

1. 緒言

近年の製鋼技術は、高炉・転炉法、アーク炉法いずれにおいても、炉外精錬が不可欠のプロセスとなっている。これは溶解・粗精錬工程の後に炉外精錬を導入することで生産性や品質の飛躍的な改善が可能になるためである。その結果、転炉は溶銑脱炭炉に、アーク炉はスクラップ溶解炉にそれぞれ機能を特化し、複雑な溶鋼精錬は炉外精錬へ移行した。

また高級特殊鋼、超合金などの溶解分野でも真空誘導溶解あるいは真空アーク再溶解が専らその製造プロセスとされてきた時代から溶解材の組成、要求品質に応じた最も経済的なプロセスの探求が盛んに試みられている時代へと移行しつつある。

本講座では、主として炉外精錬および2次溶解のプロセスを特殊製鋼法として取り上げ、その原理と機能、設備構成の特徴を学ぶ。

まず本章では特殊製鋼法の位置付け、および発展の経緯について概説する。

2. 主な特殊製鋼法の位置づけ

1次溶解プロセスには転炉（上底吹、LD）、アーク炉（EAFまたはAF）、誘導炉（IF）があり、さらに特殊な1次溶解炉としては真空誘導炉（VIF）等がある。

炉外精錬プロセスとしては取鍋脱ガス法、RH脱ガス法、DH脱ガス法、LF法、ASEA-SKF法、VAD法、主にステンレス鋼を精錬するVOD法、AOD法等のプロセスがある。また、高品位の高級鋼では再溶解炉であるESR法、VAR法等のプロセスが多く用いられており、プラズマアーク炉（PAF）、および電子ビーム炉（EBF）なども開発されている。

実際の製造工程では高度化する品質と生産性の要求に応えるべく、図1-1に示すような各種プロセスの組み合わせで採用されている。

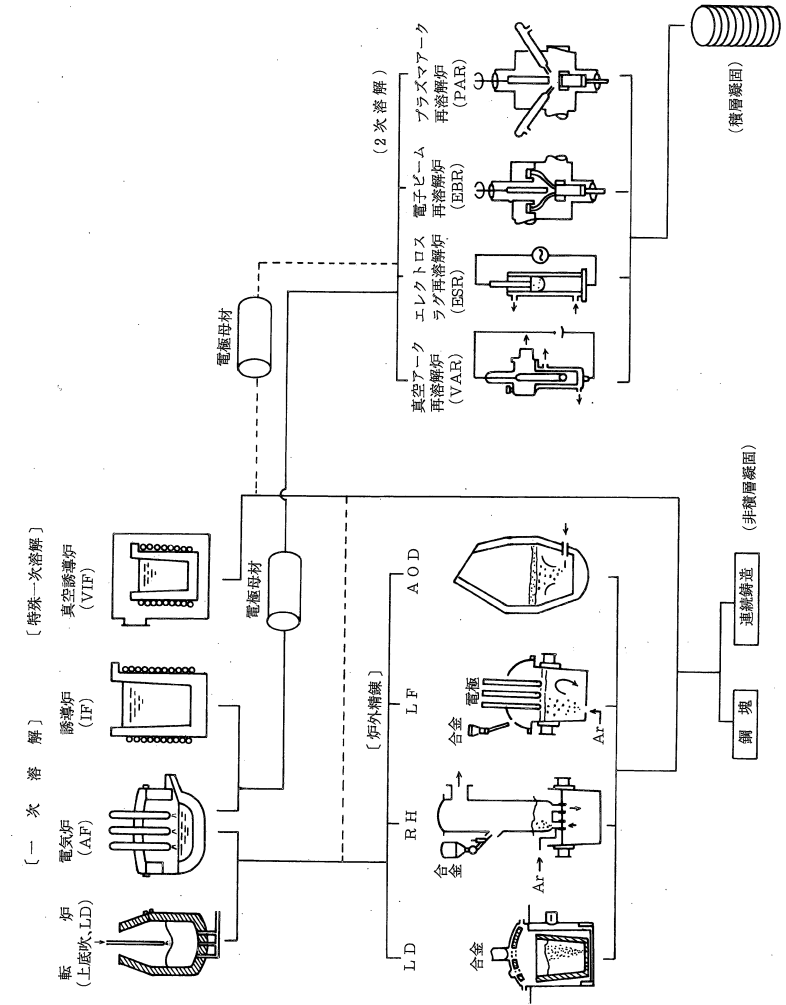


図1-1 各種溶解炉の位置付け

3. 炉外精錬法発展の経緯

炉外精錬は取鍋精錬、2次精錬とも呼ばれ、溶解プロセスでの粗精錬後に、以下の目的で採用される。

- (1) 酸素レベルの低減
- (2) 硫黄レベルの低減
- (3) ガスレベルの低減、または上昇の防止
- (4) 炭素レベルの低減（低C鋼、ステンレス鋼）
- (5) 正確な成分、温度の調整
- (6) 生産性の向上、溶解工程の負荷低減

表1-1に主なプロセスを示したが、これらの開発の歴史を簡単に紹介する。

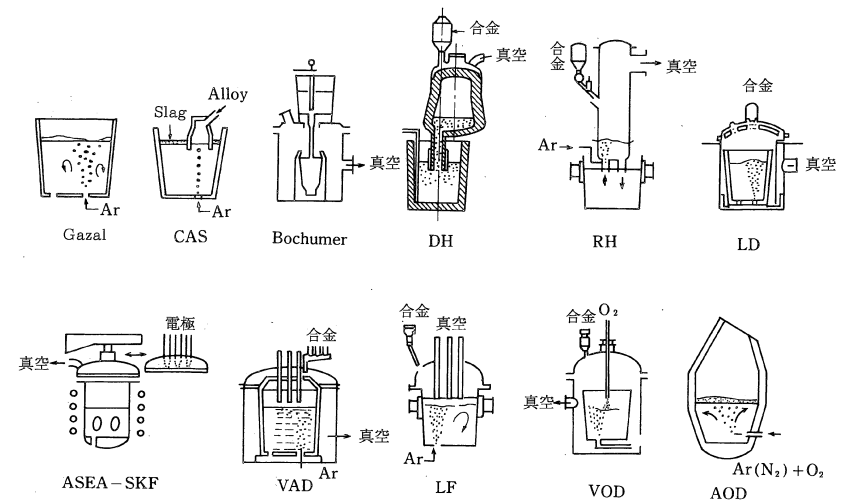
1950年頃に開発されたGazal法は最も簡単な炉外精錬法で、取鍋の底からArガスを吹き込み、溶解温度・成分の均一化や溶鋼の清浄度を改善する方法である。しかし、発明当時はArガスの入手が容易ではなかったため、本法が実用化されたのは1968年頃であった。

Gazal法はガスバブリング時に溶鋼表面を覆うスラグから溶鋼が露出して起きる空気酸化やスラグによる溶鋼の再酸化が避けられず、これを防止する方法としてCAS（Composition Adjustment by Sealed Argon bubbling、新日鐵）が開発された。これは、溶鋼に浸けた浸漬槽の内部にのみ溶鋼露出部が現れるようにし、無酸化雰囲気の下で合金を添加する方法である。ワイヤーフィーダー法は、La、Ce等の希土類元素や、Ca、Al等脱酸元素の歩留を高位に安定させることを目的とした方法で、最近ではC、Si、Mn等の一般元素の微量調整にも用いられている。

一方、溶鋼の真空処理が始まったのは、1950年の真空铸造法（独 Bochumer Verein社）からである。本法により溶鋼の脱水素（H）が可能となり、製品の白点欠陥が大幅に減少した。しかし、本法は溶鋼が真空にさらされる時間が極めて短く、脱水素（H）以外の脱酸素（O）や介在物の分離浮上、脱炭（C）といった精錬機能が期待できないため、以後は取鍋内の溶鋼を真空処理する試みが重ねられた。その結果、多段スチームエジェクター方式による大容量真空排気装置がドイツで開発されたのを契機にDH法（独 Dortmund Horder Huetten Union社）やRH法（独 Ruhrstahl社、独 Heraeus社）、LD法（Ladle Degassing、

表1-1 主な炉外精錬法の概要

プロセス分類	開発時期	代表プロセス	雰囲気	攪拌法	加熱法	精錬機能				
						脱[H]	脱[N]	脱[O]	脱[C]	脱[S]
取 鍋 バブリング	1950年頃	Gazal	大 気	ガ ス	—	×	×	○	×	×
	1975年	CAS	Ar	ガ ス	(Al昇熱)	×	×	○	×	△
インジェクション	1970年頃	ワイヤーフィーダー	大 気	ガ ス	—	×	×	○	×	○
真 空 処 理	1952年	Bochumer	真 空	—	—	◎	×	×	×	×
	1956年	DH	真 空	吸 上	—	◎	△	◎	○	×
	1957年	RH	真 空	環 流	(Al昇熱)	◎	△	◎	○	×
	1958年	LD	真 空	ガ ス	—	◎	△	◎	○	×
ア ー ク 加 熱 処 理	1964年	ASEA-SKF	真 空	電磁力	アーク	◎	△	◎	○	○
	1967年	VAD	真 空	ガ ス	アーク	◎	△	◎	○	○
	1971年	LF	Ar	ガ ス	アーク	×	×	◎	×	◎
		LFV	真 空	ガ ス	アーク	◎	△	◎	○	◎
ステンレス 脱 炭	1965年	VOD	減 圧	ガ ス	—	◎	◎	○	◎	○
	1968年	AOD	Ar	ガ ス	—	×	○	○	◎	◎



独 Mannesmann社、独 Witten社、米 A. Finkl & Sons社) が相次いで開発された。

炉外精錬実施時は処理中の温度降下を見込んで1次溶解炉(転炉、アーク炉など)の出鋼温度を高めていたが、特に小型炉や処理時間が長くなる高品質鋼の溶製では出鋼温度が極めて高くなり、1次溶鋼炉の操業に支障をきたしていた。この問題を解決するために、1960年代に入って加熱機能を有する炉外精錬法が開発された。ASEA-SKF法(スウェーデン ASEA社、同 SKF社)、VAD法(Vacuum Arc Degassing、米 Finkl-Moher社)、LF法(Ladle Furnace、大同特殊鋼)の3種類が普及している。

いずれの方法もアーク加熱を採用しているが攪拌方法が異なる。VAD法とLF法の攪拌方法はガスバブリングを採用しているのに対し、ASEA-SKF法は電磁誘導攪拌である。このため、同法で用いられる取鍋鉄皮の材質は、誘導加熱による発熱を防止するため非磁性鋼が採用される。

VAD法の特徴は真空中でのアーク加熱であるが、真空中でのグロー放電を避けるため40~65kPa(300~500torr)の状態で行う。

LF法は、溶解プロセスであるアーク炉とGazal法を組合せたプロセスで、スラグ精錬に優れた機能を発揮する。

4. ステンレス鋼炉外精錬法発展の経緯

ステンレス鋼が発明されたのは1910年代であり、1920年代にはアーク炉による工業生産が始まっている。ステンレス鋼製鋼技術の歴史は脱炭精錬の歴史であると言っても過言ではない。

ステンレス鋼は炭素(C)含有量を下げればより優れた耐食性が得られる。従ってステンレス鋼の精錬には溶鋼の低炭素化、すなわち脱炭精錬が不可欠である。ところが、多量のクロム(Cr)を含んだステンレス溶鋼の脱炭は高温で行わないと高価なクロムも同時に酸化してしまうという問題がある。アーク炉による生産が始まった当時は、鉄鉱石(Fe_xO_y)中の酸素による反応($Fe_xO_y + yC = yCO + xFe$)を用いて脱炭が行われていたが、この反応は吸熱反応であるため溶鋼を高温に維持することが難しく、クロムを含む溶鋼の脱炭は困難であった。そこで考えられたのが、最初にクロムを含まない材料をアーク炉で溶解し、この溶鋼を脱炭精錬した後に低炭素フェロクロム合金を添加する方法であった。

しかし、1950年代に酸素製鋼法が開発されると酸素ガスによる脱炭($C + O$

$= CO$)が可能になった。この反応は鉄鉱石の場合とは異なり発熱反応であるため、クロムを含んだ溶鋼でも脱炭精錬できるので、アーク炉へは初めから安価なステンレス屑や高炭素フェロクロム合金を装入し、溶解後の高炭素・高クロム溶鋼を酸素ガスで脱炭精錬する操業法が確立した。ところが、このアーク炉酸素製鋼法にも問題があった。それは脱炭反応時の激しい発熱により溶鋼温度が2000℃近い高温になるためアーク炉耐火物の損耗が著しいこと、加えて脱炭精錬中にある程度のクロム酸化が避けられないこと、精錬時間が長く生産性が上がらないことなどである。アーク炉によるステンレス製鋼法で経済的に溶製できる到達炭素レベルはせいぜい0.33%程度であり、ステンレス鋼材料開発の進歩に伴って高まりつつあった低炭素鋼のニーズには応えられなくなっていた。

このような問題点を解決するプロセスとして1960年代後半に登場したのがVOD法(Vacuum Oxygen Decarburization)およびAOD法(Argon Oxygen Decarburization)といった炉外精錬法である。これらプロセスは炉内CO分圧を真空あるいはArなどの希釈ガスにより十分に低く保持して脱炭反応を促進し、クロムの酸化を抑えつつ低炭素域までの脱炭を比較的低温で可能にした。従来は長時間を要したアーク炉内での精錬工程が炉外精錬に移行することで生産性が大幅に向上するばかりでなく、高価なフェロクロム合金を使用せずに極低炭素ステンレス鋼が製造できるなど数々の利点がもたらされた。

VODはドイツのEdelstahlwerk Witten社が1965年に開発した方法で、その操業はアーク炉などで溶解した溶鋼を取鍋に移し、真空容器内で10kPa(0.1atm)以下に減圧して鋼浴表面に酸素を吹きつけて脱炭を行う。減圧下ではクロムの酸化を抑えて炭素を優先的に酸化除去することが可能となり、炭素濃度が0.03%以下の極低炭素ステンレス鋼が容易に製造できる。

VOD法と同様な原理のプロセスにRH-OB法(RH-Oxygen Blowing)がある。これはRHの真空槽に酸素吹精設備を付加し、真空中で溶鋼に酸素を吹きつけて脱炭する方法である。

一方、AOD法は米 Union Carbide社が1968年に開発した方法である。その操業はアーク炉などで溶解した溶鋼を転炉に類似したAODベッセル(容器)内に移して行われる。脱炭用の酸素ガスは、ベッセルの側壁下部に埋め込まれている羽口(ガス吹込み口)から炉の中心に向かってアルゴン(Ar)、または窒素(N_2)ガスと共に吹き込まれ、脱炭反応が進行する。このとき生じたCOガス