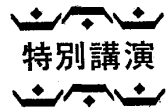


© 1986 ISIJ



製 鋼 と 攪 拌



加 藤 健*

Stirring in Steel Making Process

Takeshi KATO

本日は渡辺義介賞を受賞致しまして誠に光栄に存じております。皆様方に心から御礼申し上げます。

記念講演をとのことでございますが、私は研究部門を離れましてすでに 24 年、この間誠に雑多な仕事を続けて参りましたので、皆様方の前でお話し申し上げるような纏つたものがございません。結局私がかねてから関心を持ち続けておりました表題のようなことでお話しさせていただくことにしたさせていただきます。

1. はじめに

製鋼法は昔から種々変遷を重ねて参りましたが、その変遷の中で、量と時間という要素を考えながら、所定の成分・温度を効率的に得るために、常に「攪拌」ということが極めて重要な地位を占めてきたといえると思います。

製鋼法の変遷の中で、攪拌技術がどのように影響し、またどんな意義を持つてきたか、「攪拌」を中心にしてこの変遷を眺めてみたいと思います。

2. 製鋼法における攪拌の変遷

製鋼法の変遷をそのプロセスに用いられている「攪拌手段」と共にまとめて図 1 に示しました。

鉄を精錬して溶鋼を得る最初の製鋼法であるパドル炉でも、その名の示すように、攪拌が行われていました。脱炭が進み、溶鉄の融点が高くなると流動性が悪くなるので、脱炭と伝熱の促進のために、薪によつてパドリングする必要があつたわけです。この人力による攪拌は後の平炉や電炉でも、ガスによる攪拌が実用化されるまでは用いられておりました。

ベッセマー転炉が出現しますと、パドリングに代わつて底吹空気による強い攪拌が新しい精錬手段となり、強攪拌のため脱炭や温度上昇が容易となり、溶鋼を製造しやすくなりました。

その後製鋼法の主流となりました平炉では、溶鋼の過酸化防止と伝熱の促進から攪拌技術が再び重要となり、

パドル炉と同じような方法の他に、型鉄の投入や、石灰石によるいわゆるライムボイル等が新しい攪拌技術として加えられてきました。

酸素の大量生産方式が確立されると、酸素ガスの吹込技術—ベッセマライジング—が完成しまして、効果的な攪拌が行われ、平炉の操業は容易かつ効率的となつて生

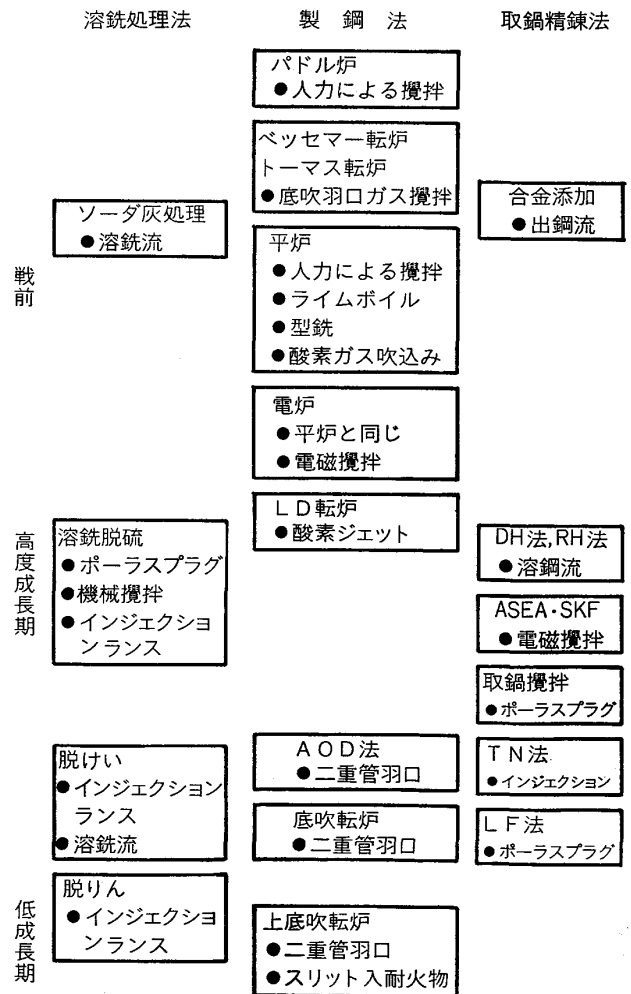


図 1 製鋼法，攪拌技術の変遷

昭和 61 年 4 月 本会講演大会における渡辺義介賞受賞記念特別講演
昭和 61 年 4 月 23 日 受付 (Received Apr. 23, 1986)

* 合同製鉄(株)代表取締役社長 (President, Godo Steel, Ltd., 2-3-24 Umeda Kita-ku Osaka 530)

表 1 60 t 平炉でのアームコ鉄溶製例

時 間	1°	2°	3°			
C	1.28	0.25	0.07	0.05	0.039	0.020
Mn	0.15	0.06	0.06	0.04	0.04	0.038
(%) P	0.020	0.010	0.010	—	—	—
S	0.027	0.019	0.019	0.016	0.016	0.015
ΣFeO						40.5
備 考	鉾石 3 t 鉾石 300kg 酸素吹込み 18'	石灰石 1 000kg スタンゲ 攪拌	型 鉄 300kg スタンゲ 攪拌	酸素吹込み 7'	Al 鉄 100kg 出鋼 酸素吹込み 7'15''	

鉄鋼便覧 (日本鉄鋼協会編) (1962), p. 369 [丸善]

産性が著しく向上しました。平炉でのアームコ鉄すなわちインゴットアイアンの製造では、脱炭が進んで鋼浴が不活性になりますと、上熱ばかりつくようになりますので、スタンゲによる攪拌、型鉄の投入、酸素の吹込み等、製鋼技術者が攪拌に苦労していたことが表1のような記録からも伺えます。

電炉でも平炉と同じような攪拌方法が採用されていましたが、大型電炉では酸化期後のスラグの排出や、それに続く還元精練を容易にするため、鋼浴の電磁攪拌装置が底に取り付けられる例もでてきました。この技術は後に二次精練法としての ASEA-SKF 法や、連続鋳造法の電磁攪拌技術へと発展されていきました。

LD 転炉が導入され、その操業が始まりますと、スロッピング現象の解明が急務となりました。酸素ジェットによる鋼浴の運動状況を、水モデルによってシミュレート実験を行った結果、一般の通念に反して、 L/L_0 を大きくすること、つまり鋼浴深さに対してジェットによる“へこみ”の深さを大きくすることによって、スロッピングが防げるといふ知見が得られました。

一方、溶銑配合率の高い転炉では、[P] が高くなりがちで、始めの頃は転炉用として、特に [P] の低目の溶銑が用意されましたが、転炉での脱りん挙動が精力的に研究されました。スロッピング防止と脱りんとは相反する関係にあり、両者をいかに満足させるかが製鋼技術者の関心事で、Hard blow とか Soft blow という概念が提出されました。実際の操業では、吹錬時期、製造鋼種、炉寿命などを考慮して、ランス高さを調整しました。

LD 転炉の大型化が研究され始めた時、大きくなつても1本のランスで攪拌が十分に行えるのかと疑問を持ちましたが、水モデルによるシミュレーションのディメンションアナリシスで、大丈夫とのことでした。「東京湾の真中にランス1本で吹き込んで、千葉も川崎も混ざるか」と冗談をいいましたが、大型化のためには大型の模型で検討した方がいいのじやないか、ということでプラスチックで大きな模型を作り、周辺の混ざり具合を見

るために、水中にチャイナマーブルを吊して色の変わり方を目で確かめるようなこともしました。

どうも周辺部の攪拌が物足りないように思いまして、小さな試験炉で、底部から不活性ガスをタンジェンシャルに吹き込んで攪拌を助長する実験も行いました。

一方で上吹酸素ランスに関して多孔ノズルの研究も始められ、その実用化が進められました。多孔ノズルを使用すると、Soft blow でも鋼浴はよく攪拌されるので、スロッピングは起こりにくく操業が非常に安定しました。そして多孔ノズルの使用によって、ランス1本でLD 転炉の大型化が容易となり、転炉製鋼法が飛躍的に発展しました。

転炉製鋼技術が日本で著しく発展した一因として、酸素ジェットによる鋼浴の流動状況のコントロールに早くから努力を傾注してきたことが挙げられると思います。

底からも不活性ガスを吹き込んで攪拌を助長する研究は、次の段階で更に大きな試験炉で行うことを計画していましたが、多孔ランスが旨くいつたこと、またこの試験炉では転炉の排ガス回収の研究を行うことになりましたので、この計画は中断されました。しかしその17~18年後に、LD 転炉ではやはり攪拌が不十分であると認められて、底からもガスを吹き込む研究が行われ、実用化されるに至つたわけです。

3. 上底吹転炉

高りん鉾石を使用する欧州では、トーマス転炉が広く用いられていましたが、酸素が広く使用されるようになると鋼の低窒素化のため、底吹空気の酸素富化を行ういわゆる改良トーマス法の研究が盛んに行われました。羽口保護のために Steam や CO_2 を併用するものですが、その延長として二重管羽口が開発され、純酸素と燃料を使用することによって羽口が保護されるので酸素の底吹きが可能となり、底吹酸素転炉が開発されました。

スロッピングなしに反応が静かに進行し、しかも (FeO) の生成が少ないという底吹酸素転炉の特長を説明するために、「攪拌」についての再検討が始まりました。底吹きで攪拌が強化されると、

(1) 低炭素域での Fe, Mn の酸化損失の減少。

(2) 鋼浴内成分・温度の不均一性の解消による制御性の向上。

というメリットが享受できることが明らかになり、「攪拌」の影響の定量化も試み始められました。その結果LD 転炉でも上吹酸素ジェットによる鋼浴の攪拌だけでは不十分であると認識されるようになりました。しかし底吹酸素転炉ではスラグのコントロールに難点がありますので、上吹き・底吹き双方の利点を活用する上底吹転炉の工業化技術の開発が、仏・英・日ではほぼ同時に精力的に進められ、その結果として今日では日本のLD 転炉の大部分が上底吹きに改造されるに至りました。

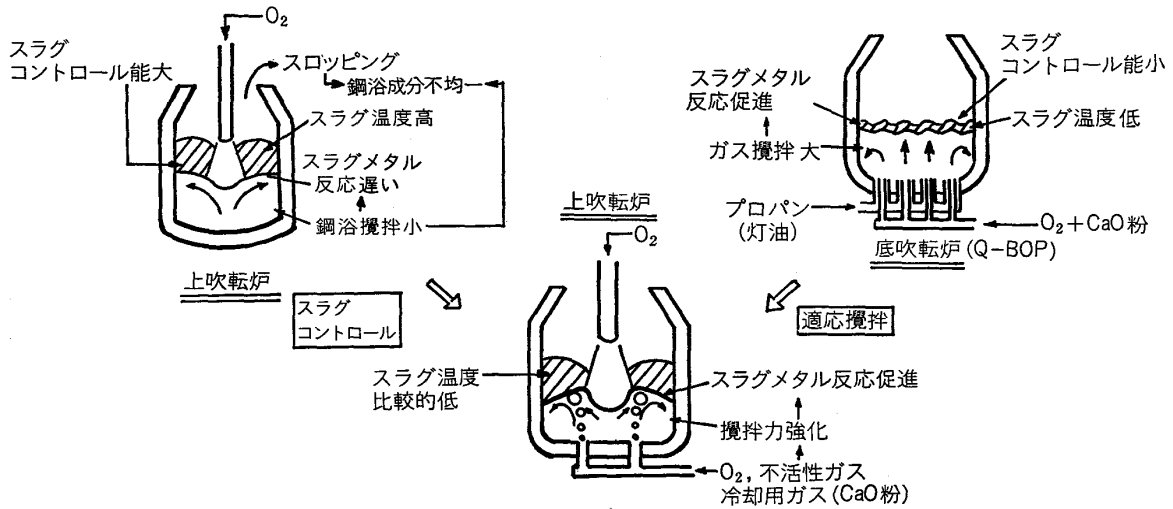


図 2 上底吹転炉の位置付け

半明正之：第 100・101 回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編）（1984），p. 203

た。（図 2）

底吹酸素転炉はドイツの Maxhütte で開発され、OBM と名付けられましたが、それが U. S. Steel に行つて Q-BOP となりました。10 年ほど前のことですが、Thyssen のある Engineer が、「OBM というのは何の略か知つているか。あれは Ober Bayerische Musik だ。」といつたことがありました。南ドイツの方だけで賑やかにやつているというような皮肉に聞こえましたが、その後 Thyssen も LD 転炉を底吹きに改造したようです。昭和 53 年頃 Maxhütte ではスクラップを大量に使用するために、OBM に上からも酸素と燃料のランスを使用する OBM-S（S はスクラップ）の試験をやつていましたが、その時 Thyssen でも LD 転炉を底吹きに改造したが、上吹きランスも残してあるという話を聞きました。

を聞きました。

上底吹転炉では底からの吹き込みガスの種類や量、（表 2）あるいは羽口の形式（図 3）更には CaO を共に吹き込むか否かなどで少しずつ異なつた多数のプロセスが実用化されています。

鋼浴中に吹き込まれるガスによる攪拌力の定量化に研究が向けられていますが、底吹きガスと鋼浴との反応を考慮しますと、ガスの種類によつて攪拌力は異なつてきます。O₂ や CO₂ を底吹きガスとして用いた場合、高炭素域では強攪拌力を示すのに対し、低炭素域（C < 0.10%）では攪拌力が急激に低下します。

攪拌力が強いと C の優先酸化（脱炭）が起こりやすく、逆に弱いと C の反応サイトへの供給がとどこおり、Fe の酸化を惹き起こすことになります。目標の（T. Fe）

表 2 複合吹錬プロセスの特徴

底吹きガス	底吹き法	特 徴		プロセス
		長 所	短 所	
不活性ガス (Ar, N ₂ , CO ₂)	ポーラスレンが または通気性レンが	<ul style="list-style-type: none"> 低設備費 低水素化容易 底吹中断可能 	<ul style="list-style-type: none"> Ar ガスコスト 溶鋼中窒素ピックアップ (特殊吹錬技術により) (窒素増加小) 	LBE
	パイプ	<ul style="list-style-type: none"> 低設備費 低水素化容易 	<ul style="list-style-type: none"> Ar ガスコスト 溶鋼中窒素ピックアップ 	LD-KG LD-AB LD-OTB LD-CB NK-CB
空気 (空気+N ₂)	二重管羽口 (CO ₂ 冷却)	<ul style="list-style-type: none"> 低設備費 溶鋼中水素ピックアップ 低ガスコスト 	<ul style="list-style-type: none"> 溶鋼中窒素ピックアップ 	BAP
CO ₂ ガス (CO ₂ +O ₂)	二重管羽口 (CO ₂ 冷却)	<ul style="list-style-type: none"> 転炉ガス再生 リサイクル 低水素化容易 	<ul style="list-style-type: none"> 吸熱反応 CO₂+C=2CO CO₂ ガスコスト 	STB
O ₂ (O ₂ +C _m H _n)	CaO 粉 吹込みなし	<ul style="list-style-type: none"> 発熱反応 O₂+2C=2CO CO 泡による 湯浴攪拌 	<ul style="list-style-type: none"> 溶鋼中水素ピックアップ 冷却ガスコスト 高設備費 	LD-HC LD-OB
	CaO 粉 底吹き	<ul style="list-style-type: none"> 同上 活性 CaO 粉 吹込み 	<ul style="list-style-type: none"> 溶鋼中水素ピックアップ 冷却ガスコスト CaO 粉製造コスト 高設備費 	KMS K-BOP

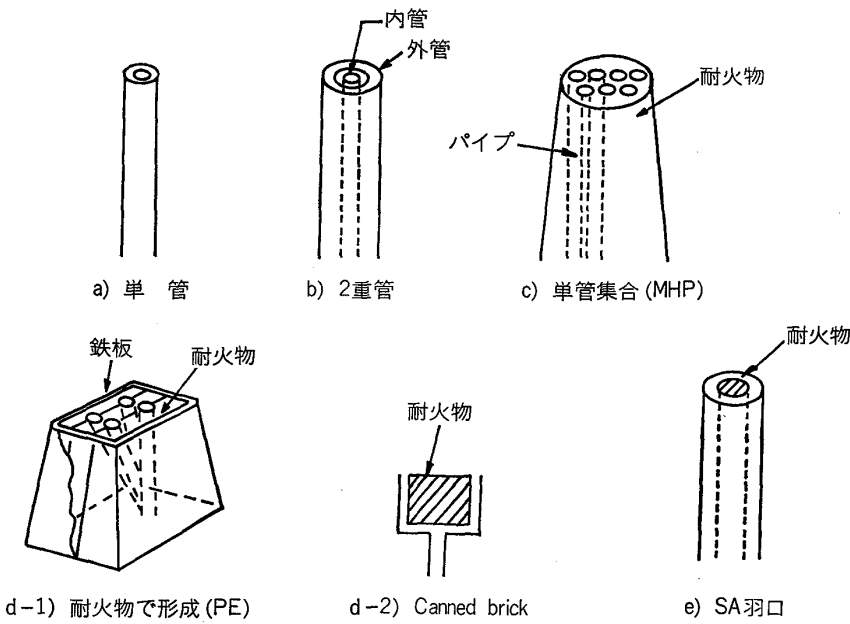


図 3 底吹きノズル概要

半明正之：第 100・101 回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編）（1984），p. 204

に抑制するように送酸速度や底吹きガス流量を決めることができるようなパラメーターも種々提案されております。

攪拌の強化によって、Cr や Mn の歩留向上、またはこれらの鉱石の還元も期待されまして、転炉に新しい機能が加わりつつあります。しかし転炉を石炭のガス化や鉱石の熔融還元といった新しい分野へ利用することを考えるとき、最適な攪拌条件やノズル設計の指針はこれから究めなければならない課題で、この分野でのいつそ

の発展を期待しております。

4. 溶銑の予備処理

今製鋼法では上底吹転炉への転換という一つの大きな流れの他に、もう一つの大きな流れがあります。それは機能分割精錬です。すなわち溶銑の予備処理—転炉での脱炭—取鋼精錬の組合せです。

LD 転炉が製鋼の主流になってきますと、転炉鋼の高級化が問題となりまして、転炉製鋼法を補完するものと

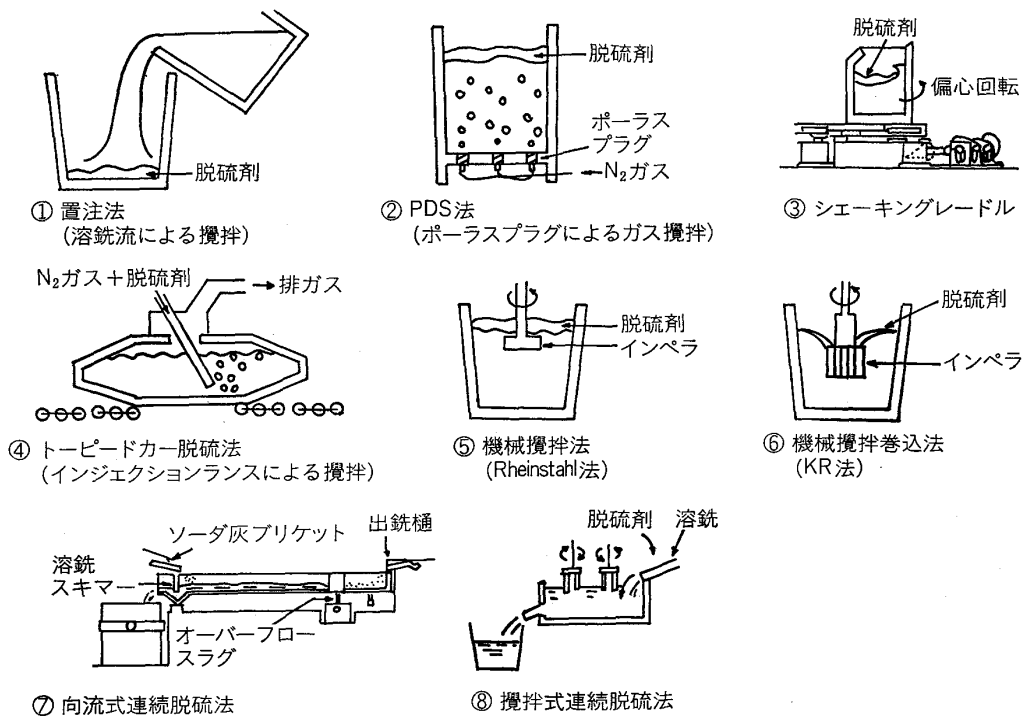


図 4 予備脱硫方法

講座現在の金属学製錬編 I（日本金属学会編）（1979），p. 222

して、溶銑の脱硫が種々研究され、実用化されますと共に、溶鋼の真空脱ガス法も広く適用されるようになりました。

溶銑の脱硫では、溶銑流を利用して攪拌していたソーダ灰処理に代わつて、溶銑温度が低いこともあつて、新しい攪拌手段が積極的に適用され、色々の脱硫法が実用化されてきましたが(図4)結局は取鍋の底に設置したポーラスプラグによるガス攪拌と脱硫剤を搬送ガスと共に吹き込むインジェクションによる攪拌が、耐火物の改良が進むにつれて広く普及されてきました。20年ほど前に欧州のある人が“Resonator”という考えを持ち込んできたこともありました。取鍋をライニングで、楕円形断面として、これを回転させると、ある回転数で共鳴を起こして、溶銑の波が起こり、これを傾斜させると上下方向の攪拌が起きてくるというのですが、実用化されたという話は聞いておりません。

分割精錬の普及、連続化による出鋼温度の上昇などによつて、脱りんの場合を予備処理に移す例も増えてきております。炉外脱りんの場合、まずPを酸化し、これを滓化する二段階が必要になります。すなわち O_2 あるいは酸化剤と脱りん剤の供給が必要になりますが、この場合も攪拌の適否が脱りん率の良否に影響を与えます。

脱けいもまた炉外で行われる傾向にあります。脱けいは一般に出銑樋で行われ、ミルスケール等の酸化剤を溶銑流上に投射ないし散布する例が多いのですが、この場合も、脱けいは溶銑と脱けい剤が混合落下する段差部のみで起こり、静浴のスラグ-メタル反応はほとんど進行しないことが認められております。

いずれにしても予備処理でも攪拌は最も重要な要素であるといえます。

5. 取鍋精錬

転炉鋼の高級化に伴つて真空脱ガスが広く適用されるようになりましたが、DHやRHでもLD転炉で用いたと同じような手法が溶鋼の流動状況の解析に用いられ、冶金的効果が定量化されると共にプロセスの効率化が計られてきました。

DHでは初め反応界面を重視して槽内の溶鋼表面積が大きくなるように設計されてきましたが、むしろ真空槽の上下運動を大きくして攪拌力を高める方がより有効であるとの考えに変わつてきました。RHでも溶鋼の還流量の増大が処理効果を向上させますので、浸漬管内径を大きくしたり、Ar吹込み量を増加させてCO反応速度を高め同じ処理時間でもより低炭のしかも均一な溶鋼が得られることが認められております。

今やDHやRHは転炉で特殊鋼を溶製するための必要なプロセスとして位置付けられております。

耐火物の改良が進みますと、溶銑脱硫で実用化された攪拌技術が取鍋精錬にも適用され、種々の取鍋精錬法が

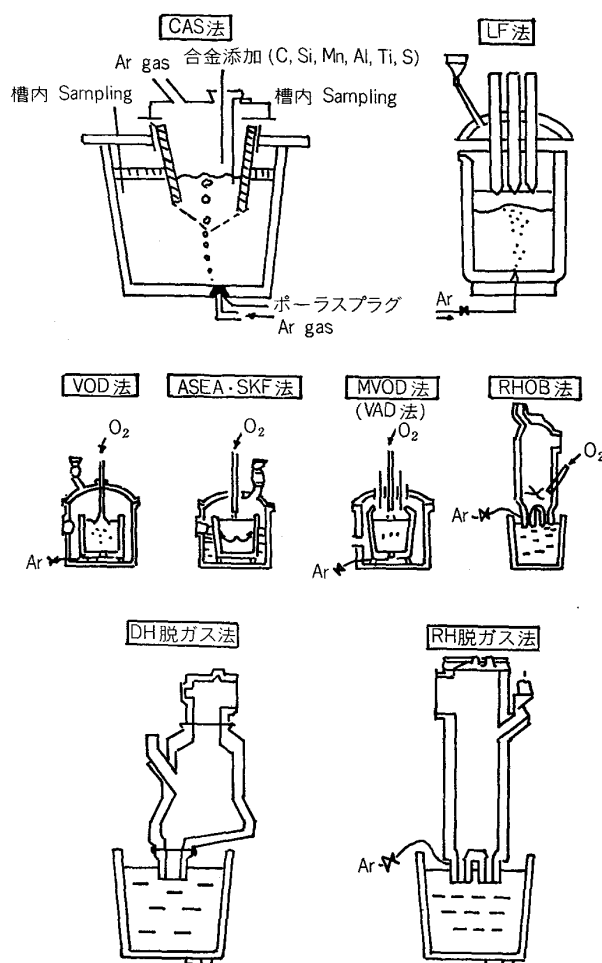


図5 各種取鍋精錬法

恵藤丈二：第27・28回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），p. 5
伊藤 孝：第72・73回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），p. 162

開発されてきて、転炉での特殊鋼の溶製がいつそう容易となりました。(図5)真空処理の他ガスバブリングや電磁攪拌も用いられており、単一手段のみでは不足の場合にはこれらを組み合わせて補完したり、更には O_2 の吹込みを行つて製鋼炉の機能の一部を分担させたもの、あるいはまた処理中の温度降下を補償する加熱装置を装着するとかいろいろの対策がとられています。

アルゴンバブリングによつて取鍋内溶鋼の成分の均一化や非金属介在物の浮上促進が行われますが、非金属介在物の減少を鋼中の全酸素量の減少として捉えますと、バブリング効果の大きいことが、データによつても示されています。昔は清浄な鋼を得るためには「鎮静」が必要であるとされていたのが、「攪拌」が必要であるということになり、脱酸の技術思想も異なつてきました。

連続鑄造が普及すると溶鋼の成分・温度を狭い範囲にコントロールする必要があり、取鍋精錬の重要性が増大し、ガス攪拌を中心として取鍋精錬法の改良が行われてきました。

ASEA-SKF法では電磁誘導によつて攪拌力を与えておりますが、Arバブリングを併用することによつて精

錬能力を高めることができ、また鋼中の H_2 も減少します。

取鍋精錬でも攪拌は基本要素となつています。

6. む す び

以上製鋼法の変遷と、その中での攪拌技術の変遷の概略を述べ、鋼の大量生産方式の確立や、高級鋼溶製方式の確立に対して、「攪拌」の進歩が重要な役割を演じていること、及び現在実用化されている製鋼プロセスは「攪拌」を考慮せずにその特徴を明確に表現することは難しいことを述べて参りました。

ここでは詳述しませんでした。次元解析を中心とした水モデルによるシミュレーション実験や、コンピューターを利用した数値解析など理論面での研究も「攪拌

手段」の実用化に貢献し、溶銑処理や取鍋精錬の実用化を促進しました。

しかし製鋼プロセスは対象とする温度が高いこと、比重が大きいこと、及びバッチ精錬をベースとしていることなどのため、理想的な攪拌手段は採用しにくいし、鋼浴の流動状況も間接的にしか把握できないという問題もあり精錬反応の予知や装置の設計も経験に頼っている所がまだ多いということもあります。

今後溶融還元も含めて新しい製鋼法が開発されることが期待されますが、今いつそう産・学力を合わせて、製鋼プロセスにおける流動状況の定量化を進め、「攪拌」を効率的に利用して世界をリードする新プロセスを發展させていきたいと思ひます。