特殊溶解精錬プロセスの現状

小 野 清 雄*

On Present Situation of the Special-Melting and Refining Processes

Kiyoo Ono

Synopsis

An outline of the present situation of the special-melting and refining processes used for the production of special steel, superalloy and special metal will be described in two different fields of mass production and small production.

Also the trends of the new processes will be described with some technical and economic discussion.

1. 結 言

特殊鋼の製造において、最近の特殊溶解精錬プロセスの発展は目覚ましいものがある。特に転炉、アーク炉などで一次溶解精錬された溶鋼を、更に処理する所謂炉外精錬(Secondary refining)技術の発展は、一次溶解精錬炉に果せられていた鋼材品質水準の確保向上の責を軽減すると共に鋼材品質水準の向上に現在飛躍的に寄与しつつある。このような炉外精錬技術の進展は、高品質特殊鋼の溶解精錬専用炉としてのアーク炉の立場を急激に変化させつつある。

更に、加熱攪拌機能を備えた ASEA-SKF, VAD (FINKL-MOHR), LF などの出現は、Clean steel の量的溶製を容易にし、従来主として真空誘導炉(VIF)で溶製されていた、場合によっては、アーク炉溶製材の真空アーク再溶解(VAR)もしくはエレクトロ・スラグ再溶解(ESR)が用いられていた高級高品質鋼の製造プロセスの分野

にすら大きな変化をもたらしている。また、真空誘導炉溶解(VIM)やVAR, ESRが普通とされている難熱間加工高級鋼や超合金などの高品質を要求される高級材料の溶製プロセスの分野でも、より高品質が得られるプロセスあるいはより安価なプロセスの確立が追求されつつあり、電子ビームやプラズマ・アークなどを熱源とする新しい溶解精錬プロセスが出現している。

この様に量産特殊鋼と少量生産される高級材料の両分野にわたり用いられている特殊溶解精錬プロセスの多様さは百花繚乱の感があり、到底限られた紙数で記述することは不可能である。幸い個々の分野のプロセスもしくはプロセスの個々に就いては優れた解説あるいは論文が多く報告されているので、本解説では、特殊溶解精錬の現状についての包括的な解説に留める。

2. 量産鋼分野における炉外精錬

現在では、転炉やアーク炉で溶製されている構造用低合金鋼のごとき量産特殊鋼でも、転炉あるいはアーク炉精錬が最終精錬工程となる製造プロセスはむしろ例外となり、更に真空処理もしくは

それに代る炉外精錬処理を通ることが一般的になっている。その背景として考えられることは、第1にユーザー・サイドの品質要求が一段と厳しくなったこと、第2に真空機器の製造技術などの周辺技術の進歩がある。周辺技術の進歩は、真空処理もしくは他の炉外精錬処理を行っても、材料の一貫製造工程を通してした場合有利と考えるまでの処理費の低減を生みだした。

2.1 RH, DH

量産鋼の分野で最も汎用されている炉外精錬プロセスは、所謂、吸い上げ真空精錬法であるRH, DHの両プロセスである。これらの狙う効果は、真空系による脱水素効果は勿論、脱炭、脱酸、合金添加と成分調整、介在物の浮上分離など多岐にわたっている。これらの効果は、両プロセス共に溶鋼の吸い上げ循環と攪拌混合の機能に基づくものである。

両プロセスを比較してみると、DHは、通常1本の浸漬管を有する真空槽を昇降させて取鍋内溶鋼を吸排出するもので、吸い上げ溶鋼量と昇降回数(周期)とから溶鋼循環量は容易に求まる¹⁾。RHは、複数の浸漬管(通常2本)を有し、アルゴン吹き込みによるガスリフトポンプの原理で吸い上げ浸漬管より溶鋼を真空槽内へ吹き上げ、排出浸漬管から溶鋼を取鍋内に戻す方式で、真空槽に常時溶鋼が存在する連続部分真空処理法である。

RHの利点は、真空槽内に常時一定の深さの溶鋼が真空処理中に存在するため、例えばRH-OBプロセスのように、真空槽内の溶鋼に酸素、アルゴン、窒素、オイル、石灰粉などの吹き込み処理が可能なことである。従って単なる脱ガス混合装置としてではなく、より積極的な反応容器として真空槽を利用できる。また真空槽を処理中に何回も昇降させる必要がないため、DHに比較して設備費が一般に安い。更に溶鋼の環流混合特性はDHより複雑であるが、最近この面に関していくつかの研究がなされた^{2)~4)}。その結果、モデル研究や実測などで、RH処理時の溶鋼の鍋内混合特性や所定の環流速度を与えるための浸漬管部の設計基準が明確化されつつある。鉄鋼の迅速成分分析法などの進歩などもあり、操業標準を厳密に作成することにより、DHと同精度で成分コントロールが可能となっている。また、初期の固定式真空槽では長時間を要した真空槽下部の耐火物の補修

も、最近では真空槽移動式の Quick change 方式が採用されており、新しい真空槽への交換が30分以下で可能になり、処理能率向上に大きく寄与している。以上の様な理由から、世界的には早期に開発されたDHの設置基数が80基余とRHの50基余よりまだ多いが、日本では、昭和50年以降RHの設置基数がDHの設置基数を上まわっている⁵⁾。

RH, DH両プロセス共今後の課題は、真空槽内反応を促進するための手段の活用拡大とそれに伴う苛酷な条件による耐火物寿命低下を防ぐための耐火物材質の改善と設計施工法の改善である。

2.2 各種取鍋精錬プロセス

現在製鋼技術の花形となっている取鍋精錬プロセスは、大別すると取鍋中の溶鋼を加熱攪拌する方式と単純に取鍋内にガス、合金や精錬剤を導入して溶鋼の成分コントロール、介在物の組成コントロール、脱酸、脱硫を図る簡単な取鍋精錬方式となる。

これらの取鍋精錬プロセスの思想は、取鍋内にポーラス・プラグを取り付け、単にアルゴンを吹き込み、脱硫と脱ガスを図った取鍋処理法にその端を発すると思われる⁶⁾。この方法は、フランスでは、大気圧下のアルゴン吹き込みを Gazal 法、真空下のアルゴン吹き込みを Gazid 法と区別して呼ばれていた⁷⁾。

製鋼作業のポイントは、ガス成分を含めた溶鋼成分コントロールと溶鋼温度コントロールであるが、アルゴン吹き込みによる温度降下を補う思想が、ASEA-SKF, VAD, LFなどの加熱攪拌プロセスの発展を促した。他方、温度低下が余り起らない内に迅速に合金添加や精錬処理を行い添加元素の歩留向上と介在物の浮上分離を図る思想が、WF, ABS, SCAT, TNなどの脱酸剤もしくは合金材の迅速添加法やCAS, SAB, CABなどの一連の改良 Gazal 法の開発につながったと考えられる。

Fig. 1 に各加熱攪拌プロセスの概念図を示す。ASEA-SKF は、必要に応じてアルゴン吹き込みを併用しているが攪拌の主力をスターラーによる電磁攪拌に負っているのに対して、VAD およびLFは、取鍋底に設置したポーラス・プラグによるアルゴン・バブリング攪拌に依存している。VAD は1~300Torr程度の減圧下でアーク加熱

Fig. 1. Schematic sketch of ASEA-SKF-, VAD- and LF-processes.

を行うプロセスである⁸⁾。それに対して ASEA-SKF, LF は加熱処理後に減圧処理を行うのが一般的なプロセスである⁹⁾¹⁰⁾。いずれのプロセスも還元性スラグによる脱酸脱硫処理を十分に行うことにより、鋼の清浄度の向上⁸⁾¹⁰⁾、機械的性質例えば軸受鋼の転動疲労強度⁹⁾の向上が可能であると報告されている。

簡単な装置・方法により取鍋精錬を行う方式には Al, Ca, REM などの強力な脱酸剤や CaC_2 , 特殊なフラックスなどの特殊添加剤を溶鋼に効果的に添加しようとする方向のプロセスと、Gazal 法の欠点である取鍋内容鋼の湯面変動による再酸化の防止を目的に露出湯面部分を若干なりとも不活性雰囲気下に置いて介在物の浮上分離を図ると共に副次的に添加剤の効果的添加を図ろうとするプロセスとに大別される。前者に属するのが WF¹¹⁾, ABS¹²⁾, SCAT¹²⁾, TN¹³⁾ の各プロセスであり、後者に属するのが CAS¹⁴⁾, SAB¹⁵⁾, CAB¹⁵⁾ の各プロセスである。Fig. 2 に各プロセスの概念図を示す

この種の取鍋精錬の試みは、今後益々拡大する方向を辿るものと思われるが、取鍋精錬の進展と共に今後開発が望まれることは、造塊工程の再汚染を防ぐ非汚染造塊プロセスの確立であろう。

3. ステンレス鋼製造分野における特殊溶解

近年最もはなばなしい変革をとげたのはステンレス鋼の溶解精錬プロセスである。従来のアーク炉単一溶解によるステンレス鋼の製造は、いまや全く古い手段となってしまった。一次溶解炉と連動操作される AOD, VOD, RH-OB, CLU などの新プロセスが新しい担手となった。

しかし、これらの新しいプロセスも、その基礎とするプロセスの熱力学的原理は、アーク炉リターン法のそれから容易に推定されるものである。即ち、Hilty¹⁶⁾は、リターン溶解法の根拠として、溶鋼中の C, Cr の濃度 [%C], [%Cr] (wt), と溶鋼温度 T (°K) および雰囲気中の CO 分圧 P_{CO} (atm) との間に次式の関係が成立することを見い出している。

$$\log [\% \text{Cr}] \times P_{\text{CO}} / [\% \text{C}] = -15200/T + 9.46$$

この関係を 18%Cr の溶鋼に限定して図示すれば Fig. 3 のようになる。Fig. 3 は、18%Cr の溶鋼が図の B C E F 点で構成される面より軸 A D に近い領域の温度、CO 分圧、[%C] の条件にある場合 Cr は酸化され、同面より軸 A' D' に近い領域条件の場合は酸化されないことを示す。さらに温度を仮に 1600°C, 2000°C に限定して考えれば、Cr が酸化されない CO 分圧、[%C] の条件は高温ほど緩和される。従って Cr の酸化を抑えるには、第

Fig. 2. Schematic sketch of other various simplified ladle refining processes.

Fig. 3. Relation among P_{CO} , [%C] and temperature for 18%Cr molten metal derived from Hilty's equation.

1の方法は溶鋼の温度を上げることである。この思想が従来のアーク炉のリターン溶解法にかされてきた。式および図から明らかによみとれるもう一つの方法は CO 分圧を下げることである。現在脚光を浴びているプロセスは、この原理に従うものである。ただ、 CO 分圧を下げる手段として、

減圧、不活性ガス、水蒸気などが利用されている点が異なっている。それによって装置、反応速度特性、操業能率に相異が生ずることになる。

3.1 真空酸素脱炭プロセス (VOD)

このプロセスは、Witten プロセスに代表される。Witten プロセスは Edelmetall werk Witten AG と Standard Messo AG とによる1962年ころからの共同開発によるものである。アーク炉内で $0.5 \sim 0.6\%$ Cまで酸化精錬を行った溶鋼を取鍋に出鋼し、真空槽に収容し、 $0.2 \sim 0.1$ atm 以下に減圧し、鋼浴表面に酸素を上吹きする方式である。このとき鋼浴表面にスラグが存在しない方が望ましいので、酸素吹精前の溶鋼の Si 含有量が少ない方が好ましい。取鍋底部に存在するポーラス・プラグからのアルゴン攪拌が併用されている。最近の Fe-Cr-C 浴の脱炭に関する報告には、脱炭反応は溶鋼中の C もしくは O の反応界面への移動律速とする説もあり¹⁷⁾、脱炭速度が溶鋼の攪拌強さに依存することを示唆している。従って効率的な脱炭処理を行うには、プロセスの気相の CO 分圧の低下もさることながら溶鋼の攪拌機能も重要である。

Fig. 4. Change of composition of exhaust gas and pressure in vessel during oxygen blowing in VOD process.

VOD と AOD の攪拌については、モデル研究の結果では、反応速度的には上吹きジェットよりサブマージドジェットの方が有利であると結論されている¹⁸⁾。

VOD の酸素吹精の終点制御は、一般に吹精時間と共に変化する CO 効率を考慮した酸素吹精量で行われているようである。最近では、Fig. 4 に示すごとき排ガス組成の変化を刻々把握して終点制御している例も報告されている¹⁹⁾。

Witten (Thyssen) 社が最近開発した 55 t 真空転炉によるステンレス鋼の精錬プロセス (VODC) は²⁰⁾ 2mmHg～大気圧の範囲で操業する密閉転炉プロセスであるが、アルゴンを 500～2500Nℓ/min 底吹きし、VOD の脱炭機能の改良を狙ったプロセスであり、今後の発展を見守りたい。

3.2 アルゴン・酸素脱炭プロセス (AOD)

AOD プロセスは Union Carbide Corp. で 1955 年に開発され、1968 年に Joslyn Stainless Steel Corp. に初めて 15 t 装置が設置され 1969 年にフルスケールの生産に入ったという画期的成功を収めたことにより、Joslyn プロセスとも一時称されていた。このプロセスの装置、操業法については既に他の報告が多くなされているので詳述しない。Ar+O₂ 吹精工程は、C レベルにより一般に 4 段

階にわけられており順次アルゴン比率を増大して行き最終段階には純アルゴンが吹き込まれる。稀釈ガスであるアルゴンの製鋼コストに占める割合が多いため安価な窒素による代替が一般に採用されている。溶鋼の温度コントロールには一般にスクラップが用いられているが、NiO などを利用した例も報告されている²¹⁾。

AOD の終点制御は、初期条件 (溶鋼成分、温度、重量) と吹精ガスの Ar/O₂ 比と流量などを基に行っている。それらに更に吹精中の反応熱、耐化物への熱損失、溶鋼静圧などを考慮した数式モデルによる計算機制御方式も提案されている²²⁾ (Fig. 5)。

AOD にかぎらず取鍋精錬プロセスの操業の安定化には、ライニング寿命の向上が極めて重要である。一般にマグロ系塩基性耐火物が使用されている。VOD の場合、特に著しく損耗するのはポーラス・プラグ周辺とスラグ・ラインであるのに対して、AOD の場合は、羽口周辺 (羽口上部) とスラグ・ラインである。AOD の耐火物の寿命延長のためには、初期 Si 含有量の制御、冷却材の添加などを含む溶鋼温度の制御は勿論であるが、その他にはスラグ組成の制御 (MgO 添加)、適正寸法のレンガの適切なれんがが積み、炉体傾動角度の制御、羽口に付着する Knurdle の形状を適切な状態に保持する吹精コントロールが大切であるという²³⁾。これらの改善努力により AOD が開発されたとき 30～35 回程度であった耐火物寿命が、現在では 200 回以上の寿命も報告されるようになった²⁴⁾。

AOD と VOD と対比した場合、操業能率あるいは脱炭効率の面では AOD 有利といえよう。然し VOD の最も大きな利点である真空処理装置としての汎用性を見逃がすことはできない。従って AOD、VOD の総合的な経済性は、企業の生産鋼種構成、関連の既存設備などを考慮してきめられるべきであろう。

3.3 水蒸気酸素脱炭プロセス (CLU)

このプロセスに相当するものが CLU プロセスである。このプロセスは、1972 年 Creusot-Loire と Uddeholm の両社により 6 t 試験炉で研究開発したもので Uddeholm プロセスともいわれている。1973 年の 10 月に Uddeholm の Degerfors works の 70 t 炉で最初の操業が行われ、現在世界

Fig. 5. Simplified logic diagram for control of decarburization of molten metal in AOD process.

で4基が稼動している。

CLU プロセスは、これと全く独立に開発された Q-BOP(OBM) プロセス²⁵⁾と原理的には全く同一である。両者共転炉型容器によるガス体の二重管羽口からの底吹きプロセスである。両者の相異は、Q-BOP が、内管から主として純酸素と場合により造滓材粉末を吹き込み、外管に冷却ガスとして炭化水素系燃料油を用いるのに対して、CLU は、内管から酸素、水蒸気のほか素素、アルゴン、空気の吹き込みが行われ、外管から冷却ガスとして水蒸気のほか燃料油、アンモニアガスなどが吹き込まれる点²⁶⁾が異なる。従って、CLU は、AOD とともに基本的に同じで、CO 分圧を低下させる稀釈ガスとして高価なアルゴンの代りに水蒸気を主とし

て用いるプロセスである。操業法も、Cr の酸化を抑制するために、C が低くなると共に酸素と水蒸気の比を変化させる。CLU の特徴は、CO 脱炭反応の酸素源として、ガス酸素と水蒸気分解生成酸素を利用する点である。従って、羽口吹き込み酸素と水蒸気の比を制御することにより溶鋼の温度を制御することが可能である。

このプロセスでは、C 2～3%、Si 0.8% 程度の溶湯を処理できるといわれており、酸素吹き込み比率を増し脱炭速度を上げるために水蒸気より強力なカーボンを含まない冷却剤としてアンモニアガスの利用も報告されている²⁶⁾。Fig. 6 に操業中の温度、成分の変化例を示す²⁷⁾。

然し CLU の最大の欠点は、羽口冷却ガスから

Fig. 6. Change of composition and temperature of molten stainless steel during gas refining in CLU process.

水素が溶鋼に吹き込まれることである。従って水蒸気による精錬処理の後に、アルゴンもしくは窒素による水素バージが必要である。このようなバージ処理が必要なことは、この処理の完全遂行が困難なこともあり、水蒸気供給系の制御が複雑なものとあいまって、CLUの発展を阻害しているように思われる。水蒸気供給よりも炭化水素系燃料油の気化供給の方がより制御が容易であり、ステンレス鋼の溶製プロセスとしてよりも、LD転炉に対抗するQ-BOPとしての発展が期待されているのは当然と思われる。

4. 高級鋼、超合金、特殊金属の溶解分野での新プロセス

現在、高級特殊鋼、超合金、高融点金属などの溶製プロセスとしては、真空誘導炉溶解(VIM)、真空アーク再溶解(VAR)の両真空溶解プロセスが相変らず汎用されている。また、溶製インゴットの頭部切捨て量と表面皮削量の減少や熱間加工性の改善による成品歩留の向上を狙った大気圧下の再溶解プロセスとしてエレクトロ・スラグ再溶解(ESR)がVARと併用され広く採用されている。

しかし、VIM、VARについては、真空炉という構造上の制約により、特記すべきプロセスの革新は最近行われていない。ESRについても経済環境の変化に伴いオイル・ショック以前の大型化の勢いは現状では鎮静している。またESRは、開発頭

初は CaF_2 系スラグによる脱酸脱硫精錬プロセスとして着目されたが、その後、前述した炉外精錬を利用して低酸素低硫黄消耗電極の製造が容易になったこともあり、現在ではVARに対して表面肌良好なインゴットが得られる積層凝固プロセスであることで活用されている。

特にESRは、プロセスの精錬反応や凝固現象に関する基礎研究の面で、国内では鉄鋼基礎共同研究会特殊精錬部会を中心とする研究が進み、今まで余り明らかにされていなかったスラグ・メタルの電気化学的反応機構が操業因子との関連の下で解明されつつある²⁸⁾。国外でもESR時の酸化物の挙動などに関する基礎研究報告が数多くなされている²⁹⁾。ESRの特徴は、大気圧下の操業のため、ESR時のスラグ組成や雰囲気制御も比較的容易であり、特殊スラグによる不純物除去効果を狙えるなど³⁰⁾VARに比べて柔軟なプロセスである点である。従って、基礎研究の成果を踏えて、更にスラグ・メタル反応に関する実操業的研究を特にスラグ組成面から追求することにより、含活性元素合金の溶解などESRの適用拡大が今後期待できる。また現在ESR技術を利用した健全な大型インゴットの製造技術(ESHT³¹⁾、MHKW³²⁾や中空インゴット³³⁾³⁴⁾によるリング製造技術などが開発され実用化されている。

4.1 特殊熱源を利用する溶解精錬プロセス

前述した様にVIM、VARの技術革新が停滞している間に、この分野に量産鋼分野で発達した炉外精錬技術の進出が著しく、特に真空溶解の客先指定がない材料については、量産鋼溶製プロセスに準じた製造法が試みられ成功しつつある。同時に高品質材料をより安価に溶製しようという観点で、新しい熱源を利用しようという試みがなされている。実用化されているプロセスに、プラズマ・アークを利用する溶解(PAM)や再溶解(PAR)の技術、電子ビームを利用する連続溢流溶解や再溶解(滴下溶解)の技術がある。プラズマ・アークおよび電子ビームを熱源とする新プロセスについては、既に他誌に詳述³⁵⁾しているのここでは簡単に触れる。

プラズマ・アークを利用した金属の溶解精錬プロセスの開発は、ソ連、東独、日本で最も盛んであり、日本では大同特殊鋼が多年にわたって研究を行い、プラズマ誘導炉溶解(PIM)、プラズマ再

溶解 (PPC) などの各プロセスが開発されている。

プラズマ・アーク溶解は、最近量産鋼の溶製に普通に用いられているアルゴンを作動ガスとするクリーンアークを熱源とし比較的簡単な密閉容器で、安価な原料から高品質材料が溶製できる利点がある。

PAM, PIM, PAR の溶解コストを低減するためには、コストの大部分を占めるアルゴン消費量の低減もさることながら、装入原料の効率的な溶解法の追求と炉の大型化の研究が必要であり、この点で、スクラップの再利用という観点から高級鋼の一次溶解を狙った東独、ソ連の共同開発による30 t PAM の今後の発展が注目される³⁶⁾。更に VAR, ESR にない PAR の特徴である溶解速度 (凝固速度) と溶解プラズマ・アーク出力とを独立に制御できる利点を利用した凝固組織を制御した大型インゴットの製造プロセスの開発も期待される。

また、従来は、Nb, Mo, Ta, W などの高融点活性金属の特殊溶解プロセスとして知られていた電子ビーム溶解が、主として東独、米国において鋼を対象に行われるようになった。西欧、日本においても当然鋼の電子ビーム溶解 (EBM) と再溶解 (EBR) に関心がもたれ、特に、構造用合金鋼を始めとする各鋼種の EBR 材の品質が、VAR 材、ESR 材との対比で調査されたが、特に EBR が優れているという報告例は少ない。しかも EBR では Mn などの蒸気圧の高い合金元素の蒸気という成分コントロール面の問題も存在する。従って、それを特殊鋼や一般の超合金に適用しようとすれば溶解コストを大幅に下げる必要がある。然し、一般に電子ビーム・プロセスは、高真空、高電圧を必要とするので設備費が高い。東独の Freital のように100 t 炉計画という思い切った大型化によるコストの低減を狙い、蒸気圧の高い不純元素を除去する機能を材料の品質向上に役立てようとする試みはある。ただ、依然として成分コントロールの問題は残り、究極的には、米国の Airco Vacuum Metals (Temescal) の連続溢流溶解と同様に溶解対象が限定されると思われる。

5. 結 言

特殊溶解精錬プロセスについて、最近の動向を簡単に述べた。どのようなプロセスを選択するかは、

勿論、企業の生産鋼種構成、既存設備を考慮した上で、溶解材の化学成分規格、品質規格に応じて最も合理的なプロセスを採用する必要がある。しかし、溶解雰囲気とその圧力、溶解速度、スラグ処理の有無などの溶解条件や溶解材の化学組成などの相異により、溶解時の成分元素の挙動が当然異なる。従って、最近のユーザーサイドの材質への高度の要求を満たすには、量産鋼といえども単一溶解プロセスでは不十分で、今後ますます多様な組合せの複合溶解精錬にその対応の道が求められることとなろう。

(文 献)

- 1) 和田要, 小倉卓雄, 小川晴久, 内藤俊太: 鉄と鋼, **62** (1976) 11, S511, S512
- 2) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯毅: 鉄と鋼, **54** (1968) 13, 1327
- 3) 田中英雄, 榊原路悟, 林順一: 製鉄研究, (1978) 293, 12427
- 4) 加藤時夫, 岡本徹夫 (大同特殊鋼): RH脱ガス装置の鍋内混合, 電気製鋼, **50** (1979) 2, 128
- 5) 武田喜三: 鉄と鋼, **64** (1978) 14, 2239
- 6) E. Spire: Proc. of Elec. Furn. Steel Conf., **9** (1951), 75
- 7) E. Spire and J. Strauss: Proc. of Elect. Furn. Steel Conf., **26** (1968), 104
- 8) 森谷尚玄, 俵正憲: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2070
- 9) 江本寛治, 山本武美, 飯田義治, 大井浩, 西岡武三郎: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2043
- 10) H. Ushiyama, G. Yuasa, and T. Yajima: Ironmaking and steelmaking, **3** (1978) 3, 121
- 11) 根本秀太郎, 川和高穂, 笹島保敏, 佐藤秀樹: 鉄と鋼, **56** (1970) 11, S430
- 12) 玉本茂, 佐々木寛太郎, 梨和甫, 杉田宏, 森明義: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2110
- 13) E. Forster, W. Klapdar, H. Richter, H. Rommerswinkel: Stahl u. Eisen, **94** (1974) 11, 474
- 14) 原口博, 大河平和男, 森久, 薄木宗雄: 鉄と鋼, **61** (1975) 4, S135
- 15) 田中功, 庄司武志, 阿部泰久, 有馬慶治, 西

- 村光彦, 武田章, 大河平和男: 製鉄研究, (1977) 291, 12184
- 16) D. C. Hilty: Trans. AIME, **185** (1949), 91
- 17) N. Sevinc and J. F. Elliott: Ironmaking and Steelmaking, **3** (1976) 5, 268
- 18) 稲田爽一, 渡辺哲弥: 鉄と鋼, **63** (1977) 1, 37
- 19) 片山裕之, 梶岡博幸, 稲富実, 田中英夫, 細田秀夫: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2077
- 20) H. Bauer et al: The 3rd VOD Cong., Jan10/11 (1977), Tokyo
- 21) W. Pulvevmacher, H. Lutz, and K. H. Schmitz: Electric Furnace Proceedings, **32** (1974), 133
- 22) U. C. C. U. S. Patent 3 816 720 June 11, (1974)
- 23) J. C. C. Leach, A. Rodgers, and G. Sheehan: Ironmaking and Steelmaking, **3** (1978) 3, 107
- 24) 大同特殊鋼, 第22回耐火物部会資料
- 25) 中西恭二, 三本木貢治: 鉄と鋼, **65** (1979) 1, 138
- 26) T. O. Norrman, and O. Johnsson: Electric Furnace Proceedings, **32** (1974), 135
- 27) Stahl u. Eisen: **94** (1974) 10, 435
- 28) 後藤和弘: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2254
- 29) J. F. Elliott, Y. Iguchi, and T-H. Chiang: Electric Furnace Proceedings, **35** (1977), 208
- 30) 徳光直樹, 原島和海, 中村泰: 鉄と鋼, **65** (1977) 13, 2172
- 31) A. Mitchell and A. S. Ballantyne: Electric Furuace Proceedings, **35** (1977), 229
- 32) E. W. Shuster: Electric Furnace Proceedings, **35** (1977), 254
- 33) B. E. Paton, B. I. Medovar, Y. V. Latash, and L. V. Chekotilo: Proc. The Second Int. Symp. on Electroslog Remelting Technology, PartIII (1969).
- 34) W. V. Venal, R. T. Gross, H. J. Klein, and V. J. Colangelo: Electric Furnace Proceedings, **35** (1977), 264
- 35) 梶山太郎, 小野清雄: 鉄と鋼, **63** (1977) 13, 2010
- 36) C. McCombe: Steel Times, **206** (1978) 9, 86