

連続铸造用耐火物

Refractories for Continuous Casting

加藤 雄一*
Yuichi KATO

抄 録

連続铸造工程は精錬工程を経て成分、温度を調整した溶鋼をモールドに注ぎ込み、連続的に铸込む工程である。連続铸造用耐火物は製鋼工程の最終段階で使用される耐火物であることから、その安定性は鋼の品質に密接に影響を与える。連続铸造用耐火物としてタンディッシュや浸漬ノズル、SNプレートを中心に耐火物技術の進展について開発の実例をもとに述べた。

Abstract

The continuous casting process is a process in which molten steel whose components and temperature have been adjusted through a refining process is poured into a mold and then cast. Since the refractory for continuous casting is used in the final stage of the steelmaking process, its stability greatly affects the quality of steel. This chapter describes the progress of refractory technology for continuous casting in Nippon Steel Corporation, focusing on tundishes, immersion nozzles, and SN plates with examples of technical development.

1. 緒 言

連続铸造工程は精錬工程を経て成分、温度を調整した溶鋼をモールドに注ぎ込み、連続的に铸込む工程である。鉄鋼業における2017年の連続铸造比率は世界平均で96.2%、国内平均で98.5%に上る。連続铸造の他には塊状のモールドに溶鋼を铸込むインゴット铸造がある。

図1に連続铸造用耐火物の模式図を示す。連続铸造用の耐火物としては大きくタンディッシュ用耐火物、流量制御用耐火物および注入用耐火物に分けられる。本稿では連続铸造用耐火物各部位の役割、使用耐火物の材質および使用方法の概要を述べるとともに、日本製鉄(株)における技術開発の現況について報告する。

2. タンディッシュ

2.1 タンディッシュの役割

タンディッシュ (Tundish: TD) は連続铸造設備において取鍋と連続铸造モールド間に設置された中間容器である。タンディッシュの役割としては大きく4点ある。

1) 溶鋼の分配機能

タンディッシュに複数個の浸漬ノズルを取り付けること

で1つの取鍋からタンディッシュを介して複数の連続铸造が可能となる。

2) 流量調節機能

連続铸造においてモールドで溶鋼を安定に凝固させるためには、モールドへ注ぎ入れる溶鋼の流量の調整が必要である。モールドへの溶鋼流量の調整にはスライディングノ

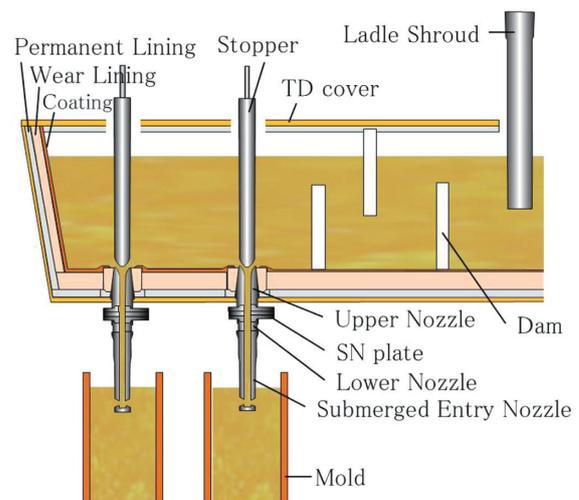


図1 連続铸造用耐火物の模式図
Schematic image of the refractories for continuous casting

* 九州製鉄所(大分地区) 製鋼部 炉材室 主査 大分県大分市大字西ノ洲1 〒870-0992

ズル (Sliding Nozzle: SN) プレートやストッパーなど流量制御用耐火物が用いられる。

3) 鋳片品質の向上の役割

製鋼工程で生じる酸化物や硫化物などが非金属介在物 (以下介在物と略す) として溶鋼中に存在し粗大なまま鋳片中に混入すると、その後の圧延工程にて傷の起点となる等、鋼の品質に影響を及ぼすことになる。鋳片への介在物の混入を抑制するため、タンディッシュ内で溶鋼を保持することで介在物の浮上の促進を図る。この時タンディッシュに堰を設置することで、取鍋から浸漬ノズルまでの流路が長くなり、介在物の浮上量を増やすことができる。また堰の配置を工夫することで流動状態を制御し、より効果的に介在物の浮上の促進を図ることができる。

4) 溶鋼の温度補償

黒鉛トーチによるプラズマ加熱や誘導加熱 (Induction Heating: IH) を用いて溶鋼温度を上昇させることでタンディッシュ内や浸漬ノズル内での溶鋼の凝固を防止する。

2.2 タンディッシュの構造と耐火物ライニング

タンディッシュを上部から見た時の形状は I 型や T 型が一般的であり、ほかにコ型や H 型のものもある。タンディッシュの容量は最大で 80t 程度である。

タンディッシュの内張りには一般に鉄皮側からパーマネント耐火物、ウエア耐火物、コーティング材の 3 層で構成されている。タンディッシュ内での溶鋼の温度低下を抑制するために鉄皮とパーマネント耐火物との間に断熱材を配することもある。

コーティング材にはウエア耐火物との剥離性に優れるマグネシア (MgO) 質の材料が用いられている。コーティング材は鋳造後にタンディッシュ内に残った地金やスラグの除去作業の簡素化、ウエア耐火物の保護の役割を持つ。また、1 キャスト使用するたびにコーティング材は解体され、再度施工しなおされるため、溶鋼に触れる部位の清浄性を保つことができ、溶鋼の汚染の防止の役割も果たす。コーティング材はこて塗りまたは吹き付けにより施工される。

ウエア耐火物にはアルミナ-シリカ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 質が一般に使用される。タンディッシュ内での溶鋼温度は 1500 ~ 1570℃ 程度と取鍋と比較して 100℃ 程度低いいため、アルミナの含有量は取鍋よりも低い。

タンディッシュ内での溶鋼の保温や空気との接触による酸化抑制を目的としてタンディッシュカバーを使用する。タンディッシュカバーには $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 質の流し込み材が用いられている。

2.3 タンディッシュ用耐火物の使用方法と損傷形態

タンディッシュの使用サイクルはパーマネント耐火物およびウエア耐火物施工、乾燥、コーティング材塗布、予熱、鋳造、冷却、地金取り (コーティング材解体)、補修が一般

的である。コーティング材の解体後ウエア耐火物の補修並びにコーティング材の再施工を行うとともに、注入用耐火物と流量制御用耐火物の交換を行う。

上記のように鋳造終了後、一度タンディッシュを冷却し耐火物の交換を行うのが一般的であるが、熱間の状態でタンディッシュ内に残った鋼、スラグを除去し、注入用耐火物と流量制御用耐火物の交換を迅速に行う熱間回転を行うこともある²⁾。熱間回転を行うことで、最大 500 チャージ程度連続で鋳造することができ、鋳造間の整備の負荷軽減や耐火物コスト削減のメリットがある。

タンディッシュウエア耐火物の損傷は大きく 3 つの要因に分けられる。

1 つ目はタンディッシュの加熱冷却に伴う亀裂の発生である。ウエア耐火物に不定形耐火物を施工した場合、長手方向は最大 10m 程度にも及ぶ範囲が一体で施工され、熱膨張や熱収縮によって生じる変位が大きく、亀裂を生じやすい。稼働初期には長手方向に対して垂直な方向の亀裂生成が支配的である。さらに使用回数が進み、加熱冷却が繰り返されると地面に対して垂直な亀裂に加えて水平方向の亀裂の発生も進行し、いずれ表面の剥離に至る。

2 つ目はウエア耐火物とコーティング材との焼き付き現象である。例えば京田らはウエアとコーティング材を接触させた状態では焼き付きは起こらず、コーティング材にスラグが浸透する条件で強固に焼き付くと報告³⁾している。また、大神らは $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 質キャストブルと SiO_2 含有 MgO 質コーティング材との焼き付き性について検討⁴⁾しており、コーティング材中の SiO_2 含有量が増加することでコーティング材とウエア耐火物間の界面にて低融点相が生成しやすくなるため焼き付きが進行すると述べている。いずれの場合も、スラグや SiO_2 等ウエア耐火物とコーティング材の界面において液相率を上昇させる成分が多い場合に焼き付きを引き起こす。焼き付きが生じた場合、コーティング材解体時にウエア耐火物とともに損傷することになり、損傷が進行する。

3 つ目はタンディッシュスラグによる溶損である。タンディッシュスラグは取鍋スラグや詰め砂がタンディッシュ内に流入したものや、タンディッシュ上より投入する溶鋼の保温材を主体としている。ウエア耐火物の表面にはマグネシア質のコーティング材が塗布されており、これはタンディッシュスラグに対して高耐食性を有するため、直接ウエア耐火物の溶損が問題になることは少ない。しかし、熱間回転操業時など鋳造回数が多くなる場合にはスラグによる溶損が課題となる。

2.4 タンディッシュ用耐火物における技術開発

佐藤らはタンディッシュ用ウエア耐火物の亀裂発生後の破壊抵抗値に及ぼすメタルファイバーの添加量と分散状況の評価し、最適添加量を求めた⁵⁾ (図 2)。メタルファイバー

の添加量が0～4mass%の範囲で破壊抵抗値は添加量に比例して増加し、これ以上の添加量では大きく変化しないことを見出した。メタルファイバーの分散状況は2～6 mass%の範囲で大きく変わらない結果であった。これらの結果から、メタルファイバーを従来の2mass%から3mass%に増加させ、九州製鉄所(大分地区)のタンディッシュに適用した。寿命は15%向上し、補修材の使用量は10%低減することができた。

タンディッシュウェア耐火物の損傷の主要因はコーティング材解体時の機械的衝撃と加熱冷却に伴う亀裂伸展による剥離である。松井らはウェア耐火物への衝撃を抑えながらコーティング材を解体するため、コーティング材とウェア耐火物との焼き付き防止を行った⁹⁾。焼き付きはコーティング材とウェア耐火物との反応によるものであると考え、コーティング材中の液相の生成を抑制するため不純物の低減を図った(表1)。これによりウェア耐火物の損耗速度を7%改善することができた。

さらに松井らは、ウェア耐火物の加熱冷却に伴う亀裂伸展の抑制のため、タンディッシュウェア耐火物の膨張特性の最適化を図った。1500℃における残存線変化率を1.45%から0.41%まで低減させ、稼働面近傍の膨張を低減させた。

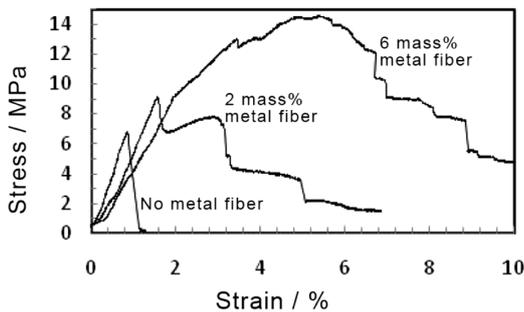


図2 メタルファイバー添加量の違いによる応力-ひずみ曲線
Stress-strain curve by difference among the amounts of metal fiber addition

さらに、1000℃での残存線変化率を-0.21%から-0.06%まで増加させることで、稼働面からウェア耐火物内部までの膨張差を低減させ亀裂の抑制を図った。この結果、ウェア耐火物の損傷速度を28%低減させた。

高嶋らはコーティング材の焼き付き低減を目的にドライコーティングの適用に取り組んだ⁷⁾。従来タンディッシュにおいては吹き付けによるコーティング材の施工を行っており、バインダー中に含まれる微量成分による母材との焼き付きを改善するため、ドライコーティング技術を適用した(図3)。しかし、従来13.5時間で完了していた吹き付け施工の整備サイクルに対して、ドライコーティングでは17時間まで延び実用が難しかったことから、施工方法の改善を図った。例えば、従来固定式の材料タンクからスクリーコンベアによりタンディッシュまでコーティング材を供給していたのに対して、自走式のタンクとすることでコーティング材の供給速度を40kg/分から100kg/分まで向上させることができ施工時間を110分間短縮した。

また、ドライコーティング材の硬化が約100℃を超えたところで完了することを、オフライン評価を通じて見出した。これにより、加熱側から反加熱側までが硬化温度に達する最適な予熱条件を設定することで、施工時間を15分短縮した(図4)。これらをはじめとする改善により17時間かかっていた整備サイクルを10.5時間まで短縮した。これによりドライコーティング化による焼き付き低減と施工性

表1 コーティング材の化学組成
Chemical compositions of coating

		Conventional	Improved
Chemical composition (mass%)	Al ₂ O ₃	2	1
	SiO ₂	12	5
	MgO	74	86
	CaO	5	2
	Fe ₂ O ₃	4	1

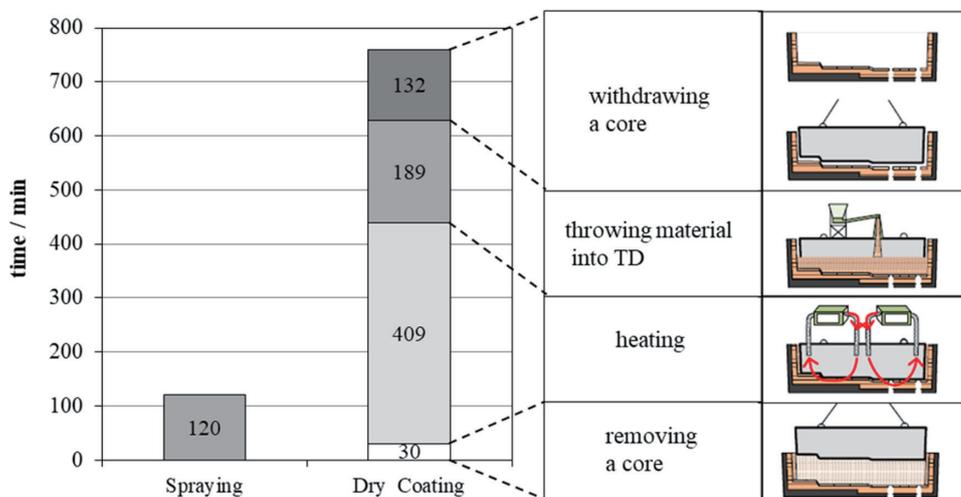


図3 ドライコーティング技術の適用による施工時間の変化
Change in maintenance time by applying dry coating technique

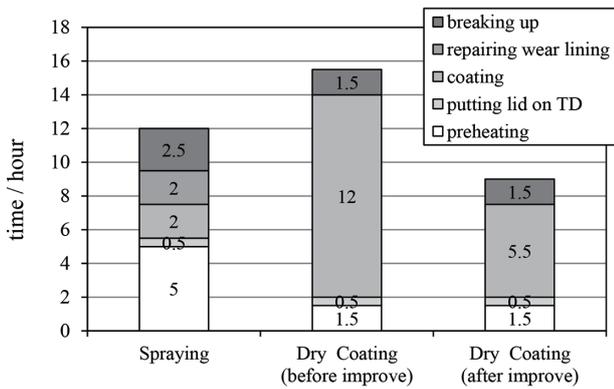


図4 施工時間の改善
Improvement of maintenance time

の改善の両立を図ることができた。さらに、ドライコーティングでは吹き付けコーティングと異なり施工時に水を使わないため、従来タンディッシュにおいて最大1.5ppmあった水素ピックアップはドライコーティング材適用により最大でも0.3ppmにとどまり、低水素化の効果を得られることを確認した。

3. 流量制御用耐火物

3.1 ストッパー

ストッパーはとがった先端を持つ棒状耐火物であり、タンディッシュ内に装入された上ノズルとの間隔を上下方向に調節することで、溶鋼流量の制御を行う役割を持つ。ストッパーは大きくスリーブタイプとロングストッパータイプの2種類に分けることができる。

スリーブタイプはストッパーヘッドと呼ばれる先端部分と筒状のスリーブを重ねた棒状部分とで構成される。ストッパーヘッドには羽口耐火物と密閉性良く接する必要があることから、熱間強度や耐食性、溶鋼流動への耐摩耗性が求められるだけでなく、急激な温度変化でも欠損しないよう耐熱衝撃性も求められる。このため、ストッパーヘッドにはAl₂O₃-黒鉛質の耐火物が使用される。スリーブも同様に耐熱衝撃性が求められるが、タンディッシュスラグにより耐火物が溶損することで芯金の溶融欠損に至るトラブルを防止するため特にスラグライン部の耐食性が要求される。このため、スリーブには高Al₂O₃質の耐火物が使用されることが多い。

ロングストッパータイプはストッパーヘッドからスリーブ部分までが一体構造となったストッパーである。耐熱衝撃性に優れるAl₂O₃-黒鉛質耐火物を冷間静水圧プレス(Cold Isostatic Press: CIP)成形により一体成形することで製造されることが一般的である。ストッパーの他、後述するロングノズルや注入管、浸漬ノズルもCIP成形後に非酸化雰囲気中で焼成することにより製造される。CIPでは材料充填時に配合を部位ごとに充填し分けることができるため、複数の材質を1本のノズル内に配置した一体成形が可能で

ある。

3.2 SNプレート

SNプレートは2枚もしくは3枚の円形の孔の空いた平滑な耐火物が重なり合う部材であり、1枚のプレートを摺動させ孔の重なり度合いを調節することで溶鋼の流量制御を行う。SNプレートはスライドゲート(Slide Gate: SG)と呼ばれることもある。

SNプレートは取鍋やタンディッシュの下に取り付けられ使用される。タンディッシュ用SNプレートは一般に取鍋用SNプレートより小型の形状である。SNプレートを2枚で構成する場合、構造が単純である反面、下部プレートに接続するノズル類もSNプレートと同時に摺動することになる。一方、SNプレートを3枚で構成する場合、中間プレートのみが摺動するため、下部プレートに接続するノズル類は同時に動くことがない。溶鋼流動が铸片品質に直結するモールド内においては浸漬ノズルがSNプレートの摺動に伴い動くことが好ましくないため、タンディッシュ用SNプレートは3枚で構成されることが多い。

タンディッシュ用SNプレートは使用に伴い円形の孔が溶損し穴径が拡大して損傷する。そのため、微量のAl, Siなどの金属を添加した耐食性や耐面荒れ性に優れた高Al₂O₃-C質が主流である。耐熱衝撃性を志向したAl₂O₃-ZrO₂-C質のSNプレートも一般的に使用される。

近年の高級鋼や特殊鋼の製造に伴いCa添加鋼や高マンガン鋼などの鋳造に対して、溶鋼中成分と低融点化合物を生成しにくいMgO-C質⁸⁾, ZrO₂-C質⁹⁾のSNプレートも開発、実機適用されている。

図5に東日本製鉄所(君津地区)においてAl₂O₃-ZrO₂-C質SNプレートをCa添加鋼に対して使用した場合の孔径の拡大量を示す¹⁰⁾。Ca添加鋼の鋳造に使用した場合、孔径の拡大量が著しく増大することがわかる。加藤らはAl₂O₃-ZrO₂-C質SNプレートの使用後の顕微鏡組織の調査を行い、骨材として使用されるZrO₂-ムライト中のムライ

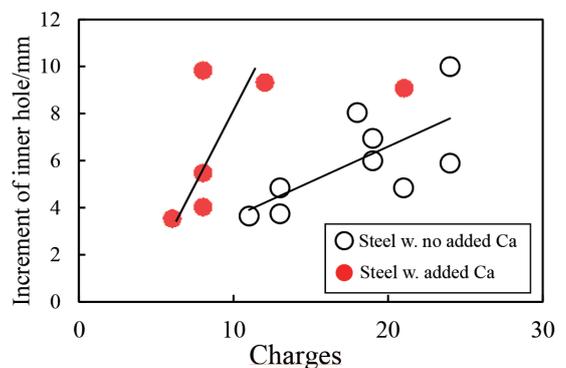


図5 東日本製鉄所(君津地区)におけるAZC質SNプレートの孔径へ及ぼすCa処理鋼の影響
Diameter change of AZC slide gate plates used for casting steel with and without added-Ca at East Nippon Works (Kimitsu)

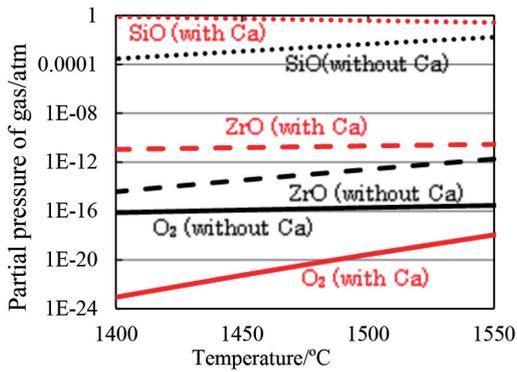


図6 SNプレート中の主要成分の平衡蒸気圧
Equilibrium partial pressure of the main components in the slide gate plate material

トが分解され空隙が生じており、その空隙部分にCaが浸透し損耗拡大に至っていることを見出した。SNプレートと溶鋼の共存化において、溶鋼中にCaがある条件とない条件とで熱力学的に調査したところ、Caがある条件においてよりSiOの平衡分圧が高く、ムライトの分解が進行しやすいことを見出した(図6)。

そこで、酸化物として安定かつ消化、鋳造中の加熱による分解を生じないカルシウムヘキサアルミネート(CA6)を適用した材質が耐火物の高耐食性化に有効であると考え、CA6を適用した開発品を用いてCa処理鋼による損耗を模擬したオフライン試験を行った。その結果、ベース品に対して約3割耐食性を改善させることができた。

4. 注入用耐火物

4.1 ロングノズル

ロングノズルは取鍋からタンディッシュへ溶鋼を供給する際に用いる筒状の耐火物である。タンディッシュへの供給時に外気が溶鋼と接触するのを防止し、溶鋼の酸化や窒素のピックアップを抑制するために使用される。また、溶鋼の流れを層流に保つことでタンディッシュ内のスラグの巻き込み防止の役割も果たす。

耐熱衝撃性が要求される耐火物のため、本体材料には Al_2O_3 を主体として黒鉛と溶融 SiO_2 を使用した Al_2O_3 - SiO_2 -黒鉛質材料が一般的に適用される。タンディッシュ内の溶鋼への浸漬部ではタンディッシュスラグや保温材による浸食を抑制するため ZrO_2 -黒鉛質の材料が用いられることもある。純粋な ZrO_2 は斜方晶系の結晶構造を持ち、 $900^\circ C$ 程度まで加熱されると急激に膨張することになり、耐火物に亀裂を生じさせる原因となる。これを抑制するために、CaOや Y_2O_3 を含有させることで安定化を図っている。内孔部では耐食性を重視し溶融 SiO_2 を含まない Al_2O_3 -黒鉛質の材料や、 Al_2O_3 -MgO質の材料が用いられる。

ロングノズルや注入管、浸漬ノズルには黒鉛が含まれており、予熱中の黒鉛の酸化による耐火物の劣化を抑制するために酸化防止剤を塗布する¹⁾。酸化防止剤は SiO_2 を主体

としており、予熱中の熱により溶融し耐火物を被覆することで大気中の酸素との接触防止を図る。

1 キャストの連続連続鋳造の終了時にタンディッシュの交換と合わせてロングノズルは廃棄されることが多いが、連続連続鋳造終了後も予熱され、繰り返し使用されることもある。このため、耐熱衝撃性向上の要求はますます高まっている。

4.2 注入管

ロングノズルの他に、取鍋からタンディッシュへの溶鋼注入に注入管と呼ばれる土管形状の耐火物も使用される。注入管はタンディッシュパイプとも呼ばれる。注入管はタンディッシュカバー上に固定される。このため溶鋼の注入中に動くことはなく、ロングノズルで起きるようなメタルケース近傍での折損のリスクはない。ロングノズルを使用する場合、交換時に接合部を養生するための作業スペースや高さ方向の裕度が必要であるが、注入管の場合にはそれが不要なく、設備設計上の制限が小さいことが特徴である。

注入管もロングノズル同様に溶融 SiO_2 を含有する Al_2O_3 -黒鉛質の材料が一般的である。ロングノズルと比較して内径が大きいので、取鍋からの注入流が直接内孔に接することはない。しかし、タンディッシュへ注入された溶鋼が飛散し注入管内面に付着堆積し、閉塞に至る²⁾ことがある。このため、地金付着による閉塞防止を目的として地金堆積の抑制が可能な耐火物の開発を進めている。

4.3 浸漬ノズル

浸漬ノズルはタンディッシュからモールドへ溶鋼を供給するために使用する筒状の耐火物である。モールドへの溶鋼供給の際に外気と接触することを防ぎ、溶鋼の酸化や窒素のピックアップの抑制のために使用される。ロングノズルが単純な筒状の形状が一般的であるのに対して、浸漬ノズルは側面に2つ吐出孔と呼ばれる孔を設けた形状が一般的である。ブルームやピレットの鋳造用では側面に4つ吐出孔を設けた浸漬ノズルやさらに下方にも吐出口を設け合計5孔とした浸漬ノズルが使われることもある。

吐出口の大きさや個数は必要な溶鋼スループットをもとに決定される。浸漬ノズルからの吐出流速が大きい場合、介在物の浮上が十分に行えず铸片に補足されることで鋼品質の劣化を招く。このため、最大吐出流速を低減しつつ、吐出流速を均一にすることが鋼品質を向上させるために必要である³⁾。

モールド内での溶鋼流動は電磁力を利用した電磁攪拌、電磁ブレーキによっても制御される。電磁攪拌はモールドの湯面近傍を電磁力により攪拌することで溶鋼成分、温度の不均一さを低減することを目的に使用される。電磁ブレーキは浸漬ノズルからの吐出流の速度を電磁力によって低減させるために使用される。このため、モールド内での溶鋼

流動は浸漬ノズルの形状のみでは決まらず、電磁攪拌や電磁ブレーキの影響も考慮して決定する必要がある。従来浸漬ノズルの形状や吐出口の角度の改善を水モデル実験¹⁴⁾の結果をもとに行ってきたが、近年の計算技術の発達により電磁力の影響を考慮した流動解析¹⁵⁾を行い浸漬ノズルの形状の改善が進められるようになってきた。

浸漬ノズル用耐火物には耐熱衝撃性、介在物による閉塞の抑制能、モールドパウダーに対する耐食性などが求められ、連続鑄造導入当初は熔融 SiO₂ 質耐火物の使用が主流であった。その後連続鑄造法の進歩に伴い、生産性の向上のための多連続鑄造化や高グレード鋼の需要に対応した製造鋼種の拡大が進み、浸漬ノズルに求められる特性がより厳しいものになってきた。特に高マンガン鋼に使用される場合、熔融 SiO₂ と鋼中の Mn とで低融点化合物を生成し溶損が進行することから、より耐食性の高い材料が求められるようになった¹⁶⁾。

そこで、これらの課題を解決するため Al₂O₃-黒鉛質の耐火物が使用されるようになった。浸漬ノズルもロングノズルと同様 CIP により製造されるため、部位ごとに要求される特性に応じた異なる材質を配して一体成形することができる。表 2 に浸漬ノズル用耐火物の品質例¹⁷⁾を示す。

例えばモールドへの浸漬部ではモールドパウダーと浸漬ノズルが接触し、浸食が生じることから、耐食性を重視した ZrO₂-黒鉛質の耐火物が用いられる。一般にモールドパウダーは CaO, SiO₂, CaF, Na₂O などを主成分としており、非常に浸食性が高く、この部位に使用される耐火物の耐用により浸漬ノズルの寿命が律速されることがある。モールドパウダーと接触すると耐火物中の ZrO₂ 粒子が脱安定化し細粒化する現象が生じる。この細粒化した ZrO₂ 粒子がモールドパウダーに離脱することで溶損が進行すると考えられてきた¹⁸⁾。そこで、ZrO₂ 骨材の粒度¹⁹⁾や純度²⁰⁾を制御することで細粒化を抑制する改善がなされてきた。また細粒化した ZrO₂ 粒子を稼働面にとどめておき、保護層の役割を果たすようにするため、あらかじめ ZrO₂ 骨材を 75μm 以下の小径とするよう設計した ZrO₂-黒鉛質により耐食性の向上が図れたとの報告もある²¹⁾。

一方内孔体の場合、Al₂O₃ を主体とする介在物の付着による流路の閉塞が課題である。そのメカニズムの解明のため様々な検討がされてきた。例えば、耐火物から高温下において発生した気相成分が鋼中 Al を酸化させることで Al₂O₃ を耐火物界面近傍に生成させるとする報告^{22,23)}がある。また、耐火物と溶鋼の境界層においては流速がほぼ無いものとみなせるため、境界層近傍に到達した介在物は下方に流されることなく接触するとする報告²⁴⁾もある。その他、温度勾配や耐火物から生成した気相成分の鋼中への溶解に起因する界面張力勾配が介在物付着の駆動力とする報告²⁵⁾もある。このため介在物の付着の抑制を志向した材料が配される。多孔質の Al₂O₃-黒鉛質の材料を使用し、浸漬ノズル内孔からガスを吹き込むことで、浸漬ノズルと介在物との物理的な接触を防止し閉塞の抑制を図ることができる。

また、耐火物中に含まれる黒鉛や SiO₂ の酸化還元反応に伴い、鋼中に炭素やけい素が溶け込み界面張力勾配が生じる。これが、介在物が浸漬ノズル内孔体へ移動する駆動力になることから、その原因となる黒鉛や SiO₂ を含まない材料を内孔体に配することで介在物付着の抑制を図ることができる。さらに、介在物の主成分である Al₂O₃ と反応し低融点化合物を生成する CaO を含有する耐火物を内孔体に配することで介在物の付着抑制の効果がある。CaO を含有する耐火物としては ZrO₂-CaO-黒鉛質²⁶⁾やドロマイト-黒鉛質²⁷⁾などが挙げられる。

そのほかにも、Al₂O₃-黒鉛質の浸漬ノズルを陰極として使用し、溶鋼-ノズル間に数アンペアの電流を流すことで、電気化学的に介在物の付着を抑制²⁸⁾する技術も成果を挙げている。

熱衝撃による浸漬ノズルの折損を防止するため、事前にバーナーによる予熱を行い、1000~1200℃まで温度を上げたうえで使用する(図 7)。しかし、浸漬ノズル上部からバーナーを挿入する場合、バーナー近傍と比較して、ノズルの底面は温度が上がりにくいと予熱温度のばらつきが生じる。この温度のばらつきが原因で予熱不足となり、浸漬ノズルの折損トラブルが起きることがある。さらに、温度のばらつきを低減するためバーナー予熱を長時間行うと、

表 2 浸漬ノズル用耐火物の物性
Properties of refractory materials used for submerged entry nozzle

Application site		Base material		Powder line		Inner lining					
Chemical composition (%)	F.C+SiC	25	23	22	9	17	20	2	-	27	30
	Al ₂ O ₃	50	65	-	-	63	63	72	96	-	-
	SiO ₂	26	3	-	-	19	12	-	-	-	-
	ZrO ₂	-	5	74	86	-	-	-	-	50	-
	CaO	-	-	-	-	-	-	-	3	21	40
	MgO	-	-	-	-	-	-	25	-	-	28
Bulk density		2.33	2.66	3.39	3.98	2.43	2.46	2.70	2.94	2.90	2.36
Apparent porosity (%)		13.6	11.8	15.1	15.6	17	18.4	20.7	20.9	16.1	15.5
Modulus of rupture (MPa)		8.0	12.1	7.1	9.0	4.1	4.8	3.0	4.7	9.9	3.8
Thermal expansion (1000°C, %)		0.23	0.34	0.37	0.31	0.32	0.36	0.67	0.80	0.32	0.42

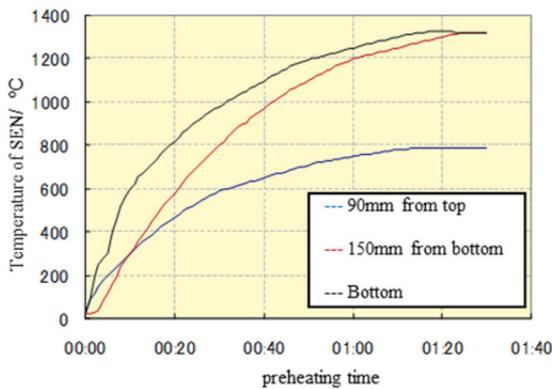


図7 バーナー予熱時の浸漬ノズルの温度推移
Temperature change of submerged entry nozzle during burner preheating

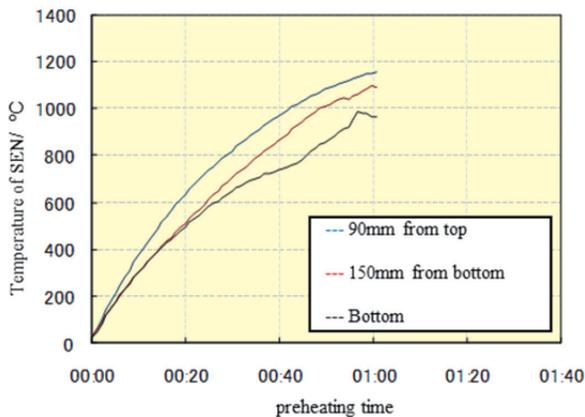


図8 IH予熱時の浸漬ノズルの温度推移
Temperature change of submerged entry nozzle during preheating by induction heating

浸漬ノズル中の黒鉛が酸化してしまう課題があった。中村は黒鉛を含有する浸漬ノズルに誘導電流が流れる性質を利用し、IHを浸漬ノズルの予熱に適用した²⁹⁾(図8)。バーナー予熱では最大600°Cの温度のばらつきがあったのに対して、IH予熱の適用により短時間での予熱を可能とするとともに、200°C程度まで温度のばらつきを低減した。

バーナー予熱では浸漬ノズル表面に約5mm厚の酸化層が生じていたのに対して、IH予熱を適用した結果、酸化層の生成を1mm厚未満のごく表面に抑制できた。これらの結果、浸漬ノズルの折損トラブルが解消できた。

5. 結 言

本稿では連続鋳造用耐火物各部位の役割、使用耐火物の材質および使用方法の概要を述べるとともに、日本製鉄における技術開発の現況について記載した。連続鋳造用耐火物は製鋼工程の最終段階で使用される耐火物であることから、その安定性は鋼の品質に密接に影響を与える。連続鋳造用耐火物の更なる耐用性の向上に向けた技術開発を通じ、高品質な鋼の安定生産に寄与していく。

参照文献

- 1) Worldsteel: Steel Statistical Yearbooks 2018. 2018
- 2) 木村雅保, 中島真一, 上田輝, 中尾勝: 神戸製鋼技報. 50, 12 (2000)
- 3) 京田洋, 市川健治, 杉本弘之, 中村良介: 耐火物. 37, 596 (1985)
- 4) 大神成史, 深見直孝, 仲野貴紀: 耐火物. 66, 317 (2014)
- 5) 佐藤正治, 祐成史郎, 新保章弘: 第86回耐火物部会提出資料. 日本鉄鋼協会, 2008
- 6) 松井俊介: 第96回耐火物部会提出資料. 日本鉄鋼協会, 2018
- 7) 高嶋章伍, 久保吉一, 細井威男, 山副広明: 耐火物. 65, 84 (2013)
- 8) Akamine, K.: Taikabutsu Overseas. 18, 22 (1998)
- 9) 福岡弘美, 金子俊明, 古里功, 仁田脇莊一郎: 耐火物. 45, 586 (1993)
- 10) Kato, Y., Ikemoto, T., Goto, K.: Proceedings of the UNITECR 2017 Conference, 2017, p. 13
- 11) 藤井幸一郎, 古家後啓太, 榎谷勝利, 原田正博, 麻生泰照, 山口太: 耐火物. 44, 582 (1992)
- 12) 笠井宣文, 山副広明, 井口學: 鉄と鋼. 91, 763 (2005)
- 13) 溝部有人, 立川孝一, 栗栖譲二, 植木正憲: 耐火物. 69, 58 (2017)
- 14) 例えば 望月陽一郎, 速水邦夫, 長谷部悦弘, 瀧川整, 安藤正博: 耐火物. 51, 503 (1999)
- 15) Toh, T.: Proc EPM, Sendai, 2006, ISIJ, p. 21
- 16) 鬼丸泰幸: 耐火物. 65, 383 (2013)
- 17) 耐火物手帳. 改訂12版. 耐火物技術協会
- 18) 向井楠宏: 耐火物. 42, 710 (1990)
- 19) 林安茂: 耐火物. 42, 668 (1990)
- 20) 内田和秀: 耐火物. 53, 274 (2001)
- 21) 池本正 ほか: 耐火物. 51, 588 (1999)
- 22) Fukuda, Y., Ueshima, Y., Mizoguchi, S.: ISIJ Int. 32, 164 (1992)
- 23) 笹井勝浩, 水上義正, 山村英明: 鉄と鋼. 79, 1067 (1993)
- 24) Singh: Metallurgical Transactions. 5, 2165 (1974)
- 25) 向井楠宏: 鉄と鋼. 80, 527 (1994)
- 26) 辻野良治: 鉄と鋼. 80, 765 (1994)
- 27) 緒方浩二, 天野次朗, 森川勝美: 耐火材料. 152, 24 (2004)
- 28) 塚口友一, 加藤徹, 渡邊信輔, 大賀信太郎, 田中敏宏: まてりあ. 50, 27 (2011)
- 29) 中村壽志: 第90回耐火物部会提出資料. 日本鉄鋼協会, 2012



加藤雄一 Yuichi KATO
九州製鉄所(大分地区)
製鋼部 炉材室 主査
大分県大分市大字西ノ洲1 〒870-0992