

2. 製 鋼

2.1 製鋼技術および理論の進歩と展望

2.1.1 製鋼技術の進歩

(1) はじめに

近年におけるわが国の粗鋼生産の伸びは著しく、史上初めて年産1億tの大台を越えるに至った。これは純酸素上吹転炉法、真空脱ガス法、連続鑄造法を始め種々の最新技術を積極的に導入し、これを改良発展させるとともに、日本経済の発展計画を基盤として鉄鋼需要が大きく喚起されてきたことが最大の推進力となつてゐることは論をまたない。図2.1.1は最近10年間の粗鋼生産量の伸び、並びに製鋼法別の内訳を示したものであるが、これから明かなように転炉鋼の比率が圧倒的に大きく、一昨年においては約80%を占めるに至つてゐる。日本に初めて純酸素上吹転炉法が導入されたのは昭和32年秋であつたが、その後急速に発展し、1960年代にはすでに海外原料→大型船舶→大型高炉→純酸素上吹転炉の組合せによる高能率大量生産方式のパターンが確立されたといえよう。

鉄鋼業はもちろん経済活動の一環であり製鋼技術の進歩もこれら経済活動の一翼をになつてゐるが、近年における製鋼技術の進歩を概観するにあたり、製鋼技術者がこれまで志向してきた方向を整理してみると、

- 1) 生産性向上、省力化への志向
- 2) 原価低減

3) 品質の高級化

4) 公害対策、環境改善

5) 省エネルギー(あるいは省資源、転エネルギー)

の5点に集約することができよう。もちろんこれらの項目は相互に関連があり、各々独立に論ずるわけにはいかない。

生産性向上と省力化への志向は、日本経済の発展に伴つて増大した鉄鋼需要を賄い、かつ逼迫してきている労働力の節減のために志向されたもので、近代的大容量転炉の建設技術ならびに高能率操業技術の発展にその代表例を見ることができる。

原価低減についてはいうまでもなく経済活動の根底であり、製鋼法で見れば平炉法から転炉法への転換、工程省略という見地からは連続鑄造技術の発展にその例を見ることができる。鉄鋼需要拡大の背景には常に低コスト、高品質鋼の要求があり、この見地からみた製鋼技術の進歩は著しく、溶銑脱硫技術、転炉における低窒素鋼の吹錬技術、低水素鋼を得るための真空脱ガス技術の発展など枚挙にいとまがない。

近年における日本経済の急激な発展はその一部に歪を生じ、いわゆる公害問題が大きく取上げられるようになり、昭和42年には公害対策基本法も制定されて従来ややもすれば優先順位の低かつた環境改善技術の進歩が促進されるようになった。たとえば、ダスト含有量 $0.1\text{g}/\text{Nm}^3$ 以下を保証できるOG転炉集塵技術などその発展はめざましいものがある。

さらに、一昨年秋の石油ショックによりクローズアッ

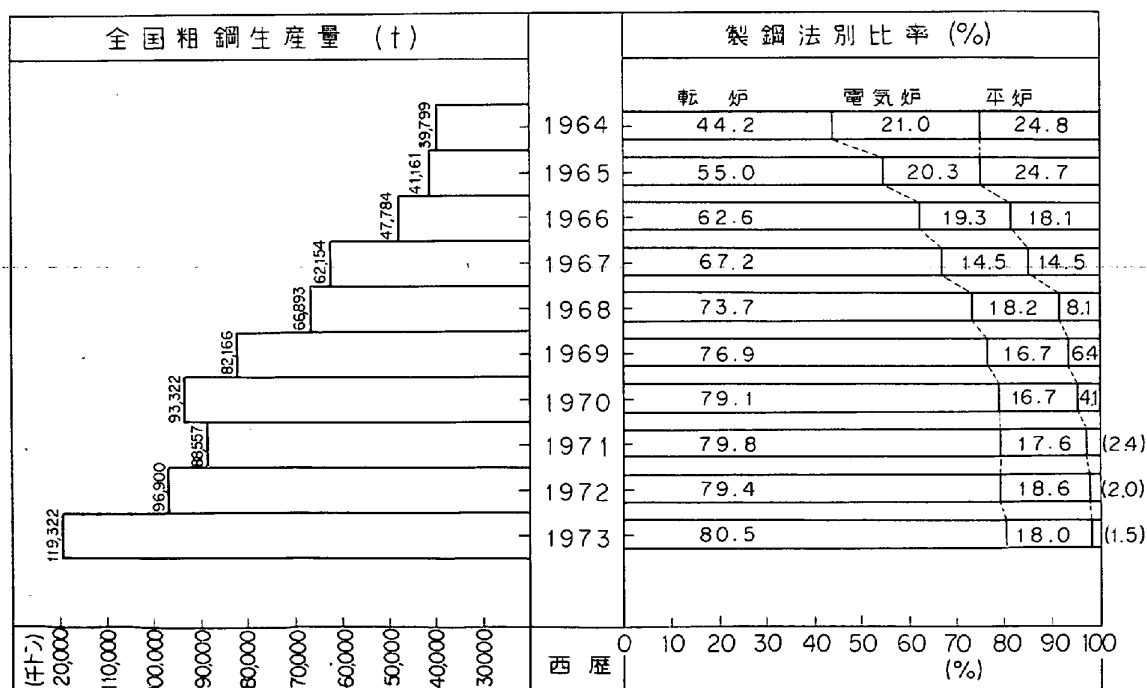


図 2.1.1 日本における粗鋼生産量の推移ならびに製鋼法別比率

プされたように鉄鋼業は本来一次エネルギー多消費型産業であるが、これまでも省エネルギーの努力は継続して行なわれてきており、転炉排ガス回収技術の発展、連続鑄造技術による分塊工程の省略など着実な進歩がなされてきている。

これらの諸見地から製鋼の各分野における技術進歩が方向づけられ、製鋼プロセスの理論的な解明と相まってその発展が促進されてきたといえよう。

(2) 製鋼炉における技術の進歩

(a) 純酸素上吹転炉法

近年における純酸素上吹転炉操業技術の進歩は特に製鋼能率向上において著しい。転炉の生産性を示す指標として1チャージあたりの吹錬時間と製鋼時間についてみると、過去5年間に吹錬時間は(したがって製鋼時間も)全国平均1分短縮されてきており、一部の転炉工場では月間平均吹錬時間12分、製鋼時間28分という操業成績も記録されている。転炉の歩留、稼働率などを大きく支配する吹錬中のスロッピング、スピitting現象に関する化学工学的、冶金学的理論解明が進み、それにもとづいて最適形状多孔ランスの開発、適正な吹錬パターンによる操業、最適炉体プロフィルの採用などの諸対策技術が確立されてきたことがこの製鋼能率の向上に大きく寄与している。

炉容は生産性を支配する大きな要素であるが、最近設置される新鋭転炉工場では250~300 t/chが普通で、大型転炉の操業技術は完全に確立されるに至った。また、製鋼時間の短縮、操業の安定などを目的とした転炉プロセスコンピューターの利用は、スタティックモデルによる吹錬計算の研究から出発したが、最近では転炉排ガスの量と組成の変化を利用したり、あるいはサブランスによる吹錬途中の鋼浴温度、炭素含有量を利用する、いわゆるダイナミックコントロールにまで発展している。

現在の製鋼法の主流となつた純酸素上吹転炉法は、トーマス底吹転炉法のもつ欠点を大幅に改善した新プロセスとして誕生し発展してきたが、近年ユニオンカーバイド社の開発した二重管ノズル技術により、灯油、重油または天然ガスを冷却剤として純酸素ガスを炉底より吹込むことが工業的に可能となり、新たな底吹転炉法が出現した。この底吹転炉法は、特に低炭素領域での鋼浴攪拌強度が大きくまた吹錬全般の酸素効率が良いため、LWS法、OBM法あるいはQ-BOP法の名称で再度着目されつつある。しかしながら、炉底煉瓦寿命、鋼浴中[H]含有量など、経済性、操業の安定性、品質水準などを勘案した総合評価が純酸素上吹転炉法に勝るか否かについての結論は、今しばらく時間を要しよう。

前述のように、生産性、コストの優位性から純酸素上吹転炉による特殊鋼ないしは高級鋼の生産も漸次増加してきており、そのためこれまで電気炉鋼の特徴とされてきたクリーンスチール、すなわち、硫化物系介在物酸化物系介在物の少ない鋼の製造技術の開発が進められてきた。

転炉の炉内反応は本質的に脱炭反応を主体とする酸化反応であるため、脱硫能には限界のあることは理論的にも明らかであり、近年溶銑の予備処理技術が急速に発展してきた。通常使用されている脱硫剤、すなわち、ソー

ダ灰、苛性ソーダ、カルシウムカーバイドなどの脱硫能については平衡論的にはすでに明らかになつており、近年における溶銑脱硫技術の進歩はもつぱら脱硫反応速度ならびに効率の増大技術の開発であつたといえよう。すなわち、機械的攪拌を利用したKR法、不活性ガス攪拌を利用したPDS法、CLDS法などのように、攪拌を強化することにより脱硫に際して律速となるSの移動速度を大きくすることが工業的かつ安価にできるようになり、現在では[S] 0.002%の転炉鋼も得られるようになった。

また、酸化物系介在物をより少なくするためには出鋼時に正確な脱酸調整を行なう必要があり、そのためには出鋼前酸素量を把握しなければならないが、従来の酸素分析法では長時間を要し定期的に酸素含有量を知ることが非常に困難であつた。Zr₂O₃-CaO系を固体電解質とした酸素濃淡電池によつて自由酸素濃度を測定するという概念は古くからあつたが、近年、Cr-Cr₂O₃標準極を用いた信頼性の高い安価なプローブ製造技術が確立され、幾つかの製鋼工場では脱酸調整用に定期的に使用されて成果をあげるに至つており、今後さらにソフト面での技術進歩が大いに期待されている。

(b) 電気炉法

エルー式電気炉は操業に柔軟性があり設備費も他の方法に比べて安いことから、最近特殊鋼ばかりでなく普通鋼の製造設備としても安定した地位を占め、図2・1・1に示したように電気炉鋼は全国粗鋼生産量のほぼ18%となつている。

従来、転炉に比べ生産性の劣つていた電気炉も、UHP(Ultra High Power)操業技術の開発、炉容の大型化、助燃バーナーの有効活用、電極自動調整技術、還元期の短縮技術などの発達により生産性は向上してきた。

生産性を示す一つの指標として全国平均製鋼時間についてみると、最近5年間で約5%製鋼時間が短縮されている。生産性向上のために電力投入量を増大して溶解時間の短縮をはかることは極めて有効であり、1964年米国、W.E. SCHWABEら¹⁾によつてNorthwestern Steel and Wire Co.の150トン炉において50,000 KVAのUHP操業が行なわれたのがUHP操業の最初であるが、わが国においても近年建設される電気炉はHPないしUHPとなつている。従来、電気炉の熱源は電力のみであつたが、10年前から助燃バーナーによるFOS(fuel oil scrap)法の基礎実験がBISRAで行なわれ、助燃バーナー併用のメリットが認識されるようになった。当初はシェル石油で開発されたトロイダル・バーナーが主として採用されていたが、最近では灯油使用のオイルバーナーが主流になつている。

エルー式電気炉の制御に計算機が適用され始めたのは10年ほど前からで、Lukens社²⁾、Steel Peach & Tozer社³⁾にその例がみられるが、その後わが国でも溶解期の制御についてアナログ型の電力制御用専用計算機が、NAMIC、ARMSなどの名称で開発実用化されてきており、現在までに14電気炉工場に設置されて操業の安定化に役立っている。

一方、原料面では粗鋼生産の伸びとともにスクラップ需給が逼迫してきているため還元鉄の利用技術が着目さ

れつつあり、新しい電気炉製鋼法の発展をもたらすものと期待されている。

さらに近年、公害対策から電気炉炉頂集塵、出鋼時集塵などの付帯技術が急速に進歩しつつあるが、最近では完全な公害対策として建家集塵に踏切る電気炉工場が増えており、約15%の採用率となつている。

(c) 特殊溶解法

近年、航空機、原子力利用技術、宇宙開発、海洋開発などの発展につれて高級鋼の需要は増大し、鉄鋼材料に対する要求はますます厳しくなり、信頼性の高い材料の開発が望まれてきた。

従来、高級鋼の溶製方式としては真空誘導溶解法や真空アーク溶解法などが代表的であつたが、エレクトロスラグ再溶解法(ESR)、プラズマアーク溶解法(PAM)、電子ビーム精錬法(EBR)と種々の溶製方法が開発され実用化されつつある。特に、ESR法はスラグ層で発生するジュール熱で母材である電極を溶解しスラグにより精錬し順次水冷鋳型内で凝固せしめる方法で、清浄度の高い偏析のない健全な品質のものが得られ、かつ真空アーク溶解法よりも設備費が安く製造コストも安いことから近年注目を集めており、最近数年間で急速に実用化された生産量も急激に伸びている。

(3) 真空脱ガス技術の進歩

図2・1・2に方法別の真空脱ガス装置の設置状況を示す。流滴脱ガス法は次第に進歩の度合いが鈍つてきたが、出鋼脱ガス法と取鍋脱ガス法は着実に基数を増し、またDH法、RH法もここ数年間著しく増加してきている。

流滴脱ガス法、出鋼脱ガス法、取鍋脱ガス法の三者は、ほとんどが電気炉と組合わされて特殊鋼の脱水素、非金属介在物の減少のために使用されているのに対し、DH法、RH法は主に転炉と組合わされ、その使用目的も単

なる脱水素、非金属介在物の減少だけではなく、極低炭素鋼製造のための真空脱炭、高級鋼の成分・温度の微調整などかなり多目的に使用されている。さらに、最近では電気炉を単に溶解炉としてのみ使用し、仕上げはDH、RHなどの脱ガスプロセスで行なうという考え方も一部には採用されている。

真空脱炭技術は近年特に発展し、最終C含有量50ppm程度が得られる操業技術が確立される一方、ステンレス鋼の脱炭精錬を真空下において酸素ガスを吹込みながら行なう方法としてのLD-VAC法、あるいはRH-OB法は、クロムの酸化を抑制しつつ脱炭を行なう技術を工業的に実施する方法として特筆すべき技術であろう。

また、これまでの真空脱ガス技術の弱点の一つとして処理中の溶鋼の温度降下があり、出鋼温度を非常に高くする必要があつた。この対策として、ASEA-SKF法、VAD法など、温度補償のための電弧加熱装置を有する取鍋脱ガス法が高級鋼処理用として注目を集めるようになった。

(4) 造塊技術の進歩

まず取鍋についてみるに、溶鋼の不活性ガスバブリングにより介在物の浮上を促進したり、温度・成分の均一化をはかるという考え方は、かなり古くから提案されていたが、わが国において積極的に検討され始めたのは昭和39年頃からであり、現在では連続鋳造のための温度調整用としても活用され、全国で年間約600tのポーラスプラグが使用されている。

キルド鋼の押湯技術および酸化防止湯面被覆剤についても地道ではあるが着実な進歩がなされている。もともとキルド鋼の押湯スリーブはレンガ枠であつたが、昭和35年頃から省力化技術の一環として発熱性スリーブが導入されはじめ、さらに40年頃から軽量化断熱スリーブが使用されるようになった。押湯保温剤についても、これが鋼塊内部品質に及ぼす影響が認識され、早期発熱型高発熱量パウダーの進歩が著しい。さらに造塊環境改善対策の一環として、昭和44年頃から無発塵無発煙発熱剤の研究が行なわれ始め、粒状、ボード状の発熱剤が検討され、最近では10t以下の鋼塊ではボード状発熱剤、それ以上の大型鋼塊では粒状発熱剤が実用化され環境対策上成果を収めている。また昭和39年頃から急速に発達した酸化防止湯面被覆剤は鋼塊表面疵の改善に寄与しており、さらに今後の発展が期待される。

転炉および圧延設備の大型化と高能率化に対処するため鋼塊の大型化に対する研究も進められてきている。たとえば、薄板用鋼塊では10年前にはせいぜい17~18t程度のリムド鋼塊で製造されており、これ以上の大型化は特に濃厚偏析と大型介在物の見地からかなり困難とされていた。しかしながら、その後リムド鋼の偏析ならびに大型介在物生成現象に関する理論的、実証的研究が進み、最近ではこれらの研究からキャブト鋼に切替えることにより40t程度の薄板用鋼塊も製造されるようになった。また棒線用キルド鋼塊では従来5t級が限度であつたが、鋳型形状の研究と押湯方法の改善などにより10t級鋼塊の製造も可能となつている。

造塊作業の省力化と労働環境改善を達成するためには、作業の機械化、自動化が必須である。そのための新

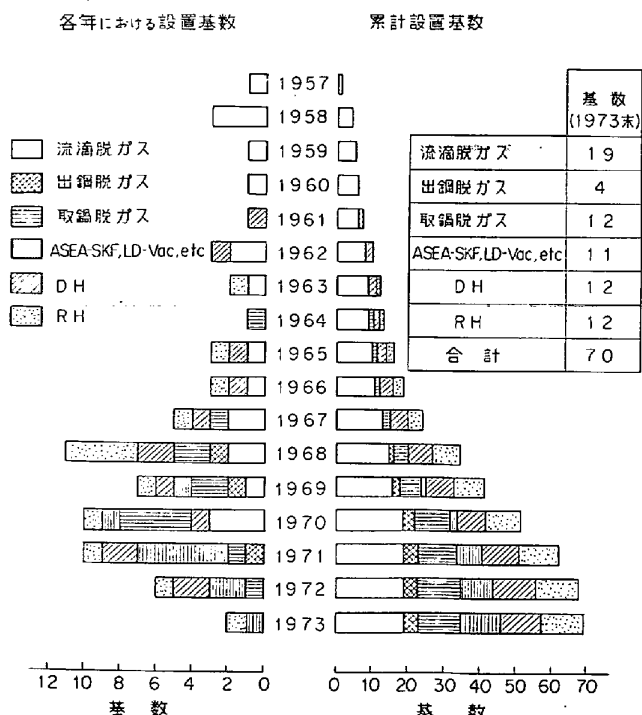


図 2・1・2 日本における真空脱ガス設備の設置状況

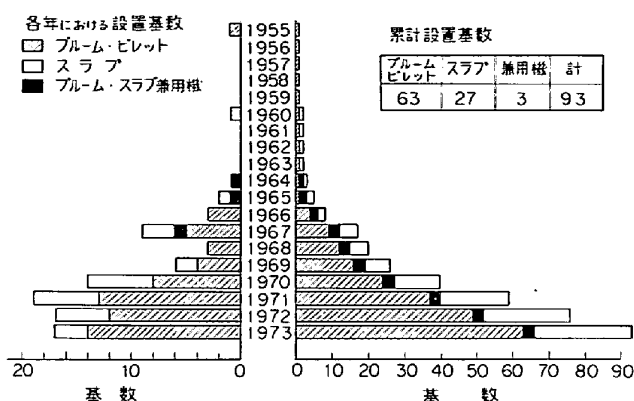


図 2.1.3 日本における連铸設備の設置状況

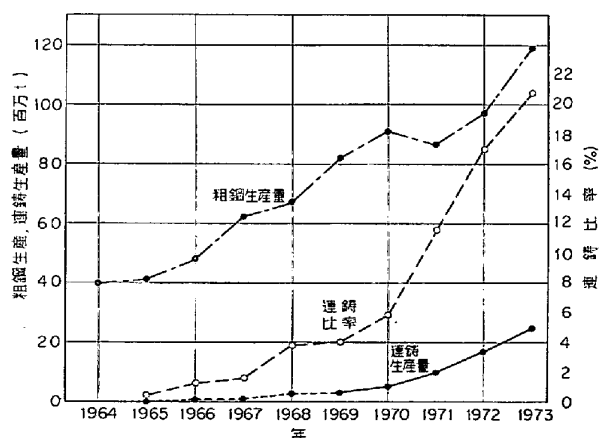


図 2.1.4 日本における連铸生産量、連铸化比率、粗鋼生産量の推移

しい技術として、注入作業においては、オートポアの採用、クレーンスケールの実用化、スライディングノズルの実用化があげられ、また付帯作業においては、铸型内面清掃の機械化、たとえばサンドスリンガー法のような不定形耐火物による取鍋築造法の発展などが挙げられる。

(5) 連続铸造法の進歩

わが国最初の連続铸造機が昭和30年に稼働して以来、18年の間に図2.1.3に示すようにブルーム・ビレット用、スラブ用あわせて93基の連続铸造機が稼働し、図2.1.4のごとく粗鋼生産量に占める連铸鋼比率は20%を越えるに至った。

平炉から純酸素上吹転炉への転換が前述のように極めて急速に行なわれたのに対し、連铸化の方は生産性、設備費、品質の確認その他との関連もあつて、当初の歩みは遅々としたものであつた。しかしながら昭和45年前後より、厚板材、薄板材を対象とした大断面スラブ用連続铸造機の設置が各社で進められ、連铸比率は急速に増大してきている。最近の活発な伸長の背景には、生産性の大幅な向上、連铸対象鋼種の拡大を可能とした連铸材品質の改善、労働負荷軽減のための自動化技術などの技術進歩がある。

生産性の向上は、主として铸造速度と稼働率によつて定まる。铸造速度の増大、すなわち高速铸造を可能とす

るための設備技術上の進歩は著しく、铸型直下の铸片保持冷却強化法としてクーリング・プレートあるいはクーリング・グリッドが考案され、また铸片と同調して上下しながら铸片を保持する間接冷却のウォーキング・バー方式も出現している。冷却能の強化については単に比水量の増大のみならず、スプレーノズルの研究も進み、従来のフラットノズルから冷却能の強いスクエアノズルやフルコンノズルも使用されるようになってきている。これらの技術進歩と相まつて、最近では250 mm厚スラブで1.5 m/min以上の铸造速度が安定して得られるようになってきた。

稼働率の向上を図るためには、多連铸技術の確立、非铸造作業時間の短縮、ブレイクアウトなどの铸造トラブルによる損失時間を極力少なくするなどの努力がなされた。多連铸を安定して実施するために、レードルカーあるいはスウィングタワーなどのレードル交換設備および短時間でのタンディッシュ交換が可能な設備など設備技術上の進歩が著しく、いずれも3分以内の交換が可能となつた。非铸造作業時間の短縮技術としては、準備時間短縮のためにダミーバー上方挿入方式が開発され、この方式によればダミーバー挿入と铸型内セットとを铸片搬出と同時にこなうことが可能である。また、铸造中に铸型の幅変更を行ない準備搬出時間を省略する幅可変铸型の開発も行なわれている。操業面としては、ブレイクアウト防止と品質向上のためにきめの細かい温度管理が要求されるようになり、前述したアルゴンバブリングなどの技術を応用して温度の均一化が図られている。

本来、連続铸造法の主なメリットは分塊工程省略に伴うコスト低減であり、高級鋼ほどそのメリットは大きく、これまで対象鋼種の拡大を目的として連铸材の品質改善の努力がなされてきたが、現在ではステンレス鋼、電磁鋼、低合金鋼などの高級キルド鋼まで連铸化されている。また薄板用のリムド鋼を直接連続铸造で製造するという技術はまだ工業的に確立されていないが、リバンド鋼などの擬リムド鋼が開発され実用化されている。

鋼種、用途により重点は異なるが、連铸材の品質上の問題点は表面疵と非金属介在物、偏析、内部割れなどの内部欠陥とに分類できる。铸片表面疵の発生機構、諸要因の影響については、理論的にも経験的にもかなり明らかになってきた。特に影響の大きい連铸パウダーについてはその進歩が著しく、これまで全く経験的な改善に頼っていたものが最近では粘性・溶解特性から系統的な改善が行なわれるようになり成果をあげてきた。従来厚板材では表面疵が出やすく表面手入れを行なうのが一般的であるが、最近では無手入れで直接厚板に圧延する製鉄所も出現している。

内部品質のうち酸化物系介在物については、アルゴンバブリング法の活用、取鍋-タンディッシュ間アルゴンシール法の活用など着実な進歩がなされ、下注鋼塊に匹敵するような清浄鋼が得られている。また硫化物については、REM (Rare Earth Metal) 添加によるシェイプコントロールなど積極的な改善が試みられている。

連铸材の中心偏析は、特に板用スラブの場合サルファーバンドとして出現し溶接性などに対する悪影響があるため、積極的な改善努力が行なわれ、厳しい铸造温度管

理、機械整備などにより操業技術的にかなり改善されるとともに、最近では電磁攪拌などの新しい技術による改善も試みられている。

連続铸造での自動化は、労働負荷軽減、省力化などの見地からこれまでいろいろと研究されてきたが、その開発テンポは必ずしも速いとはいえなかつた。これは溶鋼を取扱う関係上完全な信頼性が要求されることと、作業の一元化が困難であつたためであつた。しかしながら、 γ 線あるいは熱電対を検出端とするモールド内容鋼レベル計の着実な進歩とともに、これと組合わせた铸造の自動化も各所で試みられ、一部では実際に使用されるまでになつており今後の急速な進歩が期待されよう。

(6) むすび

以上、最近の製鋼技術の進歩についてその主なものを取りまとめた。これまでの進歩はどちらかといえば生産性の向上、原価低減、品質の改善に主力がおかれ、この分野においては数多くの成果が得られてきているが、これらに加えて今後は特に省エネルギー、環境改善対策といった見地からの進歩発展が期待されよう。

文 献

- 1) W. E. SCHWABE and C. G. ROBINSON; Proc. Elect. Furnace Steel Making Conf., 22 (1964) p. 114
- 2) D. O. GLOVEN; J. Metals, 16 (1964) p. 963
- 3) J. TIPPLT, A. WHITTWELL and L. F. FIELDER; Iron & Steel, 26 (1965) p. 272

2.1.2 製鋼理論の発展

この10年における製鋼分野の理論の発展を概観し、将来への展望を考察するに当たつて、まず本会講演大会の討論会の歩みに注目する必要がある。昭和41年4月以降昭和49年11月までの間、18回を数える討論会の中で発表され討論された製鋼関係の数々の記録は、この分野での理論的な考察のあり方、技術への貢献、将来に向けての構想などの面で大変貴重な資料であると思われる。しかも、その主題の推移は製鋼技術の進展と表裏一体をなすものであり、ひいては日本鉄鋼業に要請される短期あるいはさらに長期的な様々の課題と深いかわり合いを示していると考えられる。まず、当初においては純酸素上吹転炉の脱炭、脱リン、脱硫など精錬反応の機構とその制御技術への応用が取上げられていることは当然のことといえる。ついで、鋼の脱酸とこれに伴う非金属介在物の性状は、複合脱酸や鋼塊の凝固と性状などとあいまって、鋼質への厳しい要求に答える時代の背景を物語っている。これに続くトピックスは、いうまでもなく溶鋼の真空脱ガス、溶鋼の減圧下における反応、ステンレス鋼の精錬であり、さらに凝固理論、連続铸造の進歩、連铸ビレットまたはスラブの内部性状および表面性状などである。また、これらに関連して異相間の界面現象を討論するという捕え方がなされている。しかし、討論会は数年もしくはそれ以上にわたる技術と理論的根拠の蓄積が発表される性格のものであり、これがその時点における製鋼技術の進展をすべて物語っているとはいえない。ただ、理論的貢献のあるべき姿を示唆していることは確かである。

つぎに、この10年間数々の国際会議が国内で催され、また海外においてわが国とかわり合いの深い国際会議が持たれたことは特筆に値する。その中でも、特記すべきは昭和45年9月の鉄鋼科学技術国際会議、昭和48年6月の真空冶金国際会議および ESR 国際シンポジウムである。以下に、製鋼理論という側面からこれを追つてみると、鉄鋼科学技術国際会議では溶鉄の性質、溶融スラグの性質、製鋼反応の熱力学、スラグ-メタル反応の動力学、ガスの吸収、脱酸と非金属介在物および凝固などが主題であり、真空冶金国際会議では溶融鉄合金のガス吸収と放出、真空溶解の基礎、蒸気圧、活量、蒸発分子種などの質量分析計による決定、真空下での溶鉄と酸化物間の界面現象、減圧下でのガス気泡の生長と脱ガス、不活性ガス吹込みによる溶鋼の脱ガス、減圧下でのステンレス鋼の脱炭反応などが注目され、ESR 国際シンポジウムでは溶鋼ブル、スラグ内の運動、鋳塊の凝固、スラグ内の反応など ESR 法への理論的寄与を挙げることができる。

これとともに、限定された規模での国際会議として日ソ製鋼物理化学シンポジウムをふり返つてみる必要がある。これは、第1回が昭和42年5月モスクワにおいて日本鉄鋼協会訪ソ学術使節団（団長の場幸雄）と全ソ科学アカデミー会員故 A. M. SAMARIN が組織されたソ連邦研究者との間で行なわれた。その内容は、溶鉄の性質と構造、合金の熱力学、脱炭、脱酸および脱硫反応、溶鉄への窒素溶解度、スラグへの水蒸気溶解度などでかなり広範な領域にわたっている。この2国間のクローズドミーティングは2年ごと双方で開催される機運がかたまり、昭和44年5月には SAMARIN 以下8名のソ連邦研究者を東京に迎えて第2回シンポジウムが催された。その内容は前回の延長線上にあるとはいえ、Al, Cr, Ti, V などの脱酸、リムド鋼およびキルド鋼の介在物性状など学術面から技術面へのアプローチも見受けられるようになった。不幸にして SAMARIN は昭和45年5月死去されたが、その遺志は科学アカデミー会員 N. V. AGEEV に受継がれ、昭和46年9月に盛利貞を団長とする使節団が訪ソし、第3回シンポジウムを行なつた。その主題はメタル-ガス間の反応であつて、固相（オーステナイト）の水素溶解度におよぼす各種合金元素の影響、真空脱ガスにおける脱炭、脱酸および脱水素、単純系および多元合金系における酸素、窒素の吸収あるいはその熱力学、これに関連した溶融鉄合金の表面張力、さらに Ca 脱酸を含む非金属介在物の挙動などが討論されている。この他、窒素プラズマアークから溶鉄への窒素吸収に関する論文がソ連側から提出されている。

ついで、昭和48年5月には V. A. VATOLIN 以下5名の使節団を東京に迎え、第4回シンポジウムが開催された。その主題は金属およびスラグの物性、ガス-メタル-スラグ間反応の熱力学と速度論であつて、溶鉄の液体構造と物性との関連、CaO-SiO₂系溶融スラグにおける酸素の自己拡散、溶融スラグにおけるアニオン分布、メタル-スラグ界面の構造、水素および窒素の吸収と熱力学的平衡値、転炉の脱炭と石灰の滓化、減圧下における脱炭と脱窒素などが討論されている。このシンポジウムは第5回が昭和50年5月に予定され、非金属介在物と鋼質

が主題である。なお、このシンポジウムのシリーズではないが、昭和43年5月に D. K. CHERNOV 100年記念シンポジウム（化学冶金学および物理冶金学）がモスクウで開催され、多数の国から参加者が集まったが、わが国からも SAMARIN の招待を受けて不破祐以下7名の日本鉄鋼協会派遣団が参加した。その多くの論文の中にも、液体金属の物性と応用、ガス-メタルスラグ反応研究への放射性同位元素の適用などが注目に値すると指摘されている。

また、小規模ながら昭和46年5月にはスウェーデンの S. EKETORP 以下9名を東京に迎えて鉄冶金シンポジウムが催され、教育問題を含めてトピックスが取上げられたが、脱酸と非金属介在物、連続製鋼、取鍋精錬、ESR法の基礎などが主内容である。この年の7月には英国で金属化学に関する国際シンポジウムが開催され、わが国からも不破他4名が参加され、その報告によると相平衡と状態図、ケイ酸塩スラグの熱力学と構造、界面反応、ESR法の基礎、脱酸、脱硫および凝固現象などが討論されている。さらに、昭和49年5月には第2回鉄鋼技術国際会議がデュッセルドルフで催され、これに先立つて製鋼基礎に関する日独セミナー（主題はメタル-スラグ-ガス系の熱力学と動力学）がドイツ鉄鋼協会、マクス・プランク鉄鋼研究所、日本鉄鋼協会共催で行なわれた。これには、わが国から後藤他若干名が参加したが、将来はこの企画が2国間で定例的に継続されることが期待されている。

以上は製鋼理論の発展経緯を示す行事の一端を述べたにとどまり、これですべてがつくされているわけではない。たとえば、日本鉄鋼協会、日本金属学会、日本学術振興会製鋼第19委員会、鉄鋼基礎共同研究会など様々の場で数多くの貴重な研究討論が行なわれ、これらを総合分析することによっておのずから将来への展望がひらけるものと思われる。しかしここでは、ひとまず細分化された若干の分野ごとに現状と将来に向けての課題を考察してみよう。いうまでもなく、これらは互いに独立ではなく相互に関連を保ちながら製鋼技術に貢献し、またある場合には独創的な技術発展のための契機ともなろう。

(1) 溶鉄および溶融スラグの構造と性質

これは元来もつとも基礎的な学術の対象領域であり、むしろ理学の学問分野ともいえるものであるが、製鋼の現象面で鉄とスラグの性質がかかわり合いを持たない例は考えられない。応用面で要望されるデータは、もちろんのこと複雑組成に関するものであり、現状の単純系データがそのまま適用できるとは思われない。しかし、それらが理論的根拠として使用されることも確かである。

昭和40年4月以降、鉄鋼基礎共同研究会溶鋼・溶滓部会（部会長斎藤）ではこの趣旨に沿って数年間研究活動を行ない、その成果に各国の有用なデータをも加えて、昭和47年1月「溶鉄・溶滓の物性値便覧」を刊行した。これに収録されている性質は、密度、粘度、拡散定数、表面張力および界面張力、比熱および混合熱、蒸気圧、熱伝導率、電気伝導度または抵抗率、放射率など重要な静的、動的物性であつて、現状をほぼ網羅するたいへん貴重な資料である。

しかしながら、おののの性質について従来多数の測

定例があるにもかかわらず、測定方法や精度に差異があつて、いわゆる推奨値としていずれを採用すべきか迷う例も多い。これは現時点ではやむをえないことでもあり、当然今後の最大課題の一つである。ここに一例によつて現状を述べておく。

溶鉄の純粋系について、密度と粘度の温度変化をそれぞれ図2・1・5および2・1・6に示すが、森田他のデータによると1,600°C附近で急激な変化が認められる。この二つの性質は互いに関連のあるものであり、また溶鉄の微視構造を反映することも確かである。したがつて、その異常変化は δ 鉄類似の構造から一層ランダムな構造へと変わるためであるという推論に到達しても不思議ではない。一方において、X線回折や中性子線回折によつて溶鉄の液体構造につき直接的な知見を得るための努力が内外で行なわれ、たとえば前記の第4回日ソ製鋼物理化学シンポジウムでもこれが話題となつたが、現在なお結論は得られていない。この一例のみによつても明らかなように、ここに指摘した問題点はいたずらに学理的な興味の対象にとどまらず、長期的には後記のスラグにかかわる問題をも含めて、製鋼理論発展のための一礎石であると思われる。幸いにして、昭和48年8月に日本学術振興会冶金物質の高温物性第140委員会（委員長斎藤）が発足し、今後の研究活動が期待されている。

つぎに、溶融スラグについてはこれが本来の製鋼反応

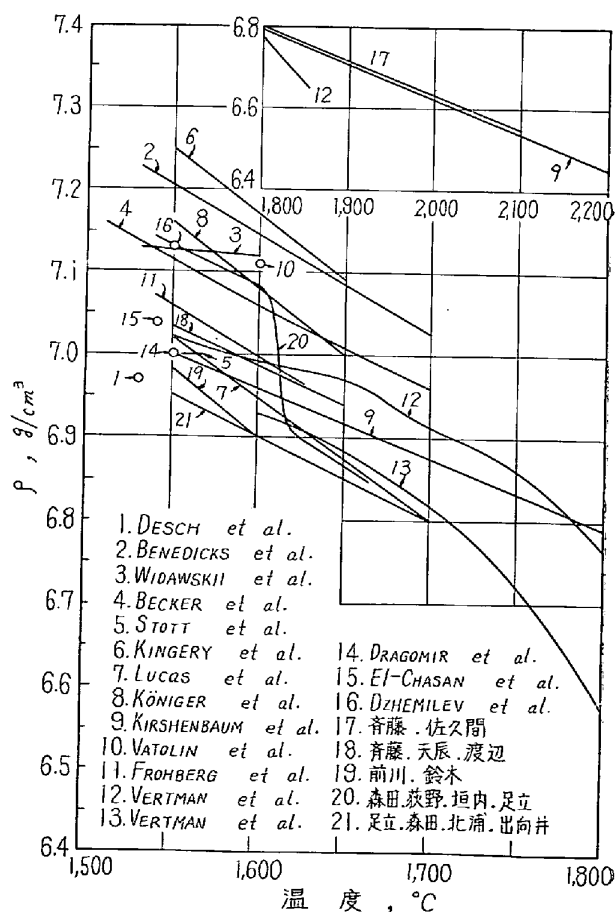


図 2・1・5 溶鉄の密度の温度変化
(日本鉄鋼協会編：溶鉄・溶滓の物性値便覧)

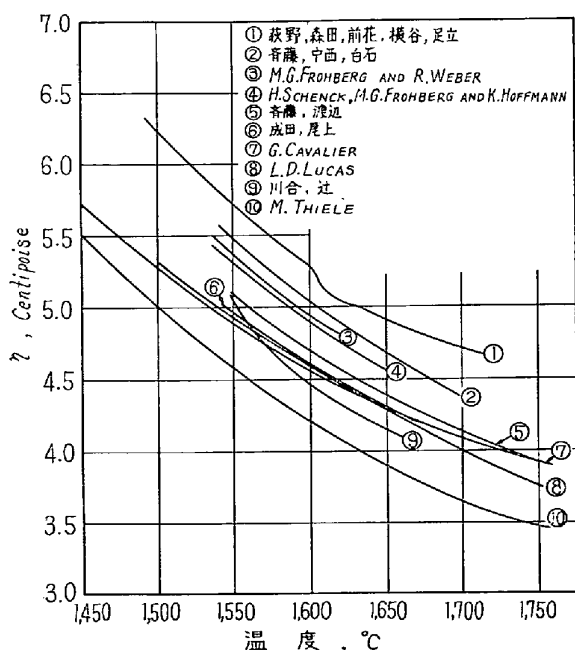


図 2-1-6 溶鉄の粘度の温度変化
(日本鉄鋼協会編：溶鉄・溶滓の物性値便覧)

のみでなく、特殊精錬、連続铸造、溶接などの製造技術はいうにおよばず、鋼の品質との関連の深さから30数年来多数の研究結果が報告され、性質のうち重要なものについては前記物性値便覧にまとめられている。しかしながら、溶鉄と本質的に構造が異なる複雑な事情が介在して、任意組成のスラグにつきすべての性質を予測するという道はたいへん遠い。なお、ここで付言しておきたい1点は製鋼スラグの再生利用である。スラグの機能は安価で優秀な鋼をつくることにはまちがいないが、冶金的な機能のみでなく環境問題にまつわる鉄鋼業の将来に対処する研究方向を考えてゆかねばならない。

(2) ガス-スラグ-メタル系の平衡関係

製鋼に関する諸反応を解析するに当たっては、まずガス-スラグ-メタル系の熱力学的平衡性質が明らかにされていなければならない。各種素反応の平衡状態については、前項同様にたいへん多くの測定値や計算値が報告されており、現場作業に大なり小なり活用されてきた。しかし、それらのデータはある場合に互いに一致せず、誤って使用される恐れもある。日本学術振興会製鋼第19委員会では、このような混乱を極力避け共通の基盤に立つて製鋼の複雑な反応を理解し討議することを目的に、とりあえず現状で推奨できる基本反応の平衡値をまとめ、昭和43年8月「製鋼反応の推奨平衡値」を刊行した。しかしながら、これはすべてが最終的なものとも信頼できるデータとはいえず、将来なお改訂を要するものもあることは論をまたない。なお、本書刊行後の推奨値として、 $4\text{CaO}(s) + 2\text{P} + 5\text{Q} = 4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5(s)$ および $\text{S} + \text{H}_2(g) = \text{H}_2\text{S}(g)$ の両反応につき「鉄と鋼」58巻(1972)9号および10号に報告がある。

上記推奨平衡値は当面鋼の脱酸反応に力点が置かれており、Mn, Si, V, Al, C, Cr による脱酸限度は図2-1-7のようにまとめられている。この他、多くの脱酸元

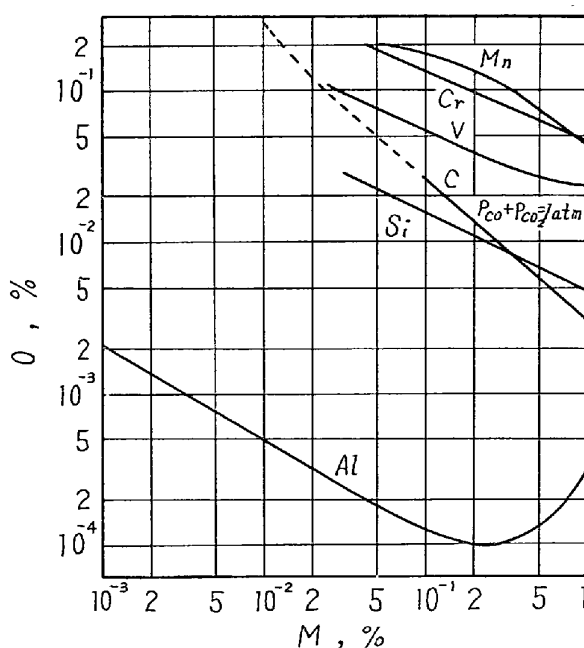


図 2-1-7 脱酸力の比較 (1,600°C)
(学振19委編：製鋼反応の推奨平衡値)

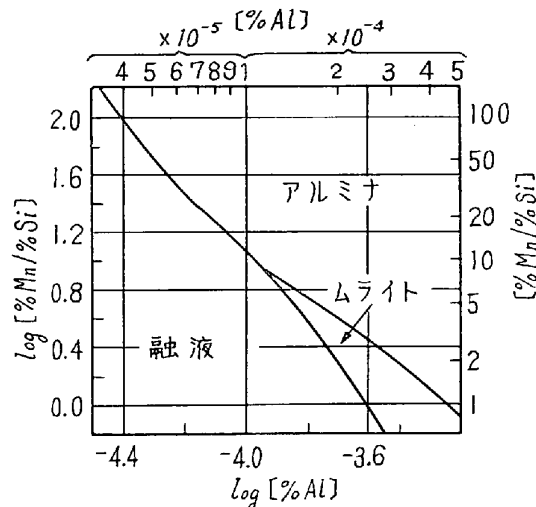


図 2-1-8 溶鋼組成と平衡酸化物組成との関係 (1,600°C)
(% Mn + % Si + % Al = 1 として計算)
(坂尾：鉄と鋼, 56 (1970) 11, p.621)

素について測定例はあるが推奨値決定にはいたっていない。これら脱酸元素の挙動に関連し、溶質原子間の相互作用が検討され使用上の注意事項などもその刊行書に記載されているが、その後濃厚溶液を含めて多成分系溶液に関する熱力学は著しく発展した。さて、図2-1-7においてAlによる脱酸限度は計算値であつて、このような低い酸素値は一般に実現できないことが多く、各種の報告があるとしてもなお今後検討課題を残すものである。これに関連し、Mn-Si-Alによる複合脱酸の平衡酸化物組成が坂尾によつて計算されており、図2-1-8のごとく極低Al領域においても固体 Al_2O_3 が存在することが示されているが、その後研究が継続されて今後の検討が期

待できる。

つぎに、30有余年前 C. WAGNER 他によつて高温域における遷移金属酸化物の結晶理論化学が研究され、その成果はここ10年来鉄鋼製錬の分野で驚くほど実用化への道が拓かれた。とくに、 ZrO_2 や ThO_2 の安定化固溶体を固体電解質として用いる平衡起電力測定技術は、純正化学分野はもちろんのこと、製鋼に関係の深い平衡的性質の決定からさらに動的現象への適用と発展した。たとえば、溶鋼酸素量の測定や雰囲気中の酸素分圧測定にも実用化され計測技術の一つとしてすでに定着した観がある。しかし、平衡起電力測定の誤差など後藤他の指摘にもあるようにすべての問題が解消されているとはいえない。

(3) ガス-スラグ-メタル系の動的過程

この分野は現実の製鋼技術ともつとも緊密な関係をもつものであり、工学としての学問体系も著しくととのつたばかりでなく、技術への貢献度をもつとも高いと考えられる。その具体的な事例として、鋼中非金属介在物の低減を目的に、鉄鋼基礎共同研究会に非金属介在物部会(部会長荒木)が設置され、昭和40年6月よりリムド鋼分科会が、昭和41年6月よりキルド鋼分科会が活動をはじめ数年間学界と業界の共同研究を行なつた。その後連続鋳造への関心が高まってきた背景もあつて、昭和46年3月より凝固部会(部会長郡司)が発足し研究活動を続けている。さらに、新しくは ESR 法など特殊精錬技術の伸長が契機となつて、昭和49年4月からは特殊精錬部会(部会長後藤)が ERS 法の基礎研究を行なつている。また、冒頭に述べた討論会主題のほとんどすべてがこの項に関する討議であるといつてよい。

一例として、溶鋼の脱酸速度およびその機構はこの10年間各層の関心を集め、その経緯については本誌「鋼の脱酸と鋼材の性質」特集号に記載されているとおりである。ことに、脱酸反応の本質的な理解のためには、いわゆる核生成理論にもとづく1次脱酸生成物の生成、成長および浮上分離、あるいはこれを否定して過飽和酸素が凝固時に析出するという考え方、さらには脱酸反応を化学反応律速とする捕え方などがある現状では、今後なお定量的検討への厳しい道が残されていると考えられる。これは、現在の製鋼法が大筋において変わらない限り解消するとは思われない。

つぎに、純酸素上吹転炉法の炉内反応については極めて多くの論文が報告され、森は基本的な問題点を「LD 転炉製鋼プロセスの動力学」¹⁾としてまとめている。これによると、脱炭機構としてこれが火点近傍の限られた領域でおこるとする考え方、泡立ちスラグと粒鉄のつくるエマルジョンが反応界面積の増大に寄与するとする考え方、火点で大量に発生する粒滴に注目する考え方などがあるが、森は熔融銀への酸素吹付けおよび吹込みのモデル実験を解析することによつてガス-メタル間物質移動の問題として捕え、統一的な解釈を試みている。また、スラグ-メタル反応としては脱リン反応の平衡が温度の影響を敏感に受けるという石黒他の研究²⁾が注目される。これは図2・1・9のごとく、スラグ温度とメタル温度にはかなりの差があるので、実測値を説明するにはメタル温度によるべきであるとしている。この他、脱硫、脱窒素

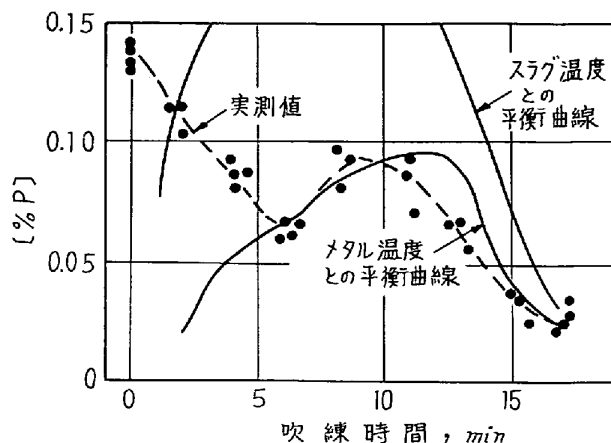


図 2・1・9 転炉吹錬中の P の挙動
(石黒、宮下、根本：鉄と鋼，57 (1971) 4, p.267)

などたくさん問題が山積しており、新しい底吹転炉法への関心とともに基礎研究がさらに活発になることを期待するものである。なお、転炉製鋼はいうにおよばず流動脱ガス、アルゴン吹込み脱ガス、ESR 法などで、金属液滴と気泡の果たす役割がたいへん大きいことが認識されてこの方面の研究が進みつつあり、たまたま第1回湯川記念講演として F. D. RICHARDSON がこの問題を提起している³⁾。

第3の例としては、鋼の凝固過程を挙げるができる。ことに、それが連続鋳造であればなおいつそう動的な過程を辿るからである。金属の凝固理論は、今日なお学問体系としては形態をととのえつつある段階といわれ、それだけ研究者および技術者の意欲を駆り立ててやまないものがある。日本学術振興会製鋼第19委員会においても、早くからこの分野の基礎および応用に関する共同討議に努め、ひとまず相互に使用する用語を統一して研究を促進させる意図の下に、昭和46年8月に「凝固現象の用語辞典」を刊行した。このような機運が熟成するとともに、先に述べた凝固部会の研究活動が次第に活発となり、学術講演会、討論会などの場で真剣な討議が行なわれるようになった。その現時点における集大成は、本誌「鋼の連続鋳造」特集号であると考えられるが、そのなかでは生産の推移、設備および操業の進歩と同時に、その理論的背景ともいべき数々の指針が見受けられる。たとえば、まず金属組織学的手法で解明されつつある鑄塊の凝固組織である。これは、溶鋼の流動や冷却速度などを推定する基本的な情報である。また、鑄片の各種欠陥とその防止対策には、パウダー(スラグ)や鋼中ガスの性状、挙動が重要な役割を果たすことが指摘されている。このような、いわゆる冶金学的な観点に加えて動的なモデル解析が各所で試みられていることも特記事項の一つであろう。これは、すでに製錬プロセスについては10年来鋭意研究され、その1部はプロセス制御に実用化され著しい成果を挙げていると思われるが、凝固現象への拡張は比較的最近のことであり、またこれが固液共存状態で流動を伴ないながら伝熱が行なわれるのでたいへん難問であることも確かである。その一つの試みとして、大井他の計算⁴⁾によると、注入温度を変えた

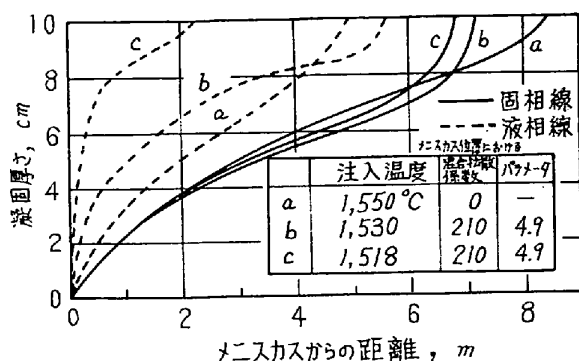


図 2-1-10 凝固厚さの計算結果
(大井, 松野: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 807)

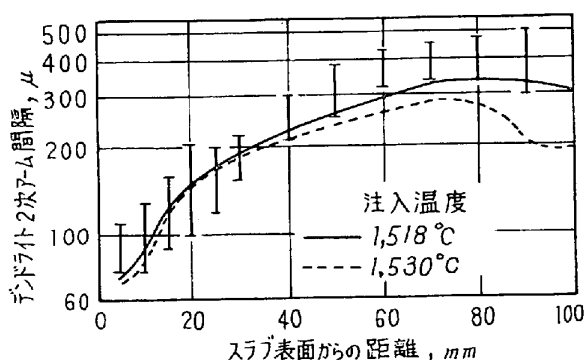


図 2-1-11 デンドライト2次アーム間隔の
測定値と計算値の比較
(大井, 松野: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 807)

場合の凝固厚さは図 2-1-10 のごとくであり, またこれから計算したデンドライトの2次アーム間隔は注入温度 1,518°C において実測値と一致すると述べている(図 2-1-11 参照). この1例を含め内外において優れた研究成果が増告されているが, 今後さらに精緻なモデル解析が発展し鋼質の向上に寄与することが期待される.

(4) 耐火物の関与するガス-スラグ-メタル系反応

上記の2項または第1項も含めて, 耐火物が関与しない製鋼は特殊な精錬を除き事実上ないといつてよいが, ここではとくに真空処理に関連した事項を述べておきたいと思う. 製鉄も含め鉄鋼とかわり合いの深い耐火物の全般的な進歩なり問題点は, たとえば宗宮の収録⁵⁾によつて伺い知ることができるからである.

よく知られているように, 炭素による溶鋼の真空脱酸はその限度が図 2-1-5 の理論平衡値にいたらず, 耐火物の解離とか溶鋼との反応を主原因の1つに挙げることができる. すなわち, 耐火物の化学的な安定性, 気孔率, 粒度, 高温強度, 揮発性, 耐摩耗性, 熱衝撃性など物理的, 機械的な性質を考慮しながら, 真空下における耐火物の高温挙動が研究され清浄鋼の製造に貢献している. これらの事情は, 近時工業技術として定着しつつある取鍋精錬においても全く共通であり, 基礎研究として要望されているのは, 耐火物構成成分の相平衡, 耐火物使用後の変質層の微視構造を解明しながら苛酷な使用条件との均衡に指針を与えることであろう.

以上, 限られた側面ながらここ10年間の足跡を概観し将来に向けての課題を, 細分された4項目の基本テーマ

に関連させながら考察した.

文 献

- 1) 森一美: 鉄と鋼, 60 (1974) 10, p. 1,560
- 2) 石黒守幸, 宮下芳雄, 根本秀太郎:
鉄と鋼, 57 (1971) 4, p. 267
- 3) F.D.RICHARDSON: 鉄と鋼, 59 (1973) 12, p. 1,487
- 4) 大井浩, 松野淳一: 鉄と鋼, 60 (1974) 7, p. 807
- 5) 宗宮重行: 鉄と鋼, 60 (1974) 5, p. 557

2-1-3 将来の展望

(1) はじめに

戦後の日本鉄鋼業は飛躍的な発展を継続し続け, すでに述べたように, 昭和48年度はついに粗鋼年産1億2千万tの大台を突破した. しかしながら, 一昨年10月に端を発した石油問題から急速にエネルギー事情が悪化し, 改めて鉄鋼業ならびに鉄鋼技術のあり方に真剣な疑問が寄せられ, 多エネルギー消費型産業から省エネルギー型産業への質的変換を考慮せざるをえなくなつた.

戦後一貫して, 共通していた日本鉄鋼業発展の因子は

- 安価な資源, エネルギー
- 豊富な労働力
- 有利な立地

であつた.

この優位性は, 今後10年くらいの間には大きく変化するものと考えられ, われわれが日本鉄鋼業の将来を考えるに当たつては, 次の諸点に留意しなければならない.

- 1) 原料資源, エネルギーの高価格と入手難
- 2) 労働事情に伴う省力化
- 3) 公害に代表される立地環境

原燃料事情については, すでに1.2で述べたが, 特に製鋼原料に限定すると, 銑鉄あるいはスクラップはさておき, まず副原料の入手難ならびに価格上昇が挙げられる. Al, Fe-Si, Fe-Mn, Fe-Cr などは製鋼作業に欠かせないものであるが, その多くが製造過程において多量の電力を消費する. したがつて, 省資源の面からも省エネルギーの面からも今後の大きな問題となる.

一貫製鉄所において, 製鋼部門が消費する一次エネルギーは全体の中でそれほど多くはなく, 特に高炉部門のそれに比べると寄与は小さいといわれているが, 二次エネルギーや副原料までを考慮すると決して無視しえない. 今後の製鋼プロセスを考慮する上で大きなウェイトを占めることは必然である.

第2は, 労働事情の量的および質的転換である. これは現在すでに深刻な問題として受け止められているが, 単に新しい労働力の確保という問題のみならず, 従来の労働力のより合理的な再配置の問題も提起されている. いかに積極的にプロセスを見直し省力型に切換えていくかが, 今後の発展の鍵となるであろう.

第3は環境の問題である. 一昨年7月に産業構造審議会鉄鋼部会, 「1970年代の鉄鋼業およびその施策のあり方」というテーマについての中間答申を行なつた. この中で70年代の鉄鋼業が解決しなければならない最大の問題は, 環境汚染問題であると強調している. 鉄鋼業における環境汚染としては, SO_x, NO_x, 粉塵などによる大

気の汚染、水質汚濁、騒音および廃棄物などがあり、年々これらの対策に投ずる資金は増加の一途をたどっている。

以上、鉄鋼業を取巻く外的条件の変化について概括したが、一方内的条件として、需要家から望まれる鋼材の要求も年々高度化し、海洋構造物や原子炉用鋼板などにみられる材質上からの要求もさることながら、省エネルギー、省力化などの観点から鋼材需要に対する変化も多く、たとえば、溶接効率向上のための大入熱溶接用鋼や、加工工程省力化のためのブリキの2ピース缶、あるいは低騒音化のための高級電磁鋼板などがそれである。これらの材料面への要求は、今後ますます高級化し複雑化していくことが予想される。

将来の製鋼技術は、このように多様化する鋼材材質の要求を満足しつつ、その製造プロセスにおいては、省エネルギーあるいは公害防止の面に重点をおかなければならない。このような観点から、これまでに幾多の新技术の開発研究がスタートしている。

以下、項目別に将来の製鋼技術を展望してみる。

(2) 連続製鋼法

連続製鋼法の最大の特徴は、製鋼反応の計測、制御が容易であるという点にある。これにより大量生産が可能となり、省力化が期待され、さらに製品品質の均一化が促進されるといわれている。製鉄工程全般をながめてみても、高炉、連続铸造、ストリップミルなど逐次プロセスは連続化されつつあり、製鋼反応プロセスもその例外となりえない。ただ現在のLD転炉の生産性が極めて良好であるため、単に連続プロセスであるというだけでこれに取って代わることは困難であり、それなりの長所が要求される。

現在、技術的に可能であるとの見通しのもとに報告されている連続製鋼法としては、BISRA (英国)における噴霧製鋼法や、IRSID (フランス)における転炉型製鋼法、あるいはオーストラリアにおけるWORCRA法、さらにわが国における金材技研式製鋼法¹⁾がある。

その詳細は2・5・2で述べられているが、基本となるものは酸素製鋼であり、まだ実験炉の域を出ていないが一応の成果が得られている。これは各単一反応炉を連続的に組み合わせた形式であるが、いずれの方式でも、単一反応炉内の特定の反応の効率や混合特性、さらにはマスコントロールに重点が置かれている。たとえば、脱磷には塩基性耐火物を用い、脱炭には酸性耐火物を用いるという工夫がなされており、また、マスコントロールのためには樋型反応炉を用いている。

実験結果の一例として、脱磷効率が極めて良いことが報告されている。これは優先脱珪の結果、スラグ中のSiO₂が高くなり、スラグの流動性と発泡性が優れているためと、単一反応炉であるために復磷が完全に防止できるためである。IRSIDではスラグ中にFe粒が分散し、スラグ-メタルの反応性が良好であることを示唆している。脱磷能の一例を図2・1・12に示す。いずれもLD転炉の脱磷率よりも良好で、0.010%以下の[P]も可能である。

今後の問題としては、連続プロセス特有の流量制御、あるいは、当然のことながら耐火物との接触面積が大きい

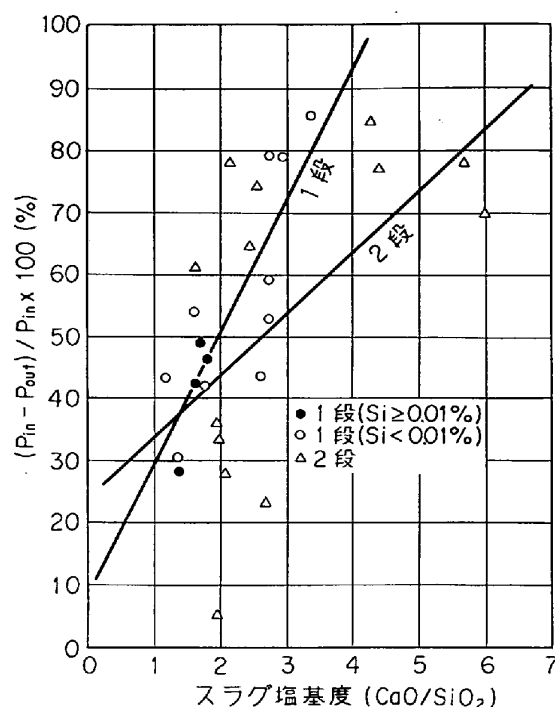


図 2・1・12 脱磷率とスラグ塩基度の関係
(L. Von BOGDANDY; Stahl u. Eisen, 92 (1972) p.1,069)

くなるための耐火物原単位の問題、さらにこれが実用炉として採用されるためには、スケールアップした段階での生産性および必要エネルギーを含めた総コストの低減、そしてより単純なハンドリングなどの考慮が必要となる。いずれにしても、今後5～10年後には真剣に論議されるべき技術であろう。

(3) 還元鉄の利用技術

すでに述べたように、今後の鉄鋼業の発展を左右する因子として、省資源、省エネルギーの問題があり、これを受けて、溶解、精錬技術も当然大きく変わらざるをえない現在、粗鋼を製造する方式には次のものがある。

1) 高炉-LD転炉法

2) 直接還元-電気炉法

前者は、いうまでもなく、現在世界の粗鋼のほとんどがこの方式で生産されているが、後者は、近々10年くらいの間に発達してきた技術であつて、今後の動向が極めて重要なプロセスである。

この直接還元-電気炉法の今後の伸びを決定する因子は、単に製鋼技術上の問題にとどまらず、製鉄全般にわたる基本的な問題であるため、極めて複雑で流動的であるが、高炉-LD転炉法の行方を決定する原料炭の問題、あるいは還元ガス製造技術の確立、さらには電力コストなどによって決まってくるであろう。

前二者はすでに述べられているので、ここでは溶解、精錬に絞って今後の技術動向を述べてみたい。

還元鉄(またはスポンジ鉄)を主原料とするプロセスはスクラップと同様、電気炉を用いるのが普通である。高炉-LD転炉法を支配する良質の石炭、鉄鉱石の今後の動向と、さらにはスクラップの量とコストの動向によつては、これまでのスクラップを主原料としていた電気炉法へ還元鉄を利用するという観点からの総合的な見直し

表 2・1・1 高炉-LD転炉対電気炉法のコスト比較

条 件 コ ス ト	高 炉 - L D 法	電 気 炉 法	
	高 炉 1 基	200 ^t (75MVA) UHF×4	
	LD転炉 200 ^t ×2	100% スクラップ	60%スクラップ +40%還元鉄
総投下資本	43,565百万円	20,490百万円	
投資コスト	21,783円	10,245円	
生産能力トン 当り投資コスト	5,228円/t	2,459円/t	
固 定 費			
変 動 費	22,905円/t	23,825円/t	24,945円/t
総 コ ス ト	28,133円/t	26,284円/t	27,404円/t
備 考	スクラップ, 還元鉄価格 ¥ 15,000/t 電力費 ¥ 3,8/kWh		

(G. A. SCHNEIDER: 鉄と鋼, 50 (1974) 5, p. 549)

が必要となる。このスクラップの量の伸びと粗鋼生産量の伸びとの相対比較から、また溶銑コストとスクラップおよび還元鉄のコストの相対比較から将来の電気炉技術の方向が決まるが、これは逆にいえば、製鉄所自体の規模とも大きく関連する。

L. VON BOGDANDY²⁾ は、各粗鋼生産規模に応じて製鉄所のイメージを描いている。年産500万t以上の規模の製鉄所では高炉-LD転炉法が有利であり、年産40~50万t規模の製鉄所では還元鉄-電気炉法が有利であるとしている。また、中間規模の製鉄所では電気炉、LD転炉法の共用も考えられる。また最近 G. A. SCHNEIDER³⁾ は、今後6年間に200万tの増設を行なう場合の経済性の比較を行ない、表2・1・1の結果を得ており、いずれの方法も極めて接近した値となつている。これは今後のエネルギー、資源条件、公害技術の動向などによつて左右されるが、電気炉法、特に還元鉄を主体とする電気炉技術はいつその発展が期待される。

還元鉄による電気炉技術の中心となるものは

- 1) 還元鉄の溶解、精錬技術
- 2) 電力コストの低減

の二点で、まず1)に関しては広義の冶金技術であり、還元鉄の投入方法、還元鉄の性状(脈石含有率、還元率)などが大きく関与するが、現状ではほぼ技術的に満足できる状態にまでできているといえよう。むしろ電力コストの面からの問題が大きい。もちろん、原子力製鉄の一環としての原子力発電の場合には大きく事情が変化するが、当面の問題としては、UHPによるコスト低減と、低周波溶解炉による連続溶解が挙げられよう。

(4) 転炉技術

すでに述べたように、過去15年間の転炉技術の発展は目覚ましいものであり、炉容拡大ならびにそれに伴う生産性の向上、吹錬技術、耐火物の発展などがその主たるものである。

今後の転炉技術の発展は、高級鋼、特殊鋼の溶製技術と、AOD、Q-BOPなどに代表される底吹転炉法、さらにはクローズドシステムの完成が主要な問題点となる。

転炉による特殊鋼溶製はここ10年の間にかなり進歩し、高炭素鋼、低合金鋼を始めとし、珪素鋼、ステンレス鋼も容易に溶製しうる技術が確立している。これは、後に述べる各種の取鍋精錬技術や、炉外予備処理技術との組み合わせにより、電気炉鋼に匹敵するような品質の鋼が得られるようになったことが大きく寄与している。この傾向は今後とも伸びると思われるが、さらにはLD転炉と取鍋精錬技術、脱ガス技術との組み合わせにより、効果的にかつ単純化することによつてもますます拍車がかけられるであろう。

次に、底吹き転炉に関してであるが、Q-BOP、AODなどがすでに発表されており、一般に製出鋼歩留の向上、低ダスト、低建設費などの利点が挙げられているが、まだ大型転炉での実績が少なく、今後の動向を十分見極める必要があるが、炉内反応や耐火物技術、あるいは二重管ランスによる吹込み技術など、新しい技術の発展要素を含んでおり、期待される技術の一つといえよう。

また、原料事情の制約から溶銑の燐含有量は今後ますます高くなることが予想され、転炉における脱燐作業の負荷を軽減する上からも、予備処理法、あるいは取鍋処理法による新しい脱燐技術が開発されなければならない。

さらには、酸素濃淡電池の利用に見られるように、成分のコントロールが[O]のみならず、[C]、[S]、[P]など他の元素にも応用できる可能性がすでに示唆されており、今後の発展が期待される。また、これらとコンピュータとの組み合わせによる、より進歩した形でのダイナミックコントロールも可能となるであろう。

(5) 取鍋処理技術

従来、取鍋処理技術としては真空脱ガス法に代表されていたが、近年高度の品質要求や転炉での特殊鋼精錬、さらには厳密な成分コントロールの要求から、真空脱ガス法と合成スラグ処理との組み合わせや、あるいは、アルゴンガスバブリングや酸素ガス吹込みなどによる精錬技術が発達し、その工業的方法もLD-VAC法や、ASEA-SKF法、LF法、VAD法に代表されるように多岐にわ

表 2・1・2 連铸技術の今後

項 目	内 容	関 連 技 術
生産性向上	高 速 鑄 造	冷却法, 品質 (内部割れ)
	多 連 鑄	レイアウト, 耐火物
	直 接 圧 延	温度コントロール, 表面品質
品質向上	中 心 偏 析 介 在 物	電磁攪拌, 低温鑄造技術 流動パターン, 脱酸技術
多 様 化	パイプの連铸 ビームブランク	高度のマシン制御技術
自 動 化	自 動 鑄 造 凝 固 コ ン ト ロ ー ル	検出端の開発

たっている。これらの方法により、極低炭素鋼やステンレス鋼のような高合金鋼まで溶製可能となり、同時に鋼の清浄度も著しく向上するといわれている。

今後は、対象鋼種の拡大を図るとともに各素反応の理論的追求が必要となり、より効果的で単純なシステムへの移行を目指した開発が必要となるであろう。

(6) 連続鑄造技術

過去10年間の連続鑄造の発展には目をみはるものがある。すでに述べたように、昭和40年には10基に満たなかったものが、昭和48年には93基程度にまで増加し、それに伴って粗鋼生産量の20%程度が連続鑄造化されるに至った。今後とも省エネルギー、省力、作業環境の面からますます発展する技術である。ちなみに、連铸化の速度を平炉のLD転炉化の速度と比較してみると、極めて近い速度で推移していることがわかり、今後ともかなりのスピードで発展していくことが期待されよう。

さて、連続鑄造における今後の技術の動向は、表2・1・2に示したように大きくまとめられよう。生産性については、これまで連続鑄造の一つの欠点とされていたものであるが、LD転炉の大型化に伴ない、多ストランド、多連铸鑄造も行なわれるようになってきており、今後の焦点は、できるだけ断面の大きな铸片を高速で鑄造するための技術開発が中心になるであろう。

現在のところ、大断面の铸片を高速で鑄造している例として、U. S. Steel の Gary 製鉄所の、235×1,930mmのスラブを2.0m/minで鑄造している例が挙げられる。今後この技術を発展させるためには、均一で強力な冷却方法の開発、特にブレークアウト防止のためのモールド内およびモールド直下での冷却技術と、高速鑄造時の铸片品質、特に内部割れの防止技術の開発が必要となる。これらに関して、各種の連続鑄造機にわたつての研究が総合的に進められており、冶金的知見と設備的データとの結合により、より高速鑄造に適した機種の開発が期待される。

連続鑄造法における品質上の制約は近年次第に克服されており、低炭素アルミキルド鋼、リバンド鋼を始めとして、低合金鋼、ステンレス鋼、珪素鋼に至るまで連铸化されているのが現状で、今後も中心偏析や介在物の低

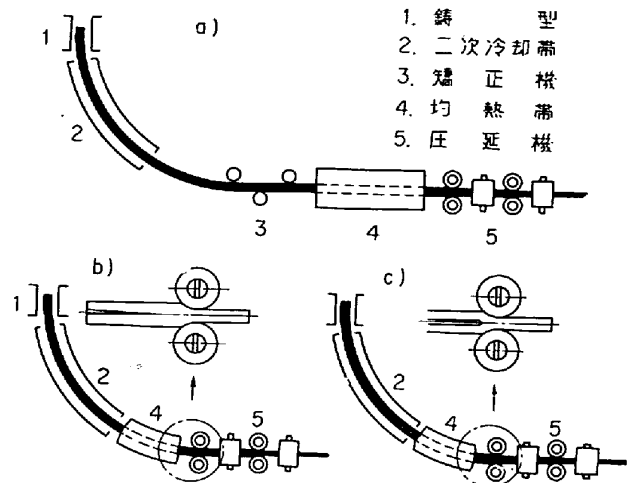


図 2・1・13 連铸圧延 (インライン・リダクション) 法の概念図
(B. TARMAN; AISI, Meeting (1971), Sep.)

減によつて、さらに連铸化される鋼種が増加するものと考えられる。

さらに、スラブやブルーム、ビレットのみならず、ビームブランクもすでに実用化されており、パイプ素材の中空铸塊の連铸化も、実験的な段階を終え、工業化も目前に迫っている。

また、連続鑄造の持つ欠点の一つとして、寸法サイズの制約が挙げられるが、これに対しては、铸型の迅速交換システムや、鑄造時の幅可変铸型の開発が行なわれており、さらには、ダイレクト圧延による寸法のコントロールも採用されつつある。これは、すでに U. S. Steel の Gary 製鉄所や、South 製鉄所で実施されているが、今後は単にサイズの変更のみならず、次工程の加熱工程をも省略しうる画期的な方法への飛躍が期待されよう。その具体例を 図 2・1・13⁴⁾ に示す。

さらに、連続鑄造工程は自動化に極めて適した工程であり、操業技術や計測制御技術の進歩によつて、急速に自動化が進むものと思われる。これには、湯面レベル制御や、冷却、油圧、温度制御、さらに凝固シェルの測定などによる全鑄造制御システムの完成が必要である。

(図 2・3・24 参照)

(7) 特殊溶解法

航空機、原子力、宇宙開発、海洋開発などの進歩によつて次第に超高級鋼の需要が増え、量産化が要求されつつある。

従来、高級鋼の溶製方法としては、真空誘導溶解法 (VIR) や、真空アーク溶解法 (VAR) などが代表的であつた。しかし、近年、エレクトロスラグ再溶解法 (ESR) や、プラズマアーク溶解法 (PAM)、電子ビーム精錬法 (EBR) など種々の溶製方式が開発、または実用化されている。

それらの比較はすでに述べたが、いずれも高清浄度鋼の溶製に適しており、得られる材質は極めて優れたものである。それぞれの方法には個々の長所があり、たとえば ESR は最も清浄度が高いといわれており、PAM は高級鋼の量産化に適し、また EBR は高融点材料の溶解

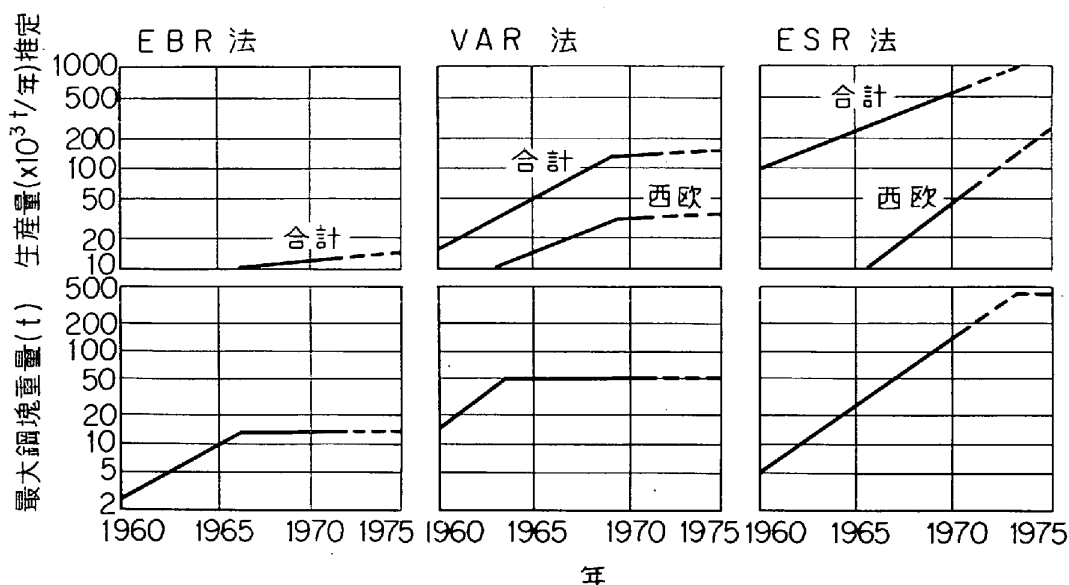


図 2-1-14 特殊溶解精錬法の生産量と最大鋼塊重量の推移
(M. WAHLSTER; 鉄と鋼, 60 (1974) 2, p. 296)

に適しているといわれている。いずれも注目すべき新技術で、今後の発展が期待されよう。参考までに、各方法の生産能力と鋼塊単重の推移を 図 2-1-14⁵⁾ に示す。

今後の問題としては、各方法に共通するコスト高の改善はもとより、ESR に関しては凝固プロセスの制御技術、VAR, EBR については連続溶解- casting 技術の開発などが挙げられる。

(8) 結 び

以上、個別に将来の製鋼技術の動向について述べたが、従来の製鋼技術は主として欧米からの導入技術が主体であったが、今後は日本の自力開発にウェイトをおかなければならない。

これに際してポイントとなるのは、常に周辺技術の動向を把握し、共に発展していくことが不可欠であり、特に耐火物の開発や、計測制御技術の発展はその基本となる。また、将来技術の動向を見極めるためには、いろいろなプロセスの長所、短所を理論的に整理する必要がある。精錬、造塊の基礎理論、たとえば、スラグ-メタル-ガスの相互反応理論や凝固理論などの今後の発展が切望される。

さらに、初めに述べたように、省エネルギー、公害などの環境条件を常に考慮に入れながらの技術開発が必要であることから、製鋼工場からの各種廃棄物、たとえばスラグの有効利用なども、真剣に取り組まなければならない時期に来ているといえよう。このようなことを考え合せると、各開発担当者が専門分野に偏することなく、広く衆知を集め、総合的に取り組むことが従来にも増して必要となってくるのではなからうか。

文 献

- 1) 中川, 吉松, 上田他; 鉄と鋼, 59 (1973) 3, p. 414
- 2) L. VON BOGDANDY; Stahl u. Eisen, 92 (1972), p. 1069
- 3) G. A. SCHNEIDER; 鉄と鋼, 50 (1974) 5, p. 549

4) B. TARMAN; AISI, Meeting, (1971), Sep.

5) M. WAHLSTER; 鉄と鋼, 60 (1974) 2, p. 296

2.2 製 鋼 法

2.2.1 製鋼法の推移

純酸素上吹転炉の出現は、製鋼分野では19世紀の溶鋼製造法の発明以来の画期的変革であると言われる。1952年末にオーストリアで実現したLD法は1957年(昭和32年)わが国にいち早く導入され、当時よりスクラップ需給に悩んでいたわが国で世界にさきがけて急速に普及したことは周知の事実となつている。

わが国における純酸素上吹転炉法の急速な発展の理由は主として以下に挙げられよう。

(i) わが国の大戦後の復興国策としての工業立国による鉄鋼需要の急速な伸び、およびこれに伴う新規生産設備の設立に際し、LD法の出現が時機を得たこと。

(ii) 海外資源が比較的安価に入手でき、かつこのための輸送コスト減を計るため、大量運搬方式が確立され、臨海大型製鉄所の立地条件に恵まれていたこと。

(iii) LD法の特色として、操業が他製鋼法に比べ単純で生産性の増加に大きな困難が伴わず、製出鋼種の幅が大きく、品質上、平炉鋼に比べ、特にガス成分が低く優れていること。

(iv) 高炉の操業技術が進み、大型化、量産化、コスト低下に大きく寄与したこと。

(v) 労働賃金の上昇に対し、生産性の増加、省力化が可能であったこと。

(vi) その他、周辺技術の発展

すなわち1962年頃からわが国の転炉は大型化を指向し、生産性の向上を目指した。これらの状況を世界の主要製鉄国である米国、西独に比較して 図 2-2-1 に示した。わが国の転炉の大型化はこれらの諸国に比べ着実に