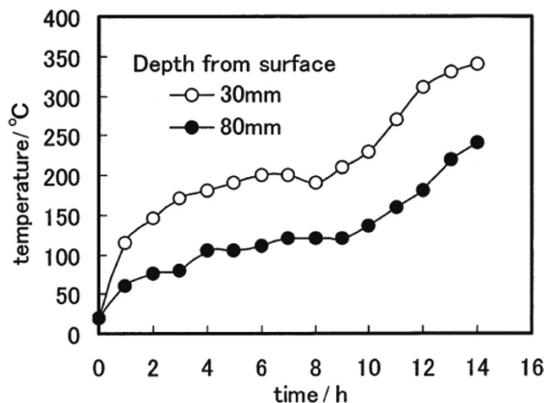


図 6 ガスバーナー使用時の耐火物の温度変化
Temperature change of refractory when using gas burner

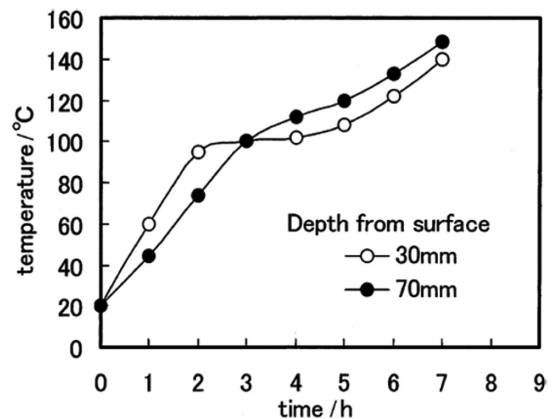


図 7 マイクロ波乾燥使用時の耐火物の温度変化
Temperature change of refractory when using microwave drying

表 3 100t 取鍋の乾燥時間と乾燥エネルギーの比較例
Comparative example of drying time and drying energy of 100 t steel ladle

	Combination drying of microwave and hot air Microwave 5.3 kW/t-ref. } × 8 h 250°C hot air	Gas burner (conventional) COG 100 Nm ³ /h × 24 h
Time for drying (h)	8	24
Electric power consumption (kWh/ladle)	520	120
COG consumption (Nm ³ /ladle)	200	2400
Total energy consumption (kcal/ladle)	2.2 × 10 ⁶	11.3 × 10 ⁶

表4 低水分施工を狙った流し込み試験条件
Casting test conditions aimed at low additional water construction

	Casting machine	Stick shape vibrator	Mixing speed (rpm)	Additional water (mass%)
Conventional	Conventional	×	26	4.73
Case A	Improved	○	26	4.50
Case B	Improved	○	26	4.38
Case C	Improved	○	31	4.25

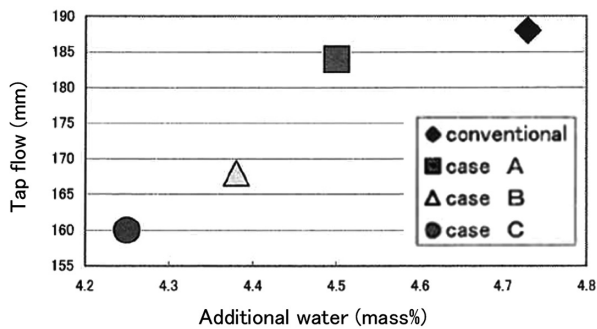


図8 添加水分量とタップフローの関係
Relationship between additional water and tap flow

図8に示す低水分、低タップフローでの流し込みが可能な結果が得られた。溶鋼鍋の側壁キャストブルの低水分施工を達成することで約2割の溶鋼鍋の寿命向上とコスト削減を達成した。

5. 結 言

不定形耐火物施工に関して、特に流し込み耐火物の施工

技術に関する研究と、実機設備を概説した。不定形耐火物の施工技術は、ユーザー側で耐火物を使いこなす上で重要であり、多くの技術導入、研究が行われ、材料開発と相まって大きく進展してきた。日本製鉄では混練や振動施工に関する基礎研究を行い、その応用として実機においてミキサーの高出力化、高速化により流し込み耐火物を低水分化し、鑄込み設備の改善により低流動性混練物であっても取鍋施工を可能化し、実機において取鍋内張り耐火物の寿命延長を達成した。またこのような水分量を低減した不定形耐火物を実用するには熱風マイクロ波乾燥技術も不可欠である。

参照文献

- 1) 藤本章一郎 ほか：耐火物. 28 (219), 153 (1976)
- 2) 吉富丈記：セラミックス. 35 (8), 622 (2000)
- 3) 江口忠孝 ほか：耐火物. 40 (363), 200 (1988)
- 4) 石川誠：セラミックス. 42 (8), 554 (2007)
- 5) 橋本建次：混練装置. 第2刷. 藤庄印刷(株), 1987, p.225
- 6) 後藤潔 ほか：耐火物. 60 (3), 146 (2008)
- 7) 後藤潔：耐火物技術協会 第23回年次学術講演会, 福岡, 2010-4
- 8) 島田康平 ほか：製鉄研究. (331), 27 (1988)
- 9) 加藤剛志 ほか：耐火物. 38 (336), 23 (1986)
- 10) 平初雄 ほか：耐火物. 55 (540), 19 (2003)
- 11) 落合常己 ほか：耐火物. 33 (282), 365 (1981)
- 12) 竹内友英 ほか：第84回耐火物部会 第90回鑄造用耐火物専門委員会, 福岡, 2008-11



佐藤三男 Mitsuo SATO
東日本製鉄所(君津地区)
製鋼部 炉材室 主幹
千葉県君津市君津1 〒299-1141



石川 瑛 Akira ISHIKAWA
東日本製鉄所(君津地区)
製鋼部 炉材室 主査