

3. 製 鋼

3.1 製鋼技術この10年間の概観

3.1.1 概 論

この10年間、激変する経済状況、社会状況を鉄鋼が乗り越えるのに、製鋼技術の発展は大きな役割を果たしてきた。石油危機後、産業界全体にわたって省資源・省エネルギー対策が行われた。鋼材の最終需要については各種鋼材の品質高級化と多様化・軽量化が行われ、自動車向けや一般機械向けなどの最終鋼材の原単位が大幅に低下した(図3.1.1)。新しい鋼材需要としては、エネルギー開発関連の高級新材質の開発、自動車車体軽量化のための薄肉かつ高強度材の開発、発電・送配電時の電力損失をできるだけ少なくした高透磁率方向性電磁鋼板の開発および橋梁・構造物の大型化・高層化に対応する溶接性の良い高抗張力鋼や耐候性鋼の開発が進められてきた。さらには海洋構造物、氷海技術の急速な発展を支える新しい鋼材開発が活発となってきた。このような質・量両面にわたる急激な変化を乗り越えるために、製鋼技術分野では、多様化する鋼材需要に応えられる新しい高級鋼生産や多品種鋼種生産体制を開発し確立してきた。さらに製鋼工程全体にわたって歩留り向上と諸原単位低減のための技術開発を実施してきた。

製鋼技術の発展は粗鋼生産状況との関連で把握することができる。世界粗鋼生産高は年産約7±0.5億tであるが、1973年と1983年の生産高分布を比較すれば西側先進国は63.8%から50.6%に、発展途上国は4.7%から10.6%に、共産圏は31.5%から38.8%へと変化

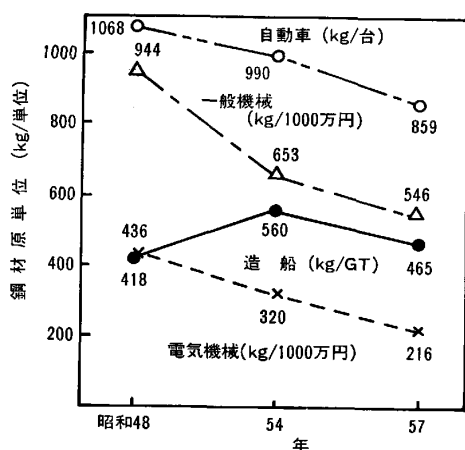


図 3.1.1 業種別の鋼材原単位の変化 (日本鉄鋼連盟)

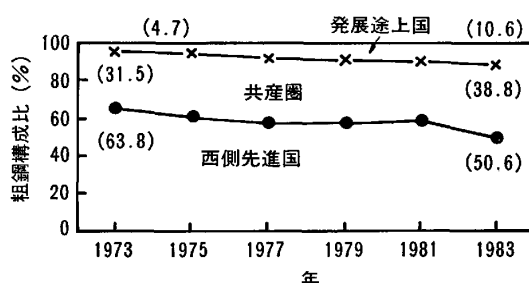


図 3.1.2 世界の粗鋼生産構成 (日本鉄鋼連盟)

してきた(図3.1.2)。この間、発展途上国や中進製鉄国†への我が国からの海外技術援助の支柱として、製鋼分野での多項目の技術輸出を実施した。複合転炉、電気炉および連続铸造技術などについてソフト・ハード両面にわたって海外技術指導・輸出を行った。

国内の粗鋼生産高は年産約1億tで、鉱石原料による粗鋼は10年前の8100万tから6500万tに減少し、屑鉄原料による粗鋼は3600万tから3200万tに減少している(図3.1.3-a)。両者の構成比率はほぼ7:3と変化しないが、生産炉別では転炉鋼比率は81%から72%へ9%低下している(図3.1.3-b)。この間、製鋼法は省資源・省エネルギー型に脱皮するために、転炉の複合吹錬、連铸比率の向上と熱間铸片活用、電気炉の諸原単位低減などを実施した。高級鋼材の多品種生産のために各種の取鋼精錬技術・装置を開発し、これらの工程と連続铸造工程が円滑に運用できる技術を完成した。現在は溶銑予備処理技術、熱間铸片の直接圧延、転炉冷材溶解能力向上、電気炉での屑鉄予熱などの新技術が開発されてきている。粗鋼トン当たりのエネルギー消費原単位は約18%低下し(図1.1.1)、全鋼材平均歩留りは84.3%から90.8%まで6.5ポイント上昇した(図3.1.4)。

(1) 製鋼の主原料

転炉における溶銑配合率は10年間で81%から91%へと10ポイント上昇した。溶銑の主成分についてはPは0.12%から0.10%へ、Siは0.6%から0.4%へ低下してきている(図3.3.20)。溶銑予備処理のうち脱硫処理は石灰粒をフラックスとして用いて吹き込みまたは攪拌を行う方法が完成し、最終鋼材の要求に従つ

† 中進製鉄国とはブラジル、韓国、台湾など10ヶ国で、1983年の粗鋼生産量は約9000万tで10年前に比べて約3000万tの増加となっている。

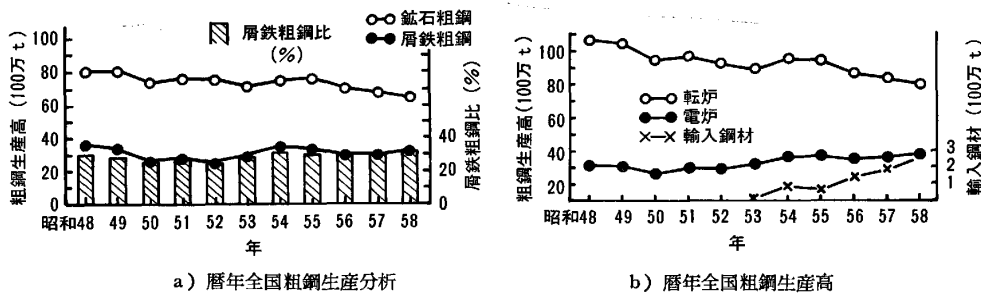


図 3.1.3 暦年の全国粗鋼生産分析および粗鋼生産高 (川上: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1357)

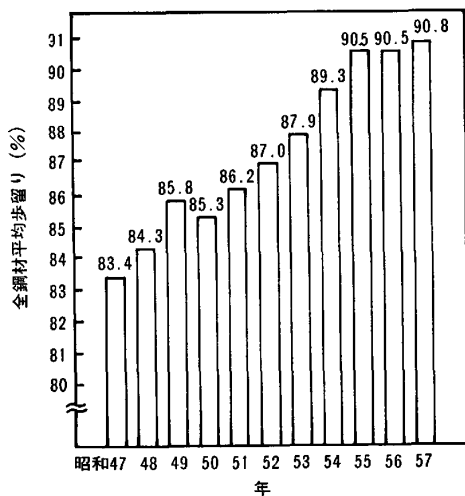


図 3.1.4 全鋼材平均歩留りの推移 (日本鉄鋼連盟)

てもつとも低い値で 10 ppm S 程度までの溶銑脱硫を量産処理することが可能となつた。

溶銑の脱りん処理はソーダ灰あるいは石灰粉末を吹き込み添加して行われる新しい技術で、我が国で開発されてきている。ソーダ灰使用の場合は大幅な同時脱りん脱硫が行われるが生成スラグの取扱いや炭酸ソーダの回収率の向上など解決すべき項目がある。しかしこれらの溶銑脱りん技術は研究段階での評価はほぼ完了して実用段階に入つてきている。新日鉄八幡 (ソーダ灰系と石灰系兼用)、君津 (石灰系)、鋼管福山 (おもに石灰系)、住金鹿島 (ソーダ灰系) など主要転炉工場の溶銑脱りん処理状況を表 3.1.1 に示す。

溶銑脱りん処理は製鋼コストの合理化と鋼質高級化の両面に活用される。脱りん溶銑を用いた転炉吹錬は脱炭反応を主体とするためスラグ造滓量も必要最少限で済み、マンガン鉍石を添加すれば鋼浴中にマンガンを分配させることができる。造滓剤の原単位の低減、スラグ中への鉄損失の低減、マンガン費の低減などにより溶鋼コストの低減に役立つとされているが、溶銑の熱含量が低下する。質的には低温用溶接鋼管材向け極低りん鋼を月

表 3.1.1 溶銑脱りん処理法の設備化 (第86回製鋼部会重点テーマまとめよりの抜粋, 昭和58年10月20日)

	住金		新日		鉄		鋼管		川鉄		神鋼	
	鹿島	八幡	室蘭	君津	大分	福山	千葉	神戸				
対象高炉(No.)	3	1		2,4	2	4	6	3				
脱珪	○	○	○	○	○	○	○	○				
床トービードカー	○	○	○	○	○	○	○	○				
脱りん	○	○	○	○	○	○	○	○				
専用炉												
実施年	57年	55	57	57	58	56	58	58				

産数万tオーダーで生産するなど、鋼質への低りん効果の見極めとともに多用されてきている。溶銑シリコン含有量の低減と各種の予備処理などにより、転炉装入時の溶銑の総熱含量が逐次低下してきている。現在の国内の主要転炉工場では自家発生屑は数パーセントであるため今のところ熱量不足という問題はないが、将来のため転炉熱補償技術が開発されつつある。

製鋼原料としての屑鉄の年間使用量は、転炉用約 500 万 t、電気炉用約 2 900 万 t 合計約 3 400 万 t である。10 年前に比べると転炉用が約 1 200 万 t 減少し、電気炉用は約 700 万 t 増加している。国内発生屑については、自家発生屑は転炉メーカーでは約 900 万 t、電気炉メーカーでは約 300 万 t であり、市中加工屑約 900 万 t、老廃屑約 1 500 万 t、その他と合わせて国内屑発生量は約 4 000 万 t となつている。10 年前に比べて転炉メーカー屑は約 500 万 t 減少し、老廃屑は約 500 万 t 増加している。屑鉄の輸入量は 1973 年の 540 万 t が最多で最近約 150 万 t となつている。全体の屑鉄バランスは転炉メーカーの放出を含めると若干余剰のようである。脱電力製鋼による屑鉄溶解技術は今後の技術開発の検討対象となろう。

(2) 複合転炉法

酸素上吹き転炉法は 1970 年代には我が国の全粗鋼生産量の 80% を占め、品質的にも深絞り用低窒素低炭素鋼の量産化確立などで量・質とも急激な発展を遂げた。

表 3.1.2 世界における複合転炉法とその特徴
(Ironmaking Steelmaking, 11 (1984) 3, p. 117)

プロセス	開発者	上吹き酸素		底吹き酸素		ガス 流量 Nm ³ min ⁻¹ t ⁻¹	石灰添加 塊(L)粉(P)			特徴
		比率 %	流量 Nm ³ min ⁻¹ t ⁻¹	比率 %	流量 Nm ³ min ⁻¹ t ⁻¹		上部	底吹き	その他添加	
(i) LD	Voest	100	3.0-3.5	0	...	...	L	...	...	BOF/BOPなど
LD-AC	ARBED-CRM	100	3.0-3.5	0	...	...	P	...	...	高りん鉄対象
(ii) LD-GTL	Lind-National Steel	100	3.0-3.5	0	...	Ar/N ₂ をO ₂ と上吹き	L	...	...	不活性ガスでO ₂ ジェットを希釈
AOB	Inland Steel-Union Carbide	100	3.0-3.5	0	...	Ar/O ₂ をO ₂ と上吹き	L	...	...	GTL法を低炭鋼に適用
(iii) LD-CL	日本鋼管	100	3.0-3.5	0	...	...	L	...	...	ランスを速度, 1~5 rpm 直径 1200 mm で旋回 ジェットの間欠的なバブル
LD-PJ	Italsider	100	1.5-(3.0-3.5) (間欠的)	0	...	...	L	...	...
(iv) LD-KG	川崎製鉄	100	3.0-3.5	0	...	Ar/N ₂ , 0.01-0.05	L	...	...	底吹き小径ノズルでAr/N ₂ を吹き込む 炉底からAr/N ₂ の吹き込み
LBE	ARBED-IRSID	100	4.0-4.5	0	...	Ar/N ₂ , 0-0.25 (通常0.17-0.25)	L	...	...	底吹き攪拌パターン変更
LD-OTB	神戸製鋼	100	3.3-3.5	0	...	Ar/N ₂ /CO ₂ , 0.04-0.10	L	...	...	multiple hole plug による 流量制御
NK-CB	日本鋼管	100	3.0-3.3	0	...	Ar/CO ₂ N ₂ , 0.04-0.10	L	...	...	Ar底吹き 炉底羽口からN ₂ 吹き込み終点近くではAr/CO ₂
LD-AB	新日鉄	100	3.5-4.0	0	...	Ar, 0.014-0.310	L	...	...	炉底から空気吹き込み, 窒素冷却
J&L system	Jones and Laughlin	100	3.3-3.5	0	...	Ar/N ₂ /CO ₂ , 0.045あるいは0.112	L	...	...
(v) BSC-	BSC	85-95	2.2-3.0	5-15	...	Ar 0.075-0.200 N ₂ 0.035-0.050 (空気にて)	L	...	...	OBM型羽口, 天然ガス冷却
BAP (Teesside Lab.)	LD-OB	80-90	2.5-3.0	10-20	0.3-0.8	天然ガスにて底吹き羽口冷却	L	...	...
LD-HC	Hainaut-Sambre-CRM	92-95	3.0-4.2	5-8	0.08-0.20	同上	L, P	...	...	初期のLD-AC工場でトライ, 石灰粉, 塊を上部より添加
STB及 ^o STB-P	住友金属	90-92	2.0-2.5	8-10	0.15-0.25	内部羽口O ₂ /CO ₂ , 外部羽口CO ₂ /N ₂ /Ar, 0.03-0.07	L, P	...	...	酸化性ガス吹き込み, STB-P では石灰粉末をホットスポット に上部添加
(vi) K-BOP	川崎製鉄	60-80	2.0-2.5	20-40	0.7-1.5	天然ガスにて底吹き羽口冷却	...	P	...	OBM型羽口より酸素と石灰粉 吹き込み 液体炭化水素にて羽口冷却
(vii) OBM	Maxhutte-US Steel	0	...	100	4.5-5.0	同上	...	P	...	
(viii) OBM-S	Maxhutte-Klockner	20-40	...	60-80	...	同上	...	P	...	サイド羽口よりO ₂ 上吹き, ときにはガス/油を用い屑鉄予熱, O ₂ 5 Nm ³ /t 追加により屑鉄 60kg/t 増加
(ix) KMS-KS	Klockner-Maxhutte	0	...	100	4.5-5.0	同上	...	P	...	① 当初は天然ガスの代わりに油使用, 後OBMに変更 ② 無煙炭をO ₂ と一緒に底吹き ① 二次酸素供給 ② 二次酸素+10kg無煙炭 添加吹練時間延長, O ₂ 増量, 無煙炭上部吹き込み
Hoogovens-BSC	Hoogovens-BSC	100	3.33	...	...	N ₂ /Ar, 0.04-0.10	L	...	...	① 100%屑鉄のときKSと称する ① 屑鉄溶解量増加(10~20%) ② 50~55 kg/tのコークス添加と40~45 Nm ³ の追加酸素により屑鉄は18~20%増加 ① 環境ノズルで3~5 kg/t ② 鉄ケース耐火物で30 kg/t屑鉄増加
ALCI	ARBED	100	4.0-4.5	0	...	Ar/N ₂ , 0-0.25 (通常0.17-0.25)	L	...	...	LBE法にダブルフローランスを用い, 50 kg/t屑鉄増加, 後に上部よりカーボン吹き込みにより屑鉄7 kg/kgC増加

この10年間では転炉法による生産量は特殊鋼が年産約250万t増加したものの, 普通鋼が年産9000万tから6000万tへと約3000万t低減し構成比率は約72%となった。

この間技術的には複合吹錬化が急速に進んだ。1977年, 川鉄は米国US Steel社から底吹き転炉法を導入して230t Q-BOP炉を建設した。一方上吹き転炉の炉底からガスなどを吹き込むことによつて浴の攪拌・炉内反応を促進させる複合吹錬化の開発は1970年代の後半に我が国の主要転炉工場において急速に推進された。

国内における複合吹錬法の基本的な設備化は1978年から1982年の間にほぼ完了した。1970年代の後半に住金と新日鉄はそれぞれ別個の立場からBOF法に底吹き攪拌を付与することの重要性に着目し, 1978年住金は少量のガス底吹き法(STB法)を, 新日鉄は酸素の一部を底吹きする方法(LD-OB法)と少量のガスを底吹きする方法(LD-AB法)を設備化した。1979年には神鋼(LD-OTB法)および川鉄(LD-KG法)も少量のガス底吹き法を採用した。1980年に川鉄ではQ-BOPを上底吹き化し, 底吹き羽口から石灰粉末を添加した

(K-BOP). 1981年, 鋼管は底吹きガス量の流量を極く微量まで幅広く制御するため MHP (Multiple-Hole Plug) ノズルを開発した (NK-CB). 1982年, 新日鉄はフランスより LBE 法を導入して君津と室蘭に設置した. さらに, 新日鉄では LD-CB 法が開発された. 火点移動による滓化強化を目的として鋼管においては巡回ランス法が設置された (1980年). 我が国における複合吹錬法の目的はおもに炉内反応の効率向上にあり, スラッグメタル反応の促進や脱炭反応の遷移炭素量 C_{tr} が容易に下げられスラッグへの鉄損失が低減することなどが利点となる. 米国・欧州においては転炉法に対しては屑鉄溶解能力向上が最大の課題であり, 複合吹錬もそのための技術開発に組み込まれ, 熱補償技術との組み合わせで開発されてきた. 我が国と世界の複合吹錬法の開発の経過とそれらの特色をまとめて表 3-1-2 に示す.

(3) 電気炉法

電気炉製鋼法に関する論文発表は多くはないが, その技術開発の経過には目ざましいものがある. 設備技術的には炉客の大型化, UHP 炉の普及, 水冷パネルおよび屑鉄予熱の採用により屑鉄溶解能力を高め炉の稼働率を高めた. 操業技術の向上にともなつて電力原単位は大型炉平均で約 430 kWh/t と低下し (図 3-3-27), 耐火物原単位・電極原単位とも大幅に低減してきている (図 3-3-25). 高級品質を溶製する場合には良質屑を用いて取鍋精錬法との併用によつて高級高純度鋼の溶製が容易となつた. 反面, UHP 電源によるフリッカー現象や騒音発生に対する対策が必要となり, 今後の技術として直流黒鉛電極アーク炉, 直流あるいは交流プラズマ・アーク炉が欧州で開発されてきている.

1983年の世界主要国の国別の粗高生産高に占める電気炉鋼構成比は, 日本が 28.4% (1972年に比べて 9.8ポイント増加), 米国 31.5% (13.7増), 欧州共同体全体 26.0% (11.8増), ソ連 11.2% (1.4%増) などとなつている. 過去2年間の年産量としては, 日本が米国を抜いて一位となつている. 米国では, 従来の集約製鉄所方式とは別に, midi-, mini-mill 方式による製鋼法が活発となつてきている. 安価な電力費, 地域的な屑鉄と鉄鋼の需給などわが国とは異なつた背景があろうが, 技術的には被覆電極, 出鋼口バルブ, デマンド調整改善など開発意欲は大きい. 薄板帯鋼製造技術の開発も課題とされている.

(4) 取鍋精錬

鋼材品質要求の高度化に応えるためと, 転炉から連铸鋼片にいたる工程改善をはかる目的で, 各種の取鍋精錬法が開発された. 各種の取鍋精錬の開発と新製品開発・品質高度化とはたがいに表裏一体となつて発展してきた

が, 取鍋精錬の変遷ととくに我が国における開発の経過を図 3-1-5 に示す. これらの機能を分類して以下に示す:

- ①減圧・真空処理下での脱ガス・脱炭の促進
- ②同上合金鉄・脱酸剤の歩留向上と成分微細調整
- ③同上クロム合金鋼の極低炭脱炭処理
- ④アーク加熱による熱補償と還元雰囲気処理
- ⑤脱りん, 脱硫, 脱酸反応の促進による高純度鋼精錬

このように取鍋精錬の設備と技術が急速に確立されてきた背景としては, 品質要求特性値の高度化, 製造工程の変革と進歩, および製鋼工程の改善などが挙げられる (表 3-1-3).

このような取鍋精錬技術の開発は分析技術の努力に支えられており, 微量分析としては低圧スパーク放電発光分析により迅速分析が行われているが, 極微量成分領域ではオフライン分析が行われている. 今後鋼成分の狭幅適中率を向上するため "in situ" での Al などの連続分析法の開発が期待されている.

(5) 連铸比率向上

連铸製造技術が我が国の製鋼法全体の中に占める役割は 1970年に急速に増大した. 1970年に鋼管福山と新日鉄君津で大型転炉とスラブ連铸機との組み合わせによる高能率操業法が実現し, 1977年に新日鉄大分に全連铸方式の製鋼工場が出現することによつて連铸比率の拡大が決定的となつた.

連铸比率拡大のために連铸設備技術の開発と操業技術の開発に多くの努力がはらわれてきている. おもな設備開発項目にはつぎの例が挙げられる; ①高稼働率の達成すなわちノズル自動交換, 自動幅替え, スプレーノズル自動チェック, ロールユニット自動交換, ②高速連铸技術すなわち分割ロール, 矯正帯圧縮ロール, ③铸片品質高度化すなわち垂直曲げによる介在物低減, 電磁攪拌による偏析低減などで, このほかにモールド内レベル計の開発は操業安定と铸片の表面品質向上に効果的で, 渦流方式などが多用されている. 操業技術の主要開発項目としては, ①シールド铸造, ②多連铸技術, ③ミストスプレー, ④低温铸造などにより铸片の表面性状・内質の向上と安定化を実施してきた.

これらの結果, 熱間で铸片を直接熱延加熱炉へ搬送することが可能となり, 铸片の温間加熱 (HCR) とさらには熱間直接圧延 (HDR) が可能となり, 製鋼と圧延の直結化が進んでいる. 連铸適応鋼種については, 従来鋼種・新鋼種ともほぼ 100% 铸造可能である. 連铸化困難なものはリム層を要求される棒鋼品種と極厚大単重鋼板材など少数であり, 後者については水平造塊による一方方向凝固大型鋼塊によつて解決されてきている.

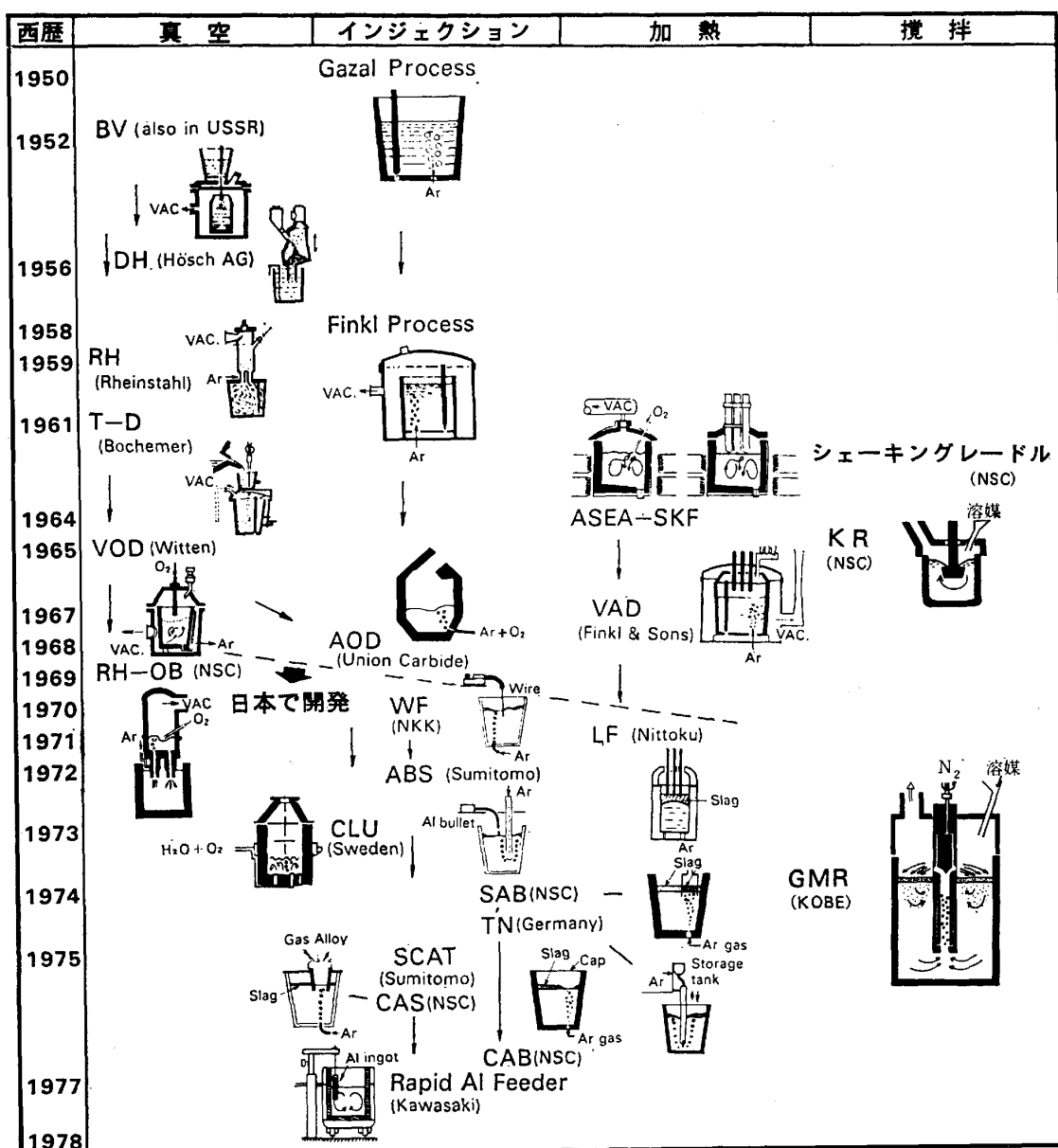


図 3-1-5 取鋼精練および溶銑予備処理用装置の発達
(省部：第 90・91 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1983), p. 36)

表 3-1-3 鋼の清浄化の動機
(大内：第90・91回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1983), p. 96)

動 機	事 例	不純物清浄化
1. 要求特性値の高度化	高張力ラインパイプ用鋼 耐ラメラティア鋼 Cr-Mo鋼, 低温用鋼	C, S, N S P, S
2. 鉄鋼製造工程, 技術の変革と進歩	連続焼鈍プロセス 加工熱処理技術	C, N C, S
3. 製鋼工程の改善	連続铸造での表面きず抑制 省エネルギープロセスでの 铸片の無手入れ化	S, N, O
	UTS欠陥の絶無	S, N, O H, S, O

連铸铸片の対粗鋼生産比率の推移を図 3-1-6 に示す。1982 年の IISI 加盟国の連铸比率は 58.9% で、国別に

は日本は 86.3% (量は 8381 万 t), 西ドイツ 71.8% などで米国は 31.3%, ソ連は 12.1% と低い。我が国の連铸法の競争力はこの面ではすでに行きつくしたことになる。

(6) 新しい製鋼技術

生産手法の主流には取り上げられていないが、いくつかの研究・開発が行われている。転炉で熱補償を行う技術は、転炉での合金鋼溶製、屑鉄溶解比増加、鉄浴式溶融還元法などの将来技術への可能性を含めて研究が進められている。ビレット連铸法では合金鋼や丸ビレットも対象として水平連铸法、普通鋼に対して回転铸造法が開発されてきている。一時丸ビレット用の堅型回転連铸法が行われたが現在は行われていない。

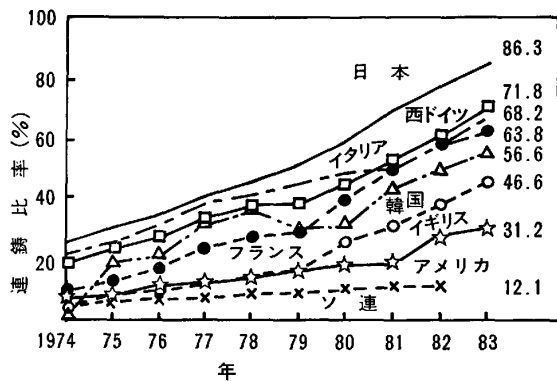


図 3-1-6 主要国連铸比率の動き (日本鉄鋼連盟)

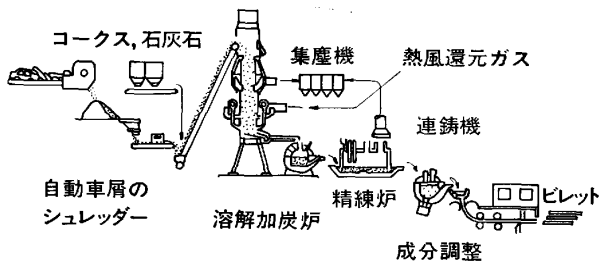


図 3-1-7 ミニミル製鋼用の連続製鋼プロセス (吉松: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1694)

連続製鋼法の開発が金材技研と新技術開発事業団によつて進められた (図 3-1-7)。この方法は電気炉法と比較して設備費で約 20% 低く、製造原価で約 10% の低減が見込まれるとされている。ポスト連铸と工程省略の主役として薄铸片の铸造技術の開発が期待されている。かつてヘイズレー法を鋼の铸造に適用しようとする試みが行われたが、アルミニウムの铸造においてはこのほかにツインロール方式やブロックキャスター方式も用いられており、今後の開発の対象として検討されよう。米国では連邦政府エネルギー省の提案により、铸片厚み 20~50mm のストリップキャスターの開発と基礎研究が精力的に開始されようとしている。

(7) 研究活動

鉄鋼協会共同研究会の製鋼部会、特殊鋼部会、電気炉部会は操業技術、設備技術、生産技術に基礎も含めての研究と討論に重要な役割を果たしてきている。鉄鋼基礎共同研究会では凝固部会 (昭和 47~51 年) は連铸铸片の中心偏析・表面疵など凝固現象の基礎研究と研究者の育成に成果を挙げ、特殊精錬部会 (昭和 49~54 年) は ESR など再溶解現象の物理化学を研究した。介在物の形態制御部会 (昭和 54 年~) は硫化物形態制御などの基礎研究を行い、融体精錬反応部会 (昭和 55 年~) は製鋼反応と流動現象の基礎研究として活発な活動が進められ、連続铸造における力学的挙動部会 (昭和 55 年~)

は表面割れや内部割れなど連铸铸片の高温挙動の基礎研究として活動を進めている。新たに昭和 59 年より鉄鋼の急速凝固部会が発足して薄铸片や粉末の急冷凝固現象を対象とし、また高純度鋼部会は材質主体ではあるが高純度鋼を対象として基礎研究に取り組むことになった。昭和 52 年に発足した特定基礎研究会スラグの有効利用に関する基礎研究部会では、省資源、省エネルギーという社会の要請に応じて、転炉スラグの利用全般に関して幅広い基礎研究が行われた。鉄鋼協会主催の国際会議としては真空冶金国際会議が第 4 回 (昭和 48 年) と第 7 回 (57 年) に東京で開催され、内外とも多数の論文と参加者により大きな成果を挙げた。二国間シンポジウムは製鋼関係では、おもにソ連、西ドイツ、中国、スウェーデンとの間で開かれ両国間の製鋼の科学と技術の交流に役立っている。講演大会においては最近では毎回 170~200 件にのぼる発表論文が 60~75 名の座長の司会によつて発表され、450~700 名にのぼる聴講参加者と活発な質疑・討論が行われている。講演大会での海外技術者や海外からの留学生の発表も増加してきている。

昭和 58 年、鉄鋼協会研究委員会は調査研究小委員会を発足させ、協会の今後の研究活動のあり方について製鋼ケーススタディを実施した。小委員会は“製鋼の将来技術”をとりまとめ、その後協会活動に新項目 Materials Processing 部門を新設すべきことを答申提案した。

学振 19 委は製鋼反応と凝固現象について基礎研究の研鑽を行い、製鋼反応の推奨平衡値をとりまとめた。学振 140 委は冶金物質の高温物性の研究を推進した。

海外との技術論文の交流も盛んになり、AIME をはじめ海外学会、国際会議での我が国からの論文発表も数多く行われ評価も高い。最近では海外からの我が国製鋼技術についての来訪調査も頻繁となつてきている。

(8) これからの発展

製鋼に関する我が国独自の基礎科学はこの 10 年間に目ざましく発展した。複合転炉や取鍋精錬法との関連における流動・攪拌と熱力学・反応速度の研究、溶銑脱りんをきつかけとする脱りんと脱硫の酸素ポテンシャルの研究、取鍋精錬にかかわるスラグ-メタル反応の限界の追及、一方向凝固鋼塊にかかわる V 偏析・逆 V 偏析の生成機構の解明と防止対策の実現化、電磁攪拌による凝固制御と現象の計測と解析などは我が国において著しく研究が進んだ分野といえよう。

前述のように、世界的な傾向として鉄鋼生産手法が中進製鉄国グループや発展途上国グループに“拡散”することは避けられない現実と考えられる。これからの我が国の製鋼技術は製銑や圧延などの上流技術と下流技術を含めた全生産工程の中で①省工程化、②高級化・高付加

価値化，③鉄の新機能素材化をはかつてゆくことが必須であろう。

このような製鋼技術開発やニュープロセスの実現化には，①上記例のようにこれまでに蓄積した基礎科学の知識と新しいシーズにもとづいた基礎研究の実施，②要素技術としてのインジェクション，粉末添加，スラグ分離，成分微調整，各種熱補償，流動凝固，急速凝固などを組み合わせて活用してオリジナリティのある新技術を開発し，③さらに主要工程に組み込むために連続化，大型化などによる高効率化を実施することにより達成されることになる。

3.1.2 精錬技術

(1) 精錬技術全体の歩み

鉄鋼材料に対する要求は多様化の一途をたどっており，一般鋼材のいつそうのコストダウンと特殊用途品に対する高純度化の並行的進行が特徴的である。この要求に対し，精錬工程も従来の主として転炉のみによる方法では対処しきれず，溶銑段階での予備処理や転炉出鋼後の溶鋼処理を組み合わせ，多様化してきたことは必然の成り行きである。この間，新技術開発の重点は各製鉄所の条件に合わせて，いかなるプロセスに着目し，開発して既存のプロセスと組み合わせていくかという点にあつた。省資源，省エネルギーを含め，一般鋼材の合理化の分野では溶銑脱珪による溶銑成分の適正化，底吹転炉法の採用やそれに触発された複合吹錬法による転炉精錬の合理化，RHを活用する合金歩留りの改善や簡易昇温法の開発が目され，高純度鋼の溶製法の分野では溶銑脱りん法のオンライン化やパウダーインジェクション，RH，AOD等の炉外精錬法の一般化が特徴的である。こうした技術はいずれも攪拌力のコントロールと結びついており，攪拌動力と均一混合の関係等，化学工学的手法が鉄鋼精錬に大きく取り入れられる契機ともなつた。熱力学的分野では脱硫，脱りんキャバンチーと酸素ポテンシャルに関する理解が深まり，酸素センサーを用いての精錬適正化がなされたり，塩基性フラックスとしての Na_2O 系の性質の解明が進んで，従来ほぼ CaO 系一辺倒であつた製鋼スラグの選択の幅が広がつたことなどが特筆すべき点である。

現在，日本の鉄鋼業は昭和40年代の量的拡大という生産性向上技術に重点があつた時代から，低生産量下での多品種化，品質における高級化と製造における合理化という，従来の応用研究活動に加えて，より積極的な基礎研究までを含めた総合的な研究開発が要求される時代にはいつているといえ，また開発される技術も常にローカル条件に合わせた厳しい選択にさらされるようになって

表 3.1.4 鉄鋼業における精錬プロセス

分類	プロセス	主要副原料	昇温方法	精 錬 対 象									
				C	Si	P	S	O	H	N	Cr		
溶銑予備処理	溶銑種	FeO			◎								
	混銑車	FeO, O ₂			◎		○						
		CaO, FeO				◎	◎					◎	
		Na ₂ CO ₃				◎	◎						
	溶銑鍋	CaC ₂					◎						
		CaO, C					◎	○					
CaO, FeO						◎	◎						
転炉精錬	底吹転炉	CaO	電力			◎	◎						
	上吹転炉	CaO, O ₂	成分酸化	◎	○	○					○		
	複合転炉	CaO, O ₂	成分酸化	◎	○	○					○		
	複合転炉	CaO, O ₂	成分酸化	◎	○	○					○		
溶鋼処理	電気炉	CaO				◎	◎						
	複合転炉	Na ₂ CO ₃		◎		◎							
	パウダーインジェクション	CaO					◎	◎					
	Ca-Si						◎	○					
	DH				◎				○	◎			
	RH				◎					○	◎		
	RH-OB	Al, O ₂	Al酸化									◎	
	LF	CaO	電力				◎	◎	◎				
	Na ₂ O					◎							
AOD	CaO			◎			◎	○			◎		
VOD	CaO			◎			◎	○		○	◎		
VAD	CaO	電力		◎		◎	◎	◎					

てきた。表 3.1.4 には最近の鉄鋼業における多様な精錬プロセスの一覧を示す。

(2) 脱炭

溶銑中の炭素については転炉での主要な熱源ということもあり，溶銑処理段階では極力脱炭しないことが望ましい。ただし溶銑脱りん等の都合上，酸素ポテンシャルを高める必要のあることもあり，また脱りん時の熱源の一部として少量の脱炭を伴うこともある。転炉は酸素供給能力，集塵能力等から高速大量処理向きに設計されており，極めて高効率な脱炭反応容器である。しかも反応ガスとしての CO ガスのエネルギー回収機能も備えており，他の精錬プロセスよりも圧倒的に優れている。高純度化という点では，従来の上吹転炉は鋼浴攪拌力を上吹酸素ガスジェットと発生 CO ガスのみ依存していたため， CO ガス発生量の低下する低炭素域では攪拌力が不足し，鉄分の酸化が増加するという欠点があつて，実用上 $\underline{\text{C}}=0.03\%$ が限度であつた。底吹転炉では，強力な攪拌力のため鉄分の酸化損失は圧倒的に少なく，脱炭限界は $\underline{\text{C}}=0.01\%$ である。複合吹錬法でも上吹酸素ガス量の数%程度で，底吹転炉と大差ない精錬特性を持ち $\underline{\text{C}}<0.02\%$ も可能である。底吹きに Ar ガスを用いれば後述のAOD炉と同じ原理になり， $\underline{\text{C}}\leq 0.01\%$ も可能である。出鋼後の溶鋼処理ではRHやDH等の真空処理に付随する脱炭のほか，高真空や Ar ガス使用による発生 CO ガス分圧の低下により $\underline{\text{C}}<0.005\%$ の極低炭素化処理が一般化している。原理的にはさらに低炭素

化も可能であるが、現在の課題はむしろ転炉から真空処理を含めて、いかに脱炭速度を上げるかという点にあるといえる。

(3) 脱珪

溶銑中の珪素も熱源という意味では貴重な成分であるが、脱りんを阻害するため、多すぎると有害元素となる。この場合、Si は P に先立つて酸化され (SiO_2) となつてスラグの塩基度を下げ、塩基性フラックスを多量に必要とする。ただ、CaO 系を用いる通常の転炉吹錬の場合には (SiO_2) は滓化剤としての役割もあるため、溶製鋼種にもよるが一般に溶銑 $\text{Si} > 0.2\%$ は必要とされる。溶銑脱りんを前提とする場合には CaO 系でももう少し最適 Si% は低く、 Na_2CO_3 を用いる場合には $\text{Si} < 0.1\%$ が望ましい。このように Si に限らず、精錬上必要なスラグ組成や酸素ポテンシャル、温度は各プロセス、成分によつて最適範囲がまちまちであり、この範囲内に合致させるためには精錬容器の分割やスラグの更新が有効な手段である。ただし、分割に伴う工程の複雑化や、処理時間の延長に伴う温度低下の発生は避けられず、これらを極力少なくすることが重要となる。溶銑脱珪においてはこのために特別な反応装置を用いず、トープード等の運搬容器を用いることが一般的であるが、最近ではさらに温度低下を少なくするため、溶銑桶での処理も一般化しつつある。現在のところ Si 濃度の制御性にやや難点があるものの、特別な処理時間が要らず、浴深が浅く、かつ流動しているために処理も容易という利点から今後多く採用されていくと考えられる。全体の Si レベルを下げるのであれば出銑成分を調整することが最も合理的であるが、原料事情等で不可能な場合や、出銑成分のばらつきをそろえるためには溶銑脱珪は有効な手段である。

(4) 脱りん

脱りんは最近 10 年間に最も進歩をとげた分野であり、昭和 40 年代の $\text{P} \leq 0.010\%$ のレベルから最近では $\text{P} \leq 0.002\%$ も溶製されるようになった。表 3・1・4 に示すように現在では溶銑段階から溶鋼段階まで、必要に応じてあらゆる工程で脱りんが行われている。現状の脱りんは塩基性酸化スラグによつているため、平衡論的には塩基度、酸素ポテンシャルを高め、(P_2O_5) の活量、温度を下げるのが重要であるし、移動現象論的にはスラグとメタルの接触面積を大きくし、物質移動速度を速めることが必要である。

まず、全般にわたる合理化という点で最も重要な、転炉内での脱りんについて述べる。昭和 40 年代は日本においては純酸素上吹転炉のみであつた。この場合塩基度を CaO により調整し、酸素ポテンシャルを上吹酸素

ガスによつて形成される (Fe_tO) で与えることになるが、まず塩基度の点である程度以上 (通常は $(\% \text{CaO}) / (\% \text{SiO}_2) > 4$) 高めると投入 CaO 分が完全にはスラグ化しない、いわゆる滓化不良が発生し、脱りん効率が低下してくるという問題がある。さらに、鋼浴攪拌力を上吹酸素ガスジェットと発生 CO ガスのみに依存しているため、低炭素域 (一般に $\text{C} < 0.5\%$) になると攪拌力が低下する傾向がある。この結果スラグとメタルの混合が弱まり、スラグの脱りん能力が有効に活用されにくくなることや、 $\text{C} < 0.1\%$ クラスの低炭素鋼においては酸化力の確保として必要な量以上に鉄分の酸化が増大し、鉄分歩留りが低下するという問題がある。一方、底吹転炉法は粉状 CaO の底吹きによる滓化率の安定や底吹き酸素ガスによる強攪拌の 2 点から、上記問題点の根本的解決法として注目されていたが、底吹きノズルの寿命に問題があると見られていた。昭和 52 年日本に導入され、高い操業技術力によつて底吹きノズルの寿命問題が解決され、むしろ上吹転炉を上回る耐火物原単位を示すに至り、出鋼歩留りや CO ガス回収率等が上吹転炉よりはるかに高いという利点が強く認識されるようになった。この成分は攪拌力の定量化と精錬プロセスへの影響評価という、精錬分野では新しい技術の発展に結びついたし、上吹転炉の改造を促進する大きな原動力ともなつた。上吹酸素ガス量の数%程度のガスを同時に底吹きする複合吹錬法は、精錬効果としては底吹転炉に遜色なく、上吹きランスの調整によつてスラグの酸化度を制御できる融通性もある。日本の経済情勢は新しく底吹転炉を建設する状況にはなく、既存の上吹転炉からの改造が簡単なこととも相まって、日本では昭和 55 年の初登場以来 2 年程度で転炉製鋼法の主流を占めるに至っている。

また、主として高級材を対象とする炉外脱りん法の開発も併行して進んでいる。まず、溶銑においては前述の脱珪技術をベースに Na_2CO_3 によるインジェクション脱りん法が完成された。 Na_2O は従来から強塩基として知られていたが、気化しやすいことや CaO に比べ高価なこと等から脱硫用としての少量使用に留まっていたのを、徹底的予備脱珪をすることによつて Na_2CO_3 の原単位を下げ、高塩基度化を達成することにより工業化に成功したものである。一方、CaO 系においても同様なプロセス開発が進み、 CaF_2 や CaCl_2 などの媒溶剤を有効に用い、かつ FeO を同時に添加するなどの方法で酸素ポテンシャルも高めて、脱りんを有利に進めることができるようになった。 Na_2O 系との比較では耐火物などで有利な反面、脱硫などでは不利であり、両者とも操業技術の改善を積み重ねている段階である。

溶銑での脱りんが後工程での処理も考えた予備的な意味を持つのに比べ、溶鋼での脱りんは通常、 $P < 0.010\%$ の低りん鋼を得るための仕上処理に使われている。脱りんの方法は基本的に溶銑の場合と同様であるが、利点として酸素ポテンシャルが高いこと、欠点として高温であることのほか、制約条件として取鍋では一般にフリーボードが小さく、強攪拌ができないことや集塵設備が十分でないことなどが挙げられる。フラックス添加や処理時間が長くなることによる温度降下を補償するため、電極加熱を有する LF や VAD 等を前提に実施されることが多い。溶銑から溶鋼を通じ、どの時点で脱りんすることが最適であるかは、現在のところ結論が出ておらず、使用フラックスの選択や処理時間の短縮なども含めて、今後の技術的課題である。

(5) 脱硫

溶銑脱硫については昭和 40 年代に急速に進歩し、溶銑 $S < 0.005\%$ は容易になつていた。ただし、 S は最終的には MnS 等の硫化物系介在物になりやすく、耐水素誘起割れラインパイプ材等で特に問題になるため、昭和 50 年代は仕上脱硫としての溶鋼処理が著しく進歩し、 $S < 0.001\%$ の技術が確立されるに至つた。脱硫方法としては Al 脱酸、取鍋内スラグコントロールの後、脱硫剤として CaO 系フラックスや $Ca-Si$ 合金が用いられ、精錬対象としての S 濃度が著しく低いことからスラグとメタルの混合を十分にするため、 CaO 系の場合は LF のように加熱しながら長時間攪拌したり、あるいは粉状にして溶鋼に吹き込むインジェクション法がよく用いられる。 $Ca-Si$ 合金を用いる場合は、蒸気圧の高さから静鉄圧の高い溶鋼下部へインジェクションする方法が最も一般的であるが、一部では連続铸造時タンディッシュ内へ添加する方法などもとられている。 CaO 系と $Ca-Si$ 系の使い分けについては、一般に $S \approx 0.002\%$ クラスまでは CaO 系で十分であるが、 $S < 0.001\%$ や介在物の形態制御を要求される場合は、 CaO 系で脱硫後 $Ca-Si$ 合金を添加することが必要である。

(6) 低酸素化

脱硫には大部分の場合 Al が用いられており、 Al_2O_3 系介在物を減少する努力もよく行われた。 Al_2O_3 は単なる Ar ガス攪拌でも凝集浮上するし、連続铸造時タンディッシュ内での分離も比較的容易である。しかし、これらだけでは $Total-O < 20$ ppm は困難であり、脱硫と同様、 CaO 系フラックスをインジェクションしたり LF 等で長時間の処理が必要である。酸化物系介在物は耐火物等にも起因するため完全除去は困難であるが、 $Total-O < 10$ ppm の清浄鋼も得られるようになってきた。また、低酸素ポテンシャル領域での固体電解質による溶解

酸素の定量技術も進歩が著しく、 Al 濃度コントロールなどに応用されている。

(7) その他

脱水素は 40 年代と比べ、技術としてはあまり進歩していないが、 RH 等の真空処理比率は年々上昇している。むしろ、溶鋼脱りんや脱硫に用いる CaO 系フラックスによる H の上昇が問題であり、吸湿防止対策がとられている。脱窒素もあまり変化していない項目であり、溶銑脱りんの実施により溶銑の低 N 化は見られるものの、転炉吹錬後の N 濃度には大差がなく、主要な問題は転炉吹錬末期の吸窒も含めて、溶鋼段階での N 上昇をいかに防止するかという点である。なお、まだ工程化されるには至っていないが、大量の Ar ガスや脱炭による脱窒も検討されているし、スラグによる脱窒も研究され始めている。クロムについては、ステンレス精錬の際の酸化防止に関して 40 年代に著しい進歩が見られたが、50 年代はクロム鉱石の熔融還元法についてかなり検討が進んでおり、60 年代の前半に技術が確立される見通しである。

最後に、個々には触れなかつたが、 Cu や Ni 等、主としてスクラップの多量使用時に問題になる、微量元素の除去技術がある。日本においては製品歩留りが諸外国に比べ格段に高いため、現在のところまだ必要になる兆は見られないが、大きな潮流としては存在していると考えられ、 CaC_2 の利用等すでに研究が開始されている。また、スクラップの多量使用問題に加えて、工程の多様化により熱損失が大きくなつており、一方で鉄鋼業全体の省エネルギーの進行から、転炉発生 CO ガスの回収が一時ほど重視されなくなつてきた。こうしたことから欧米なみの転炉内での CO ガス燃焼による溶鋼加熱法や、積極的にコークス等の燃料を使用しスクラップ比を上げる方法等、むしろ昭和 30 年代の未解決テーマが重要になりつつある。ますます厳しくなる鉄鋼材料の品質向上への要求に応え、かつ製鉄中進国との価格競争に打ち勝つためには、操業技術をさらに先鋭化していくと共に、昭和 40 年代に見られた大量生産技術と離れて、物理化学や移動現象論等による適確な判断のもと、成熟した鉄鋼精錬技術の先端を切り拓き、基礎技術から応用技術まで積み上げていく、長期的視野に立つた体系的な技術開発が必要になつている。

3.1.3 铸造技術

(1) 連続铸造法

この 10 年間の最大の変化は、連铸比率が大幅に増大したことである。すなわち 1975 年の 31% から 1983 年には 86% になつた。1975 年に電炉普通鋼の連铸比

率は 70% 以上になつていたが、転炉普通鋼は 27% と低く特殊鋼は 12% 前後であつた。特殊鋼の連铸比率は、1982 年でも 30% 以下であるから、この 10 年間の連铸比率の変化は、転炉鋼の連铸比率の急激な上昇によるところが大きい。すなわち 1984 年初めには転炉鋼の 86% が連铸により生産されている。

このような連铸比率の急上昇は、1973 年の石油危機を契機とした省エネルギーの強い要請に対し、連続铸造法が最も適した方法であるとして、その適用範囲を広げてきたことによるものである。

連続铸造法が電炉普通鋼にいち早くとり入れられたのは、従来小形鋼塊から圧延材を製造していた電炉の造塊作業環境の改善効果ばかりでなく、製品歩留りおよび品質の向上が大きく、さらに電炉の容量と当時の連続铸造の生産性がマッチしていたことなどによるものであつた。しかし、転炉のように大容量の溶鋼を処理するには、①連続铸造の生産性が低く、②多量に製造されているリムド鋼製品を連続铸造により製造することが困難であり、③高級品種に対しては非金属介在物や中心偏析など品質上の問題が未解決である、などの問題点があつた。

この 10 年間に、これらの問題点は解決され、高い連铸比率が達成されたが、その技術の概要を簡単に述べよう。

(a) 生産性の向上

最近の連铸生産性のめざましい向上は、連々铸による稼働率の向上と铸造速度の増大などによつて達成されたもので、スラブ連铸で 26 万 t/月以上、ブルーム連铸で 10 万 t/月以上の実績も報告されている。スラブ連铸で 150 チャージ以上の連々铸の報告もあるが、これは浸漬ノズルの寿命延長と铸造中ノズルの交換、铸造中の铸片幅の変更および異鋼種間の連々铸などの技術の確立によるものである。また高速铸造は非金属介在物の集積や内部割れの発生に対しては不利であり、ブレイクアウトも発生しやすい。介在物の集積に対しては、その浮上時間を確保するために、ある適当な長さの垂直部をもつ垂直曲げ型連铸機が有利であるとされている。内部割れはバルジングによると考えられているので、冷却を強化して凝固殻の厚さの増大をはかり、あるいは分割ロールの採用などの対策がとられている。またブレイクアウトに対してはロングモールドの採用により铸型下端での凝固殻厚さの増大と均一化をはかつたり、铸型直下とウォーキングバーなどで支持する方法がとられている。

以上のほかに、準備時間や事故休止時間の短縮が設備面の改善により達成され、図 3.1.8 に示すような注入時間比率の向上が報告されている。また、図 3.1.9 に示すように、スラブ連铸機の実産性は転炉の実産性に匹敵

するものもある。

(b) 連铸用リムド相当鋼の開発

表面性状の良い薄板材としてリムド鋼が長年使用されてきた。この特性をえるには铸型内で適度のリミングアクションをさせることが必要であるが、連铸では困難であり、普通造塊法によつていた。しかし本鋼種は炭素鋼のうちで大きな割合を占めており、これの連铸化は省エネルギーなどの点から強く要望されていた。現在リムド相当鋼として、弱脱酸鋼 (C: 0.04, Si: 0.01, Mn: 0.25, P: 0.015, S: 0.014, Al: 0.006, N: 0.0022) が連铸用として開発され、生産されている。すなわち、Al キルド鋼、Si キルド鋼では薄板の垂鉛めつき性など、その特性上に多くの問題点があつたが、Si を使用せず最小限の Al で脱酸することで、連铸による製造上の最大の問題であつたピンホールの発生を防止することができた。正確な脱酸のコントロールと铸造時の溶鋼の再酸化の防止、および一定高速铸造技術など、製鋼から铸造まで一貫した技術の確立によつて達成されたものである。

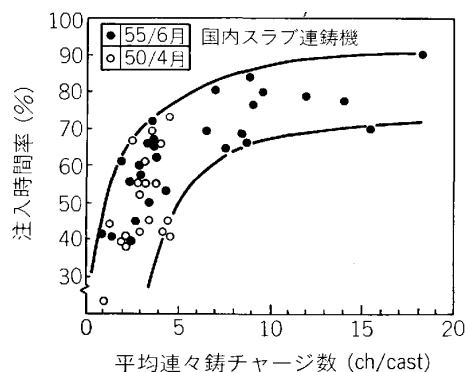
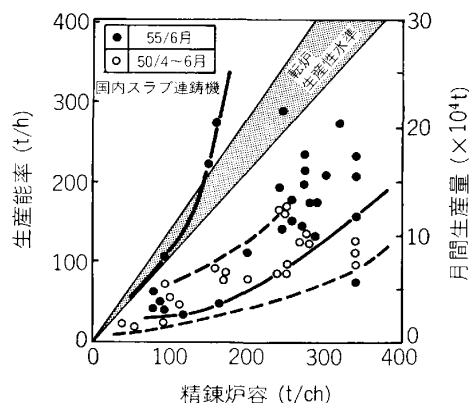


図 3.1.8 連々铸率と注入時間率の向上
(井上ら：鉄と鋼，67 (1981)，p. 1073)



転炉生産性：稼働率 65%，T-T 30~40 min として
図 3.1.9 スラブ連铸機の実産性の向上
(井上ら：鉄と鋼，67 (1981)，p. 1073)

(c) 品質の向上

連铸適用鋼種の拡大のためには、品質の向上が必要であつたが、最近めざましく発達した取鍋精錬を主とした一連の溶鋼処理技術と、介在物や割れ防止のための铸造技術、ならびに中心偏析軽減のための電磁攪拌技術の開発は、連铸適用鋼種の拡大に大きく寄与した。

(i) 非金属介在物の低減と表面欠陥の防止

高級鋼の連铸化と铸片の無手入、直送圧延のためには、介在物の低減と表面欠陥の防止が重要になる。介在物による欠陥としては、表面欠陥はもちろんのこと厚板や棒鋼などでは内部欠陥も問題になる。介在物の低減対策は、当然のことながら連铸ばかりでなく、鋼の精錬を含めた全工程でとられている。最近の取鍋精錬技術の進歩は著しく、清浄鋼の溶製に大きく寄与している。すなわち取鍋中の Ar パブリック法や真空脱ガス法の適用により溶鋼中の介在物の低減がはかられている。溶鋼の空気酸化を防ぐためには、取鍋～タンディッシュ間の Ar 雰囲気による無酸化注入、タンディッシュノズル内への Ar 吹き込みなどが行われている。また介在物の浮上分離を狙って、タンディッシュ内の堰の設置や浸漬ノズルの溶鋼吐出角度の適正化が検討され、さらに浮上介在物の吸収能力の大きい铸型内パウダーが使用されている。

介在物以外の表面欠陥としては、各種の表面割れがある。铸型の鋼が铸片に侵入することによる粒界割れは、铸型内面にめつきを施すことにより解決している。Al, Nb, V, Cu などを含む鋼の場合に助長される横割れは铸片の矯正時に発生することが多いが、矯正点における铸片表面温度を脆性領域にならないように、2次冷却を制御して铸片表面温度を管理することにより、防止される。また、縦割れは铸型内の凝固殻厚さの不均一がその原因と考えられており、その防止のために、铸型冷却のバランス、铸型直下の冷却方法、铸型テーパおよび铸型内パウダーの適正化がはかられている。

(ii) 中心偏析の防止対策

中心偏析は、凝固末期に、凝固前線にブリッジが形成され、下方にとじ込まれた末凝固の溶鋼が凝固するときの収縮により、固液共存域のデンドライト間にある溶質の濃縮した残液が、下方に吸引されて生成するものである。したがって等軸晶帯の形成によつて、偏析の強さが左右される。ブloom連铸の場合には、铸造断面の大きい方が等軸晶帯が形成されやすく、中心偏析の軽減に有利である。また、铸込温度の低いほど中心偏析には有利であるが、低温注入は実際作業上困難である。

一方、バルジング防止のためにロールピッチを小さくしたり、凝固殻厚さを増すためにスプレイを強くするな

どが行われているが、内部割れを発生しない程度に、铸片のクレータエンド近傍を軽圧下して、未凝固溶鋼の移動を阻止する軽圧下铸造も行われている。

さらに積極的対策として、1981年初め頃から電磁攪拌により等軸晶を生成させ、中心偏析を防止する方法が実用化されている。電磁攪拌をあまり強力にすると負偏析を示すホワイトバンドが生成するので、これをおさえて目的を達成するために、攪拌力はもちろん攪拌位置や攪拌法の適切な選定と正確なコントロールが必要である。铸型内攪拌には、等軸晶の生成のほか、铸片表層部の介在物やピンホールなどが除去され、表層部の品質を改善する効果がある。2次冷却帯における攪拌は、等軸晶の生成に最も効果的で、高級鋼の連铸には欠かせないものとなつている。最終凝固域での攪拌は、等軸晶帯の形成のみでは不十分な中心偏析の防止を可能にするといわれている。したがって、電磁攪拌を適用する場所や操業法を、铸造する鋼種などにより、その目的に応じて組み合わせることにより、高品質の铸片がえられる。とくに中心偏析の問題のために、連铸化がおくれた棒鋼用ブloomまたはビレット連铸は、この技術の開発によつて、急速に連铸化が進んでいる。

以上述べたことのほかに、耐火物の品質向上や各種センサーの開発と自動化など連铸比率の向上に寄与していることは言うまでもない。図 3・1・10 は 1975 年から現在までのわが国における連铸機の設置数の変化を示す。1975 年から 1976 年で設置数に大きい差があるのは、石油危機により、省エネルギー効果を狙って連铸化が進んだものと思われる。その後設置数は約 20% しか増加していないが、前述のように生産性の向上と適用鋼種の拡大により、連铸比率が飛躍的に向上したものと考えられる。

(2) 普通造塊法

この 10 年間に連铸比率が上昇したことは、普通造塊

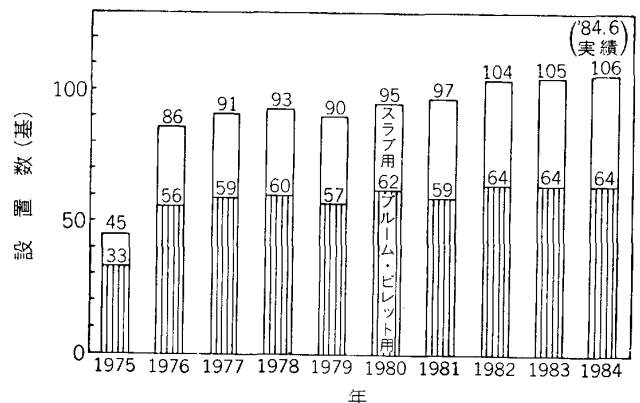


図 3・1・10 わが国における 10 年間の主要連铸設備状況 (日本鉄鋼連盟資料より作製)

法の適用がそれだけ減少したことを意味する。したがって普通造塊法により製造されている圧延材は、ステンレスを除く特殊鋼の一部と、極厚鋼板および一部のリムド鋼である。特殊鋼としてはボールベアリング材のように、とくにきびしい品質上の要求があるものや、ロットの小さいものなどである。極厚鋼板は圧延比の確保のために普通造塊法で製造されているが、最近高品質化の要求が厳しく、逆VおよびV偏析などの内部欠陥がなく、しかもザク疵の圧着を目的とした予備鍛錬が省略できるものとして一方向凝固鋼塊が開発され、直接圧延により極厚鋼板が製造されている。現在鋼塊上部表面付近に逆V偏析が認められているが、70t程度の鋼塊まで実用化されている。

また、鍛鋼は一般に断面が大きく、小ロットで、しかも品質がとくに厳しいので、普通造塊法によつて製造されている。鍛鋼の大きいものでは、500tや570tの超大形鋼塊の必要なものがあり、合わせ湯法で真空铸造により製造されている。このとき溶鋼を長時間保持するとともに、精錬が十分できる取鍋精錬の適用は、超大形鋼塊の内部品質の改善に大きく寄与している。

鍛造用鋼塊の偏析やザク疵の減少および歩留りの向上を目的として、エレクトロスラグホットトッピング (Electroslag Hot Topping, ESHT) が開発され、2, 3の適用例が報告されている。これはエレクトロスラグ溶解法と同様の方法で押湯を加熱保温する方法であるが、適当なスラグを用いれば脱硫のような精錬効果も同時にえられるというもので、現在までに50~60t鋼塊が製造されている。しかし、その品質評価は、取鍋精錬を適用した鋼塊などとの比較において決まるものと考えられる。

また、大形の圧力容器用シェルのような中空鍛鋼品用の鋼塊として、コストダウンを目的とした中空鋼塊が製造されている。現在140t程度の鋼塊まで報告されている。

連铸の場合と同様に、普通造塊法においても、铸込み中の空気酸化によつて生成した介在物が、鋼塊の品質に悪影響を及ぼすので、無酸化雰囲気造塊法が広く採用されるようになった。この方法は介在物の減少対策として、最も効果が認められた技術の一つで、下注ぎ造塊では取鍋と注入管の間の雰囲気コントロールしている。

また、高熱作業の解消や省力化を目的として、品質面ではブローホールや割れの発生を防止できる技術として、クレーンスケール (Crane Scale) とスライディングノズルを結合し、铸込速度を正確に制御できる自動铸込技術が実用化されており、ワンマンコントロールが可能になりつつある。

3.2 製鋼理論

3.2.1 物理化学

この10年間のこの分野における発展を概観する時、当然のことではあるが、従来の延長線上にある学問上非常に基礎的なテーマと技術的トピックスに密接に関連したテーマに大別して述べることができる。

(1) 溶鉄、スラグの物理的性質

1970年代に入つて、X線及び中性子回折技術の進歩により、熔融鉄合金及び珪酸塩スラグの構造がかなり定量的に明らかにされるようになった。それによれば、大部分の熔融金属が剛体球モデルで説明され、また、珪酸塩中にはBOCKRIS、さらに進んでMASSONが従来より提案していたディスクリート・アニオンの存在が実証されている。スラグについては、さらに種々の分光学的手法、例えば、赤外線、ラマンスペクトル等が利用されている。これらの研究は、最近の非晶質材料とも密接な関係があるので、その手法の今後の発展が期待される。

他の物理的性質として特筆すべきものは、レーザーフラッシュ法、ホットワイア法の開発によるスラグの熱伝導度の測定である。これは以前に全くといってよいほど測定されていなかったもので、構造感受性が弱いという予測に反して、かなり組成依存性が見出されているが、測定法によつてデータにかなり差があり、今後の検討が必要である。

また、熔融金属の音速の測定も実用的な意義も含めて興味深い。最近では高温融体の粘度を瞬間かつ連続的に測定する方法が開発されている。

拡散係数については、従来の手法による多数の測定例の中で、多成分系スラグを対象としてカップリングを考慮した相互拡散係数の測定が目目される。これは理論的には不可逆過程の熱力学から当然予測されるものであるが、高温で測定された数少ない例であろう。このほか、スラグ中の酸素の透過度を測定した報告もある。熱力学的性質としては、従来、高温のために技術的に不可能であつた熔融鉄合金の混合熱の熱量計による直接測定が、ほぼ完全に行われたことは注目に値する。

実用的に意味のある物理的性質として、スラグの泡立現象を基礎的に解明しようとした試みがある。現象そのものが大変複雑であるために、十分な理解はなされていないが、スラグの表面張力の添加物による変化(動的表面張力)が重要であることが示唆されており、今後、理論的検討がなされるべき分野であろう。

(2) 製鋼反応の熱力学

(a) 鉄合金の熱力学的性質