

© 1992 ISIJ

製鋼技術の動向と耐火物技術への提言

展望

王 寺 睦 満*

The Recent Trends of Steelmaking Process with Special Attention to Refractory Technology

Mutsumi OHJI

1. 緒 言

鉄鋼一貫工程において、製鋼工程は最も高温で溶融状態、かつ精錬スラグを伴っているために耐火物の中でのハンドリングを宿命づけられている。さらに、連続铸造を主体とする凝固までを対象に考えると、製鋼は一貫工程の中における品質の大半を最終的に決める工程であり品質、操業性、したがって、能率、コストなど、あらゆる面で耐火物に大きく依存している。図1は鉄鋼一貫製鉄所の使用全耐火物に占める製鋼耐火物の比率を示したものであるが、混鉄車を含む製鋼耐火物コストは実に80%以上を占めており、製鋼耐火物の重要性が非常に大きいことが判る。本稿では最近約20年間の日本における製鋼技術の進歩・発展を耐火物とのかかわりの中でその概要を振り返り、ついで製鋼からみた耐火物にかか

わる現状の技術課題について、溶鉄予備処理から連続铸造に至るまでの各工程別に言及し、最後に今後の展望と耐火物技術への要請についても幾つかの点を提言したい。

2. 製鋼技術の進歩・発展の概要

我が国における粗鋼生産量の推移と主要な製鋼技術の変遷を図2に示す。1972～73年に至るまでは粗鋼生産伸張期で、1973年には約1億2千万トンに達しており、プロセスで言えば純酸素上吹き転炉（以下、上吹き転炉）による能力増強期であると言える。この間、減少し続けてきた平炉は1975年には完全に消滅することになる。一方、1970年代から連続铸造化（以下連铸化）が急速に進展し、1985年頃には90%以上の連铸化比率に達している。この間に種々の技術が生まれてきているが、転炉化の後の製鋼技術の変化について最も重要なのは連続铸造技術であると思われる。すなわち、連铸化の進展が精錬工程にも変革をもたらし、二次精錬技術の多様化や溶鉄予備処理技術の開発に繋がったものと考えられる。またもう一つの顕著な傾向として言えるのは電気炉の着実な伸張である。このことは、日本においてもスクラップの社会蓄積と還流が確実に根付いてきていることを物語っており、昨今では、電気炉鋼の生産比率はすでに30%以上ものシェアを占めるまでに至っている。図3に精錬機能の分化の変遷を示す。当初、精錬は全て上吹き転炉で行われていたが、品質の厳格化に対応し製造コストの低減を実現していくために、脱硫の分化に始まり脱ガスや溶鉄予備処理を炉外精錬工程として導入してきた。最近では、脱珪、脱燐、脱硫の大部分を溶鉄予備処理工程で行い、さらに二次精錬によって温度、成分の制御レベルを向上させる、といった形で精錬機能の分化が進み、上吹き転炉の役割は脱炭に限定されつつある。現在では溶

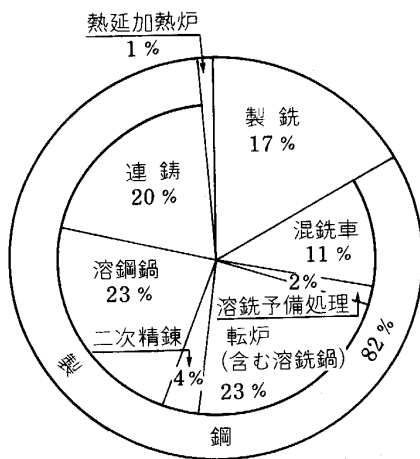


図1 全耐火物コストに占める製鋼耐火物コストの比率（新日鉄・君津：ホット・アルミキルド鋼の例）

平成3年11月7日 日本鉄鋼協会共同研究会第50回耐火物部会特別講演による

平成4年3月31日受付 平成4年7月3日受理 (Received on Mar. 31, 1992; Accepted on July 3, 1992) (依頼展望)

* 新日本製鉄(株)取締役 設備技術センター所長 (Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku, Tokyo 100)

Key words: hot metal pretreatment; converter; secondary refining; continuous casting; refractory; castable refractory; nozzle clogging; IF steel; line pipe steel; wire; smelting reduction.

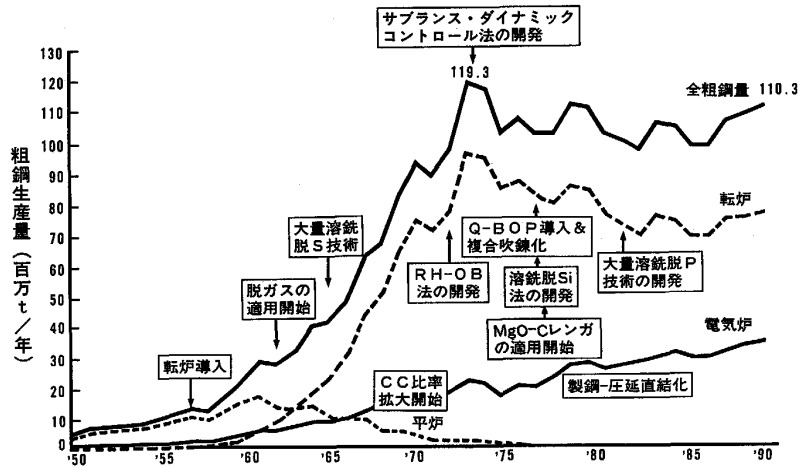


図 2 粗鋼生産の推移 (全国合計)¹⁾

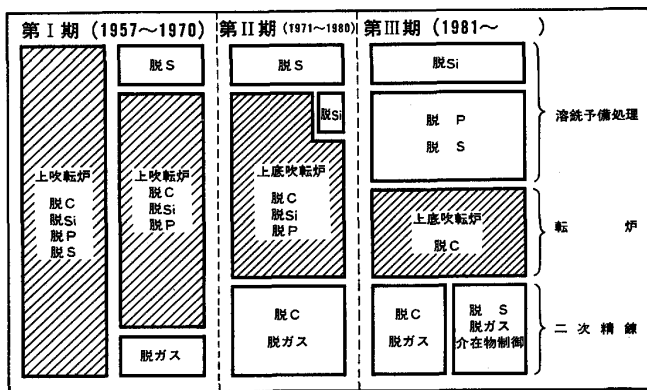


図 3 精錬機能の分割化²⁾

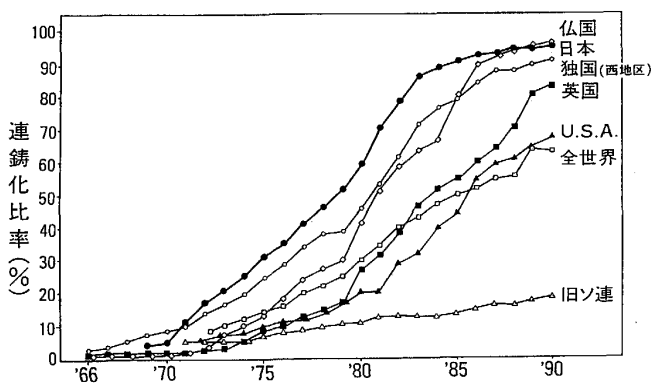


図 4 国別 CC 比率の推移 [日本鉄鋼連盟：鉄鋼統計要覧]

銹予備処理による脱燐，脱硫の実施率は大略，40%程度であろう。このように，精錬工程の分割という大きな流れの中で製鋼技術が変化してきたと考えられる。図4に主要国における連鑄鋼生産比率の推移を示す。1970年には10%にも満たなかった我が国の連鑄比率は1985年には90%を超えるレベルまで拡大し，直近では約94%にも達している。この間に，溶鋼から得られる製

品の割合を表す一貫歩留りは，80%台から90%台へと約10%ほども上昇し同時に品質の大幅な改善，安定化が図られた。後に触れるように，連鑄化の進展は上吹き転炉，溶銹予備処理，二次精錬等の精錬工程全般にわたって大きな変化を要請し，その中で製鋼耐火物も基本的な影響を受けたものと思われる。

2.1 精錬プロセスの発展の経緯

粗鋼生産量の伸張期は，上吹き転炉の全盛期であり，製鋼プロセスとして，上吹き転炉はほぼ完成された技術であると大方の人々が感じていたと思われる。しかしながら，1977年に川崎製鉄(株)が千葉製鉄所にQ-BOP炉を導入したことが大きな契機になって，上吹き転炉から上底吹き転炉への転換が急速に進むことになる。純酸素底吹き転炉(以下，底吹き転炉)の羽口技術は1968年頃にドイツのMAXHUETTEにおいて開発された。後にそのライセンスの下に，US STEELがQ-BOPとして底吹き転炉を稼働させ，さらに川崎製鉄(株)がこの技術の導入に踏み切ったものである。一方，1976年頃から上吹き転炉においても，各社でいろいろな試みがなされており，底吹きの部分的な適用が実施され始めていた。このような上底吹き転炉への転換を積極的に推進していくにあたっては，川崎製鉄(株)のQ-BOP炉導入が大きな刺激になったのは事実である。ところで，なぜ問題がいろいろあると想定される底吹きの導入に踏み切ったのであろうか？平炉，電気炉に比較して，十分に大きいと考えられていた上吹き転炉の攪拌力はなお不十分で，冶金反動的には，より一層攪拌を強化して反応効率を高める余地がまだ残っていたことがその理由である。図5に示すように，吹錬終点における低炭素域での鋼中酸素濃度は，底吹きの適用によって上吹き転炉におけるそのほぼ下限付近に分布すること，また，約10%の底吹き比で100%底吹きのQ-BOP炉とほぼ同じ程度となることが判る³⁾。このように，攪拌強度が上

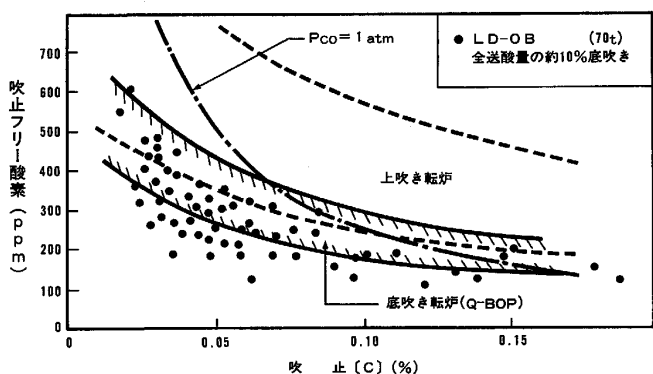


図5 上吹き転炉, 底吹き転炉, 上底吹き転炉における吹止 [C] と $f[O]$ との関係³⁾

昇することによる効果としては、鋼中の酸素レベルが低下しスラグ中の T-Fe も低下する結果、溶鋼歩留りや耐火物原単位の面で有利になるとともに、転炉吹錬終点マンガン値が高くなること、脱磷反応もより平衡に近づくということなどを挙げることができる。もう一つの視点は、ここでも色濃く連铸化が影響しているという見方である。つまり、それまでの大多数の薄板は造塊法のキャップド鋼で製造されており、吹錬終点炭素値はほぼ 0.06~0.08% の間にあった。このような炭素範囲においては、上吹き転炉と上底吹き転炉の鋼中酸素の間には顕著な差は認められない。ところが、連铸法になってキャップド鋼がアルミキルド鋼化されると、加工性の問題から炭素値を下げざるをえなくなり、吹錬終点炭素値は 0.05% かそれ以下になった。その結果、上吹き転炉では鋼中酸素、スラグ中の T-Fe も高くなるために、溶鋼歩留り低下や耐火物寿命の悪化などの不都合が生じ、これらの対応策として溶鋼の攪拌をさらに強化する必要があったのである。その結果、上吹き転炉の比率は、1973 年には 100% であったが、その後底吹きを含む上

底吹き転炉の比率は 1984 年には約 60% に、1990 年には約 75% にも達している。なお底吹きガスの種類としては、酸素のほかにアルゴン、窒素、炭酸ガスなどが用いられていることは周知のとおりである。

二次精錬技術の進歩・発展についても連铸化の進展が大きく影響を与えたものと考えられる。連铸化にとって最も大きな課題の一つは、成分と温度の制御精度を高めることである。その結果として、連铸化の進展と前後して図 6 に示すとおり多様な二次精錬法が採用されている。レードルファーネス (以下、LF) は、1972 年頃に日本特殊鋼(株)(現:大同特殊鋼(株))において開発された技術で、当初は低硫、低酸素の高級鋼製造を目的として一部の銑鋼一貫メーカーで採用されたが、のちに、むしろ電気炉メーカーにおいて広く普及した。これは高級鋼の溶製目的というよりは、電気炉と連铸間のマッチングを向上させる設備として導入されたと考えられるべきであろう。真空脱ガス法は、1960 年代の初めから最初に DH 法が導入されたが、当初の目的は脱水素であり、その他の活用方法については模索を続けていた。しかし、当時の平炉~DH の組み合わせでは完成された域には到達しなかったと考えられる。すなわち、平炉においては、DH 処理に必要な 1650~1700°C といたった高温出鋼が容易にできなかったために、種々の鋼種を溶製するには大きな困難を伴った。これに対して、上吹き転炉でこのような高温出鋼が容易になった結果、DH, RH といった真空脱ガス法は、上吹き転炉との組み合わせで広く普及して使用されていくことになる。一方、適用鋼種の面からみると、最初は厚板材の脱水素目的で使用されたが、初めて大々的に適用されたのは実は電磁鋼であった。すなわち、大量の合金鉄を添加して成分を均一化するとともに、微妙な成分制御が可能となったからである。後になって、この真空脱ガス法は連铸法との組み合わせにおいて、溶鋼成分と温度の均一化と微調整という目的で

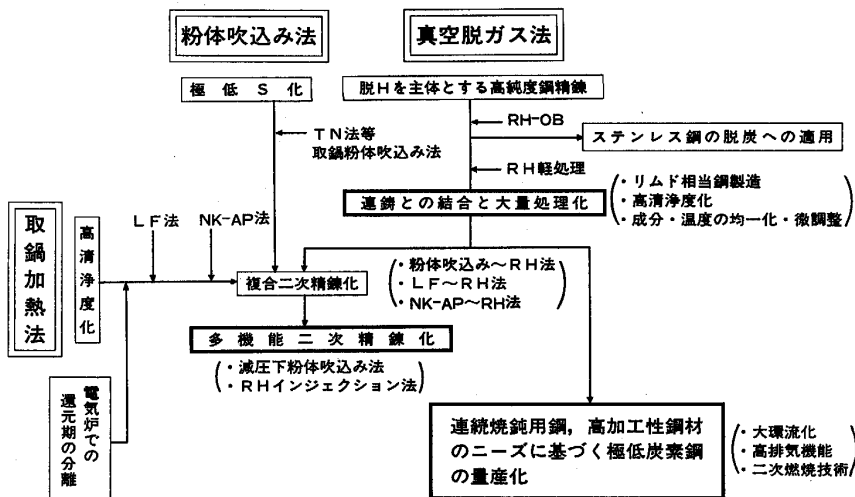


図6 二次精錬技術の発展経緯

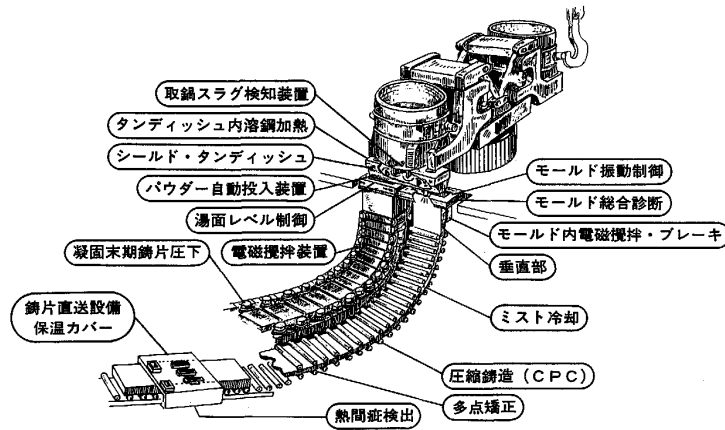


図 7 最近の連铸機の主要装備力の例

大量処理が進んでいくことになる。さらに、薄板の連続焼鈍化の進展に伴って、低炭素アルミキルド鋼では加工性が保証しがたいという理由で極低炭素鋼、いわゆる IF 鋼の大量生産が進みつつある。すなわち、連铸化の進展と連続焼鈍化、極低炭素鋼化が真空脱ガス法の普及に大きな影響を与えたのである。当然のことながら二次精錬法の普及は、必ず 20°C 以上の出鋼温度上昇をもたらしており、転炉にも二次精錬にも耐火物の面では非常に大きな負荷をかけている。

溶銑予備処理技術の発展は、基本的には低磷鋼を始めとする高級鋼の需要増大、あるいはステンレス鋼などの転炉精錬の必要性から開発されたが、その後、一般鋼にも適用されるようになった。当初は、溶銑脱硫が大宗を占めていたが、1980 年代の半ばぐらいから脱磷処理をも行うようになった。これらの操業は、生石灰粉と酸化鉄粉を用いた粉体吹き込みで行われるのが一般的である。溶銑予備処理には、それぞれの製鉄所のローカル条件に基づいて、混銑車、溶銑鍋、および転炉などを反応容器とした種々の方式が採用されている。このような溶銑予備処理技術の開発、導入、普及に伴って、吹き込みランスとか反応容器としての耐火物に関する問題が種々発生してきているのはいうまでもない。

2.2 最近の連铸機の主要装備力

図 7 は最近の連铸機の主要装備の概要である。連铸工程は鋼の品質を最終的に決定する工程であり、近年の品質の厳格化に対応するために種々の装備を付与してきていることが読み取れる。タンディッシュ周辺では、溶鋼鍋スラグ流出検知装置の設置が積極的に進められ、溶鋼加熱設備などの採用が進み耐火物への熱負荷も大きくなっている。モールド周辺では、電磁攪拌や電磁ブレーキの装備が進みつつあり、長らく取り組んできたモールド湯面レベル制御に関しても、現在も制御精度を向上させる目的でいろいろな対策が打たれている。とくに、注入系、すなわち溶鋼鍋から浸漬ノズルにかけての技術は品質の確保、改善の面から今後も基礎的な面からの議論

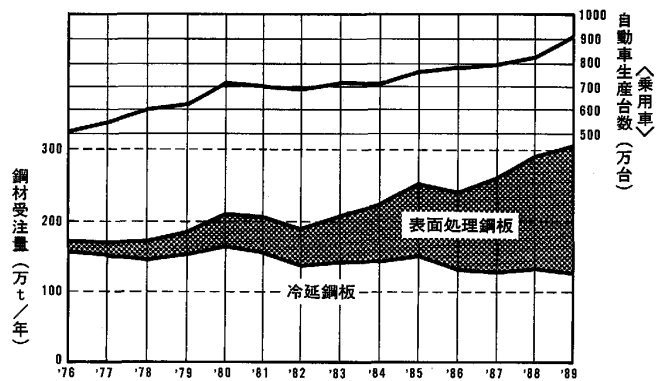


図 8 日本自動車(乗用)生産台数および新日鉄の自動車用鋼板受注量の推移 [日本自動車工業会:自動車統計月報]

が必要であると考えている。

2.3 品質厳格化への対応

製品の要求品質の厳格化、品質の多様化、および高級化への対応がこの間に間断なく求められてきており、このことが製鋼プロセス、ひいては製鋼耐火物の進歩・発展に深く関係していると考えられる。図 8 はこの一例であるがここ 14~15 年にわたる自動車の生産台数と自動車用鋼板受注量の推移を示したものである。自動車用鋼板受注量の増加は、自動車生産台数の伸びに対応していることが判る。また、同時に表面処理鋼板化が進んでおり、今や、自動車用鋼板受注量の半数以上が表面処理鋼板に置き変わっている。これに伴って、たとえば新日鉄の例では IF 鋼の出鋼量は、1986 年から 91 年の間にほぼ 3 倍になっている。一つには、表面品質の厳格な要求からバッチ焼鈍では対応できなくなって連続焼鈍化へ移行せざるをえなくなったこと、二つには、電気メッキと溶融メッキとを問わず、目付け量の増加に伴うプレス成形性の悪化対策として、薄板の材質を改善、向上させる必要があったこと、三つには、製品の高耐食性要求によって溶融メッキ比率が増加してきたこと、などにより IF 鋼化が大きく進展した。もちろん、この傾向が転炉と二次

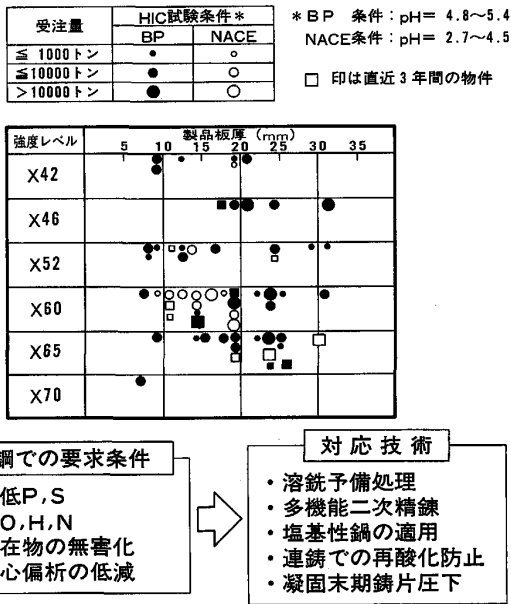


図9 UO耐サワー・ラインパイプ材の強度・板厚の要求厳格化と対応技術(1981年~1991年新日鉄の例)

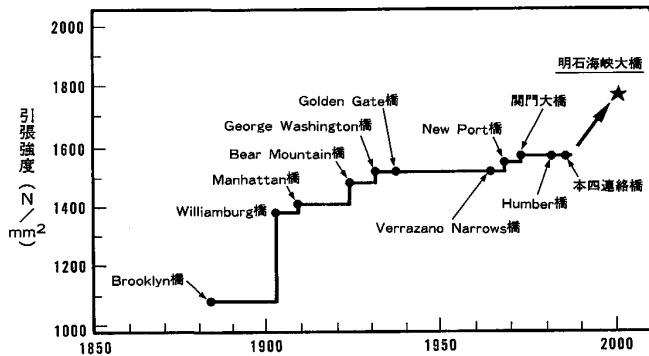


図10 吊橋ケーブル用鋼線の強度の推移

精錬のRH耐火物に多大な負荷をかけていることは言うまでもない。ついで、UO耐サワーラインパイプにおける強度・板厚の要求厳格化と対応技術の例を図9に示す。図から、新日鉄における直近3年間の物件は、高強度・厚肉側に偏っていることが理解できる。耐サワーラインパイプ・厚肉材では、耐水素誘起割れ(HIC)特性を向上させることが最重要課題であり、そのために、極低燐、極低硫、極低酸素・窒素・水素、介在物の形態制御、および中心偏析の低減に取り組んで製造しており、この傾向は高強度で厚肉であるほど条件が厳しくなる。そのために、精錬工程では溶銑予備処理、高度二次精錬、塩基性溶鋼鍋の適用、連鑄工程では再酸化防止、凝固末期鑄片圧下、といった製鋼技術の粋をつくって対応しているのが実情である。図10には吊橋ケーブル用鋼線の強度の推移を示す。この例は、長い間ケーブル用鋼線の強度が停滞していたことを表しており、1900年頃の

Williamburg橋の約1400 N/mm²以来、約80年を要してようやく本四連絡橋の約1600 N/mm²に辿り着くわけだが、最近、約1800 N/mm²級のケーブル用鋼線が実用化され、明石海峡大橋に適用されることが決まっている。当然、溶鋼成分の狭幅管理や介在物の管理など、厳しい要求に対応していることは言うまでもない。線材の分野では、この他に、非常に高度な技術を必要とする品種としてラジアルタイヤ用のスチールコードがある。これは、もともと天然繊維や人造繊維が用いられていた部分を鋼材がほぼ完全に置換したという珍しいケースである。スチールコードもまた非常に精密な介在物、および偏析の制御が求められており、今や世界中のタイヤコードを日本の製品が席巻していると言っても過言ではない。

ごく代表的な2,3の例を紹介したにすぎないが、まさに品質の厳格化への対応は枚挙に暇がないところで、いずれの場合も高温出鋼、二次精錬の処理時間延長、連鑄耐火物の多様化と品質対策など、耐火物に対する要請がいやが上にも大きくなっていくわけである。このような状況のなかで、現状の製鋼作業から見た耐火物にかかわる技術課題について次章で言及したい。

3. 製鋼から見た耐火物に関わる現状の技術課題

3.1 精錬用耐火物

溶銑予備処理工程の問題は、混鉄車や溶銑鍋などの輸送容器を反応容器として使用することから生じてきている。図11はこの間における混鉄車耐火物原単位、および原単価の推移の一例である。当初、シャモット煉瓦を使用していた時代には原単位、原単価とも低位に安定していたが、溶銑脱燐を行うようになってからいずれも急速に悪化してきた。このような傾向に対して、アルミナ炭珪カーボン質煉瓦の適用をはじめ、種々の改善・開発によって原単位と原単価を改善してきたのが実情である。現状における耐火物原単価は、指数で約1.7前後であるが、溶銑予備処理適用以前のシャモット煉瓦の原単位に現在の単価を乗じて相当する原単価を試算する

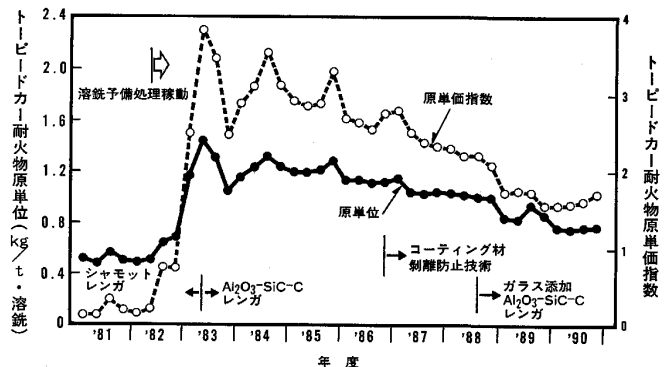


図11 トービードカー耐火物原単位および原単価指数の推移(新日鉄・君津の例)

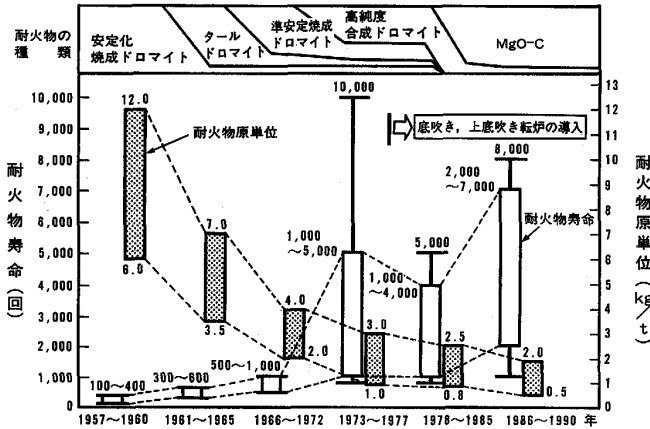


図 12 転炉の耐火物寿命と耐火物原単位の推移 [日本鉄鋼連盟：転炉作業調査月報ほか]

と、略 0.7~0.8 となる。この差は、反応容器として精錬作業を行うための耐火物費用増と考えられる。したがって、耐火物損耗機構の解明をベースとした高耐食性耐火物材質の開発、操業技術・補修技術の改善などが技術課題として残されている。

主精錬工程は、上吹き転炉法が上底吹き転炉法に変化してきたが、この変化に合わせて、耐火物も安定化焼成ドロマイト質煉瓦から、タールドロマイト質、準安定焼成ドロマイト質、高純度合成ドロマイト質煉瓦を経て、耐スポール性、耐食性が非常に優れているマグネシア・カーボン質煉瓦に変わってきた。たとえば、新日鉄の例では、この 10 年間に転炉耐火物に占めるマグネシア・カーボン質煉瓦の比率は急速に上昇し、約 95% に達している。図 12 には、上吹き転炉導入以降における耐火物寿命と耐火物原単位の推移を示す。上底吹き転炉への転換が始まる前の 1975 年頃、耐火物寿命は全体としては 1 千回から 5 千回という範囲に分布しており、1 万回という例外もあって、一端、ここで一つのピークを達成したものと思われる。その後、上吹き転炉から上底吹き転炉への転換が行われた結果、基本的にはスラグ中の T-Fe が減少する効果で耐火物成績が向上するはずであったが、同時に進展した連铸化による出鋼温度の上昇や底吹き羽口を中心とした炉底の問題によって耐火物寿命は一旦、低下した。しかしながら、その後いろいろな改善・改良がなされた結果、耐火物寿命は飛躍的に向上し原単位も以前に比較して低いレベルに収束しつつある。一方、この中で底吹き羽口の寿命は、いまなお約 1 千回から 3 千回であり、炉体寿命の約半分ぐらいにとどまっている。したがって、底吹き羽口の寿命を延長し炉体寿命とほぼ同様なレベルに持っていくことが今後の重要な課題の一つである。図 13 は転炉鉄皮のシャルピー衝撃値劣化速度に及ぼす耐火物材質の影響を表したものである。マグネシア・カーボン質煉瓦は耐食性は非常に良いものの、熱伝導率が高いという特性を持っているた

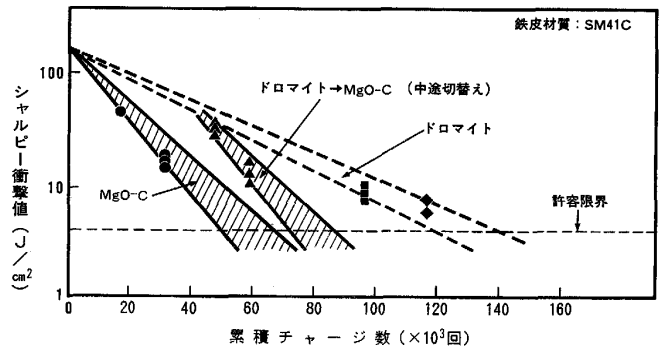


図 13 転炉鉄皮のシャルピー衝撃値劣化速度によぼす耐火物材質の影響 (新日鉄)

め、煉瓦厚みが薄くなるまで長期間使用すると鉄皮温度が上昇する結果、鉄皮のシャルピー衝撃値が悪化し、炉体鉄皮の劣化が著しくなってくるのが判る。すなわち、鉄皮寿命は従来材質(ドロマイト系)ではほぼ 12~14 万回であったものが、マグネシア・カーボン質煉瓦では 6~8 万回位に低下しており、この点では鉄皮更新に高い費用を掛けているわけで大きな問題点の一つである。以上のことから、今後の転炉耐火物に関する技術課題としては、第一に底吹き羽口寿命の向上、第二にマグネシア・カーボン質煉瓦の熱伝導特性の制御に基づく鉄皮材質の劣化防止などがあげられよう。なかでも、底吹き羽口については、いまだ損耗機構が完全には解明されていないと思われる。すなわち、羽口にはマッシュルームが生成して耐火物を覆い保護すると考えられているが、それにもかかわらず、羽口が損耗していく機構は一体どのように説明されるのか? などを研究対象に取り上げ、基本的な問題から解明していく必要がある。

二次精錬用耐火物に関しては、製品品質の向上と品種の多様化に対応して、たとえば、極低炭素鋼比率の増大に代表されるように耐火物に対する負荷がますます増加してきており、耐火物の使用量は少ないものの、全体としては稼働率とか寿命の点で色々な問題を抱えているのが実情である。最も一般的な RH を例にとっていえば、今後の技術課題は、浸漬管、下部槽の寿命延長と耐火物原単位の低減に集約される。当然、設備、操業技術上の改善によって処理時間の短縮を図ることは、操業側の重要な課題である。

3.2 溶鋼鋼用耐火物

溶鋼鋼耐火物は、製鋼用耐火物の中で比較的大きな比率を占めている。この部分は、最も不定形化が進んでおり、資源の有効活用という技術の方向に沿って開発が進められてきた。材質的には、資源の問題からジルコンが高騰したこともあり、最近ではアルミナ・スピネル質耐火物に替わりつつある。また、品種的には塩基性耐火物を使用した方が有利な鋼もあるために、一部は塩基性の不定形化も進んでいくものと思われる。図 14 に示すと

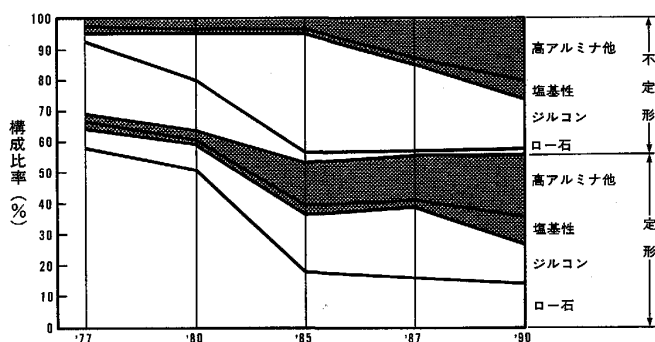


図 14 取鍋ライニング材質の推移 (新日鉄)

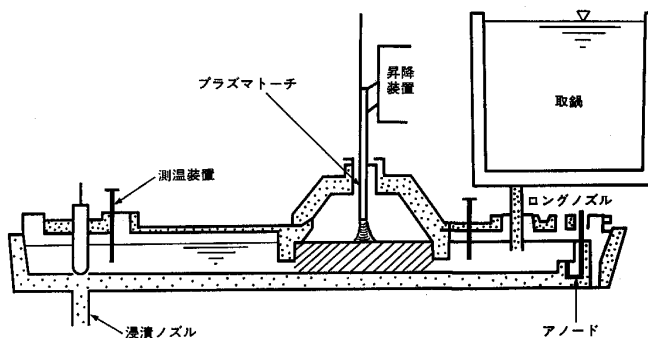


図 16 タンディッシュ・プラズマ加熱設備 (新日鉄・広畑の例)

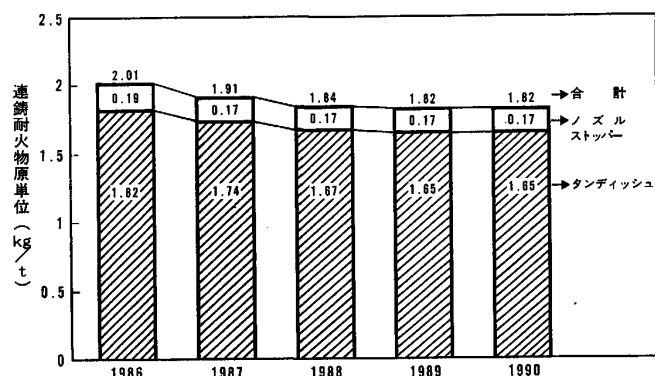


図 15 連铸耐火物原単位の推移 (高炉各社合計) [日本鉄鋼連盟:耐火物調査表]

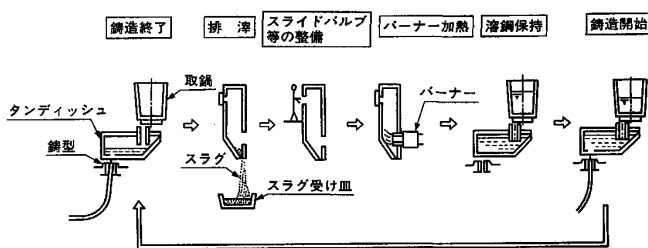


図 17 タンディッシュ熱間回転作業フロー⁵⁾⁶⁾ (神鋼・加古川 No. 4CC)

おり、現在では約 40% の不定形耐火物適用比率である。また、前述したとおり、極低硫、極低酸素レベルが求められる一部の鋼を溶製するには、塩基性耐火物が極めて有用であり、最近、増加傾向にあることを示している。溶鋼鍋耐火物原単位は着実に改善されてきており、技術的には、不定形化の推進と適切な耐火物の開発が大きく寄与しているものと思われる。将来的にも、不定形化はこの溶鋼鍋耐火物の分野において最も進むと考えられ、溶鋼鍋全体の不定形化を実現することが今後の技術課題である。

3.3 連铸用耐火物

連铸工程においては、連铸化率が約 94% にも達していることもあり、今後は一層の品質の向上や目的の鋼が計画のとおり、最終工程に到達するという意味での品質直行率向上が重要視される時代になりつつある。すなわち、連铸における高度な品質の造り込み技術が必須になってきているなかで、タンディッシュ関係の耐火物機能の重要性が増大してきていると考える。図 15 に連铸耐火物原単位の推移を示すが、大部分がタンディッシュ耐火物で、かつ最近では進歩がほとんど停滞しているように見受けられ、何らかの技術的なブレイクスルーが必要な時期に至っていると思われる。タンディッシュの中で、溶鋼の温度制御を実施する例としてプラズマ加熱設

備を装備した概念図を図 16 に示す。この方法は、溶鋼温度を連続的に測定しながら狭い範囲の温度制御を行うことを目的とする。重要な技術課題としては、厳しい温度に曝される加熱室周辺の耐火物の問題が残されている。他の方法として誘導加熱装置も適用され始めているが、耐火物の問題はここでも重要な課題である。一方、タンディッシュにかかわる最近の技術動向として、省エネ、省力化および耐火物コストの改善を目的とした熱間回転が試みられている。この熱間回転は、タンディッシュ内に残留したスラグによる溶鋼の汚染という品質問題によって避けられてきたが、最近では、高塩基度かつ低粘性フラックスを添加するといった対応措置を講ずることによって、生産工程で適用され始めている。図 17 は(株)神戸製鋼所・加古川製鉄所にて実施されている例の模式図⁵⁾⁶⁾であるが、ほぼ、密閉型のタンディッシュを使用して鑄造終了後、残溶鋼とスラグを同時に排出した後に鑄造準備時間を利用して必要な整備を実施し、そのまま次の鑄造に用いるという熱間回転を行っている。その結果としてタンディッシュ耐火物コストは約 1/3 に改善されたと報告されている。以上のように、連铸用耐火物の技術課題は、最適なタンディッシュ耐火物技術の確立に尽きると考えられる。すなわち、溶鋼鍋スラグの流出検知・防止装置、完全シールドタンディッシュ、加熱装置による溶鋼温度制御、およびタンディッシュ熱間回転などの新しい操業方式に対応しつつ最適な構造と材質を開発し、低コスト化を実現していくこととなる。

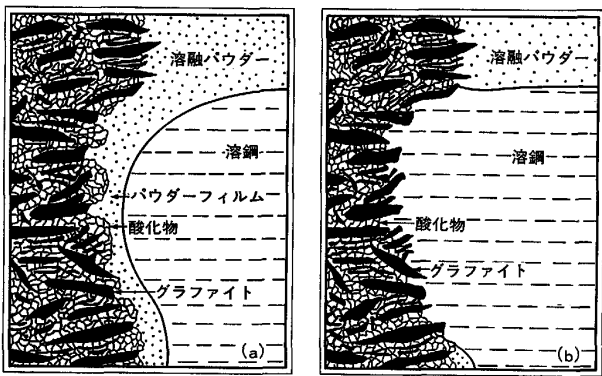


図 18 浸漬ノズルのスラグライン局部溶損のメカニズム⁷⁾⁸⁾

3.4 耐火物と溶鋼との反応に関する研究の必要性

一般に耐火物については、従来、溶損の観点から主としてスラグとの反応に関する種々の研究、議論がなされてきたが、連铸鑄片の品質の一層の改善という面から考えれば、今後は、耐火物と溶鋼の反応も含めて研究していくことが重要であると考えられる。すなわち、浸漬ノズル詰まりとか極低炭素鋼における[C]ピックアップといった現象の発生機構を、耐火物の損耗機構を理論的に検討し解析したうえで明らかにするとともに、これらの現象が生じない新しい耐火物材質の開発と適用を進めていく必要がある。一例として、向井楠宏ら⁷⁾⁸⁾によるアルミナ・グラファイト質(以下、 Al_2O_3 -C質)浸漬ノズルの溶損機構に関する興味深い提案について紹介したい。図18は、連続鑄造のモールド内メナスカス部分を表現したものである。アルミナ・グラファイト表面の状況によって、生地の耐火物が表面の大部分を覆っている場合と、グラファイトが多く表面に出ている場合とでは、溶融パウダーとの濡れ性に差が生じ、(a)図の場合は、溶融パウダーに耐火物生地が溶損していき、(b)図の場合は、グラファイトが溶鋼に溶けていく。これらが繰り返して起こることによってメナスカス部における Al_2O_3 -C質ノズルの溶損が進むということである。このような損耗機構の解明が進むことによって、適切な耐火物の開発と適用が一段と進むことを期待したい。次に、鑄片品質に重大な影響を及ぼしている事象として、浸漬ノズルの閉塞現象をとりあげてみたい。これはアルミナ系酸化物の付着、成長に起因するものであり、現状ではこのような閉塞現象を防止するために、浸漬ノズル内にアルゴンガスを吹き込むなど、一応の対応策をとっているもののその成果は満足すべきレベルではなく、付着物の剥離に基づく急激な湯面変動による操業不安定や、溶鋼内に流出したアルミナクラスターに起因する表面疵といった品質問題を惹起している。浸漬ノズルの閉塞機構については最近盛んに研究されており、図19に示すとおり、まず最初に、耐火物と溶鋼中のアルミニウムとの反応に

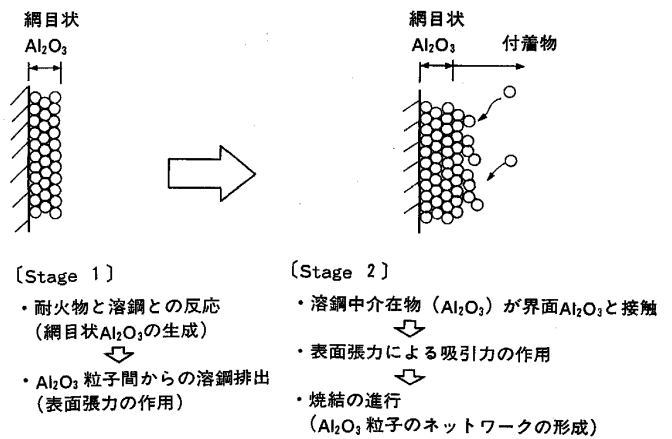
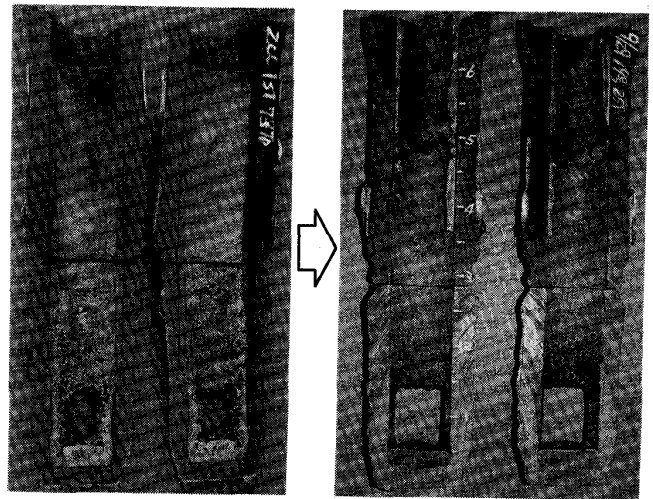


図 19 Al_2O_3 -C質ノズルの Al_2O_3 付着メカニズムの例⁹⁾



【従来の Al_2O_3 -C質ノズル】 (Alキルド鋼390分鑄造)

【 ZrO_2 -CaO-C質ノズル】 (Alキルド鋼400分鑄造)

写真 1 浸漬ノズル詰まり防止の例 (新日鉄・君津二製鋼)

よって耐火物表面に網目上のアルミナが生成し、ついで、この網目上のアルミナに溶鋼中のアルミナが接触、析出し成長を続けていくものと考えられる⁹⁾。アルミナが付着し析出する部位は、主として、ノズルの吐出孔とかスライディングゲート部といったような溶鋼流の乱れが最も激しい箇所であり、このような現象には、表面張力が大きな役割を果たしているという議論が説得的である。このような考え方に基づいて、アルミニウムを含む溶鋼との反応で網目状のアルミナを生成しにくい耐火物、もしくは、生成したアルミナが耐火物自体と反応して低融点化合物となり、溶融分離する耐火物でノズルなどを構成するという考え方がありうる。たとえば、ジルコニア・ライム・グラファイト質(以下、 ZrO_2 -CaO-C質)や、ポロンナイトライド・ジルコニア質といった耐火物がそれである。このうち、 ZrO_2 -CaO-C質の浸漬ノズルを

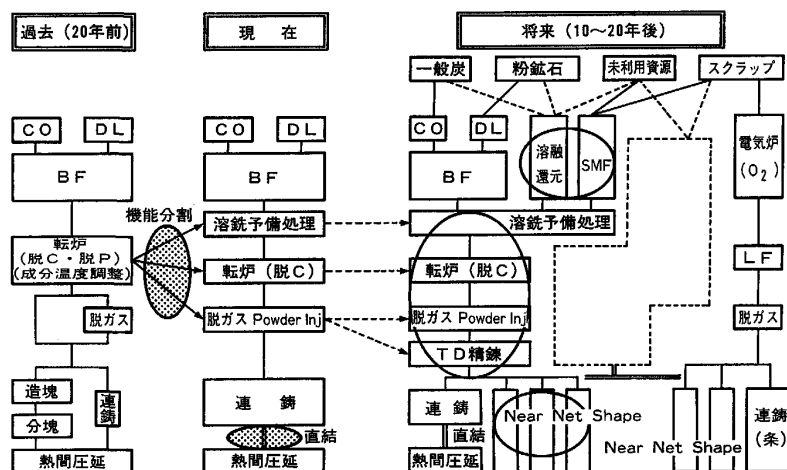


図 20 製鋼プロセスの変遷と将来構想の例

用いて閉塞現象を防止した例が写真1である。これは低炭素アルミキルド鋼を鑄造して比較した結果であるが、 $ZrO_2-CaO-C$ 質の場合は、約 400 分鑄造してもほとんど介在物の付着や詰まりが見られず、従来の Al_2O_3-C 質ノズルの場合と比較して大幅な改善が認められる。以上、耐火物と溶鋼・スラグとの反応に関する研究の必要性についてごく一部の例を概説したが、浸漬ノズルにとどまらずタンディッシュそのものや、ストッパー、スライディングゲートなど、注入系耐火物の全体に関する総合的な研究が今後とも必要であり、その成果として、品質上の格段の進歩が得られるものと期待している。

4. 今後の展望と耐火物技術への提言

図 20 は、過去 20 年前から、現在、将来にわたる製鋼プロセスを模式的に表したものである。現時点において将来の製鋼プロセスを具体的に推定することは極めて困難であるが、溶融還元法やニアネットシェイブ連鑄法（以下、新連鑄法）の開発が、現在、日本はいうに及ばず世界においても鋭意進められており、また、屑鉄の資源化を目的とした新製鋼技術の開発にも大きな期待がかけられている。こうした将来の展望をも視野に入れつつ今後の課題を考えてみると、まず第一に、当面する足元からの問題としての 3K（きつい、汚い、危険）対策に言及せざるを得ない。とくに、築炉を始めとする窯炉作業に従事する人々の職場環境は厳しく、これらの改善は喫緊の課題である。第二には、前述した新しいプロセスへの耐火物技術面からの対応である。以下にこの二点に絞って言及したい。

4.1 3K レス作業化と労働者の高齢化への対応

日本鉄鋼業全体として、現在、生産現場において中核となっている従業員は、全体の約 60% が 46 才から 60 才のいわゆる熟年層であり、これらの従業員の後を引き継ぐ 35 歳以下の若年層が約 10% と非常に少なくなっている¹⁰⁾。この現実を踏まえたうえで、将来とも若者

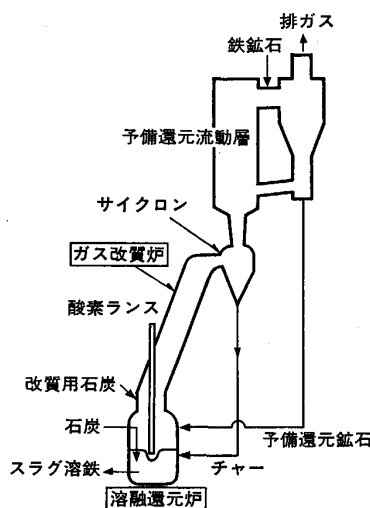


図 21 溶融還元法の概略図(鉄連 DIOS 法)¹¹⁾

達を引きつける魅力を維持し続けることが、我々に課せられた大きな課題である。なかでも前述したように、窯炉関係の作業はその性質上、作業環境の厳しい場面が多く、通常の間ゆる省力化とはまた違った観点からの合理化に向けた努力が要請される。したがって、一層の不定形化の推進、熱間補修作業の可能な限りの回避、遠隔自動化の推進はもとより、より抜本的に耐火物補修作業を変えてしまうような操業コンセプトの変革などを含めて、製鋼技術者、耐火物技術者の総力を挙げた共同作業が望まれる。さいわい、既に例示したようなタンディッシュ熱間回転や、溶鋼鍋の完全不定形ライニング化および、一部で試みられている出鋼孔の自動補修技術など、部分的にはその方向の取り組みが行われている。今後は、この動きを一層加速して 3K 追放に全力を傾注すべきである。

4.2 新プロセスへの対応

図 21 は溶融還元法の一例を示したものである。このプロセスの狙いは、石炭および銲石をコークス化および

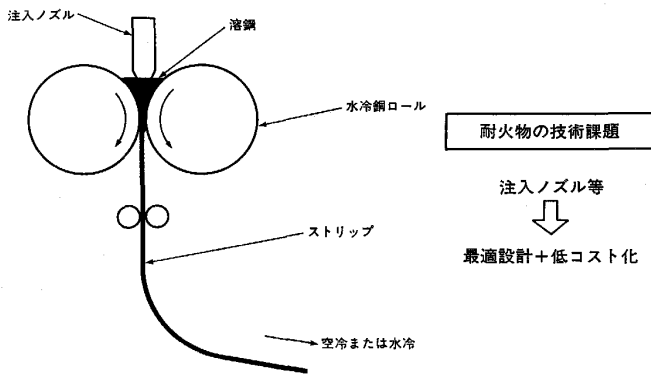


図 22 ニアネットシェイブ連鑄法の例 (双ロール法)

塊成化などの事前処理を行うことなく直接使用し、石炭粉を吹き込んで鉱石を還元することである。しかしながらこのプロセスでは、炉内で積極的に二次燃焼を行わせるために、耐火物にとっては甚だ過酷な条件になるということは避けられない。新連鑄法に関していえば、アメリカの NUCOR 社で実用化されている固定モールドによる薄スラブ連鑄法は、浸漬ノズル周辺のモールド間隔が約 170 mm 程度であることから、注湯系の耐火物は、現状の連鑄技術の延長で対応できるものと思われる。一方、図 22 に示す双ロール連鑄法については、先般、ステンレス鋼を対象として開発の成功が発表されたが、注入ノズルやサイド堰などの耐火物にはまだまだ課題が沢山残されているように思われる。また、湯面下凝固の典型例である水平連鑄法は、実用化されて以来、久しいが、それでもなおブレードの寿命をいかにして持続させるかという課題がいまなお残されている。

5. ま と め

製鋼技術者にとって耐火物の世界は、欠くことの出来ない技術分野であることは論を待たない。したがって、製鋼技術者は今後とも、いろいろな形で耐火物技術者との密接な交流を通じて地道に努力を積み重ねながら、あらゆる課題に対して適切な解を見出していくことが必要である。とくに、耐火物損耗機構や耐火物～溶鋼反応など基礎的な原理、原則の研究に基づいた技術の開発が最重要課題であると言えよう。

文 献

- 1) T. Shima: The 6th International Iron & Steel Congress, Vol. 3 Steelmaking I (1990), p. 3
- 2) T. Kohtani: IISI 21, Annual Meeting & Conference, Report of Proceedings (1987), p. 128
- 3) 甲斐 幹, 大河平和男, 平居正純, 村上昌三, 佐藤宣雄: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1946
- 4) 高橋稔彦, 今野信一, 佐藤 洋, 落合征雄, 野口義哉, 芹川修道, 俵矢与文: 製鉄研究 (1989) 322, p. 53
- 5) 副島利行, 斎藤 忠, 松尾勝良, 安井 強, 横山秀明, 藤本秀明: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1211
- 6) 江波戸紘一, 松尾勝良, 大手 彰, 大熊賢一: 鉄と鋼, **78** (1992), T133
- 7) 向井楠宏: 耐火物, **42** (1990) 11, p. 619
- 8) 向井楠宏, 岩崎 浩, 江口忠孝, 飯塚祥治, J. M. Toguri: 耐火物, **42** (1990) 12, p. 711
- 9) 内村光雄, 萩林成章, 山口紘一, 本間博行, 山口福吉: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 219
- 10) 山川 洋: 鉄鋼界 (1990) 8, p. 19
- 11) 金森 健: 鉄鋼界 (1991) 3, p. 52