



鉄の歴史

戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—技術編 和魂洋才—戦後の特殊鋼製鋼技術の進歩 (1945~1965)—

岸田 壽夫

大同特殊鋼 (株) 相談役

Toshio Kishida

Crossroads of Western Technologies and Japanese Expertise

—The Developments of Speciality Steelmaking in Japan 1945-1965—

1 はじめに

私の大学時代はまさに戦時中であり、学習の場というのは学徒実習による製造現場でした。

実習先は恩師金森九郎教授の勧めにより、日本製鐵・輪西 (現; 新日鐵・室蘭) で高炉を、日本鋼管・川崎では大学の先輩である深堀佐市氏の指導で平炉操業法を勉強し、日本製鐵・川崎 (現; 日鐵建材) では軸受鋼の熱処理技術を学びました。最後は同じく大学の先輩である松下幸雄氏 (元鉄鋼協会会長) が技術指導をされていた追浜海軍工廠の金沢支廠で、電気炉操業法を学び始めてまもなく終戦を迎えることとなりました。

終戦後の混乱期に卒業し、昭和21年12月に電気炉における特殊鋼製造技術を学ぼうと思い大同製鋼 (現; 大同特殊鋼) に入社しました。

以来、「特殊鋼とともに50年」さまざまな先端技術に触れ、海外の先進技術の導入および開発にも携わってまいりました。

本文では、私が技術者として工場勤務をしていた戦後20年間の製鋼技術の変遷を思いつくまに述べてみたいと思います。

2 戦後20年間の特殊鋼業界

戦時中余りにも軍需依存の強かった特殊鋼業界は、平和産業ではないという見地から、終戦後に国の保護助成策である復興金融金庫の融資を受けることができませんでした。

さらに、昭和21年1月に軍工廠、民間工場に在庫として残されていた30~50万トンの特殊鋼が特殊物件として一挙に市価の半値以下で放出されたこともあり、特殊鋼の新規生産は極度に圧迫されました。終戦当時、特殊鋼を生産していたメーカーは63社82工場に及んでいましたが、昭和24年末には37社44工場に減少するという極めて厳しい状況下にありました¹⁾。

大同製鋼 (以下、当社という) では100~150kgのビレットサイズの鋼塊で針金用線材を、また、幅広鋼塊で鉄板用素材を生産したりで、私の「特殊鋼製造技術を学び以て日本産業の復活を」という思いとは程遠いものでありました。

入社4年間、私は製鋼現場で3交替の勤務につき、主に溶解作業を担当しておりました。当時の現場リーダーには、溶鋼成分、温度を推定する勘と経験を頼りに高温になった溶鋼を、炉況や発生する煙の色などから今誰がどの様に処理し、次は誰が何を準備するのかなどの「モーメント・ジャッジ」を下すことが必要な条件でした。このような先輩の技・知恵に直に接し、鋼造りの実践を体験できたことは私にとって誠に幸いであつたと思っています。

昭和25年6月朝鮮動乱が勃発し、あらゆる産業に直接、間接の特需が流れ込み、これを契機に特殊鋼も再建の第一歩を踏み出す機会が与えられました。市場を圧迫していた特殊物件も一掃され、昭和26年の特殊鋼鋼材の生産高は前年比倍増という急激な上昇を示し、さらに、自動車、造船、機械、化学などの生産拡大を反映し特殊鋼需要は増大し続けました。朝鮮動乱休戦後は、急速に発展した自動車業界からの需要が特殊鋼生産に大きな刺激となりました。昭和29~30年は輸出ブームの出現により、また、昭和34年以降は岩戸景気により急激な上昇を示し、昭和35年には国内の特殊鋼鋼材生産高117万トンと初めて100万トンを突破、昭和30年の水準に対し3.7倍の伸びとなりました¹⁾。昭和35年12月には政府が経済の近代化と国際競争力の強化を図るため10年間で実質国民総生産 (GNP) を2倍とし、国民1人当たりの所得も倍増するという「国民所得倍增計画」を発表しました。これを契機に各産業は一段と投資意欲を高めていき、鉄鋼業界でも臨海工場の建設が相次ぎ、特殊鋼の生産高の伸び率は計画をはるかに上回るものとなりました。(図1、図2参照)

こうした特殊鋼の発展は、各産業部門における技術水準の高度化が、素材としての特殊鋼に対し強い品質向上要求

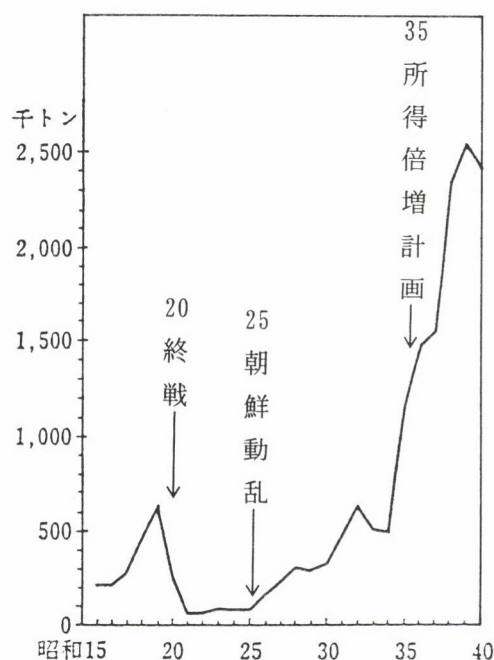


図1 昭和15～40年の特殊鋼
圧延鋼材生産高¹⁾

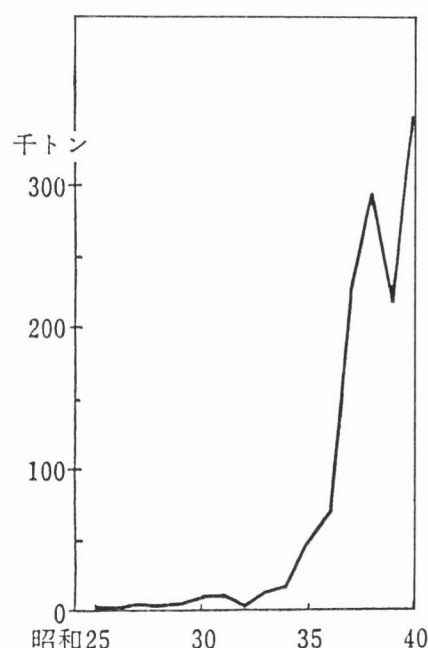


図2 昭和25～40年の
特殊鋼鋼材輸出高¹⁾

となって現れ、特殊鋼業界自身の技術の向上、設備の近代化を急速に促したことによるものであると考えています。また、この様な要求に対応出来たのは、アメリカを始めとする先進諸外国の最新技術およびQC、PMなどの管理手法を学ぼうとする極めて旺盛な向上心に裏付けられたものであると確信しています。

そして、戦後20年の節目として、昭和39年10月の東海道新幹線開通と東京オリンピック開催は、国際競争力を持った近代日本の復活を象徴する出来事であったと思います。

3 電気炉技術の進歩

電気炉は1899年フランスのエルー (Paul Eeroult)が銑鉄から鋼を製造する研究に着手して以来、約100年近い歴史があります。戦後の20年間に限り電気炉技術の進歩について回顧すれば、操業面では酸素製鋼法の導入、設備面ではアメリカのピッツバーグ・レクトロメルト電気炉会社からの技術導入が最大の変革だったと思います。

また、この時代のエネルギー、および、原料事情を物語るエピソードとして以下の様な事例がありました。

戦後の約10年間電力は水力発電が主の水主火従の時代であり、冬になると水枯れにより電力不足がしばらく問題となりました。現在の夏季のピークカットとは異なり想像ができないかもしれませんが、冬季には操業を止め工場従業員を炭坑に応援に出したことを記憶しております。原料事情に関しては、電気炉にスクラップを挿入直後、混入して

いたスクラップ中の砲弾が爆発し九死に一生を得たこと、また、Ni源に使用した軍艦の解体屑であるアーマープレートの重量物による電極折損、および、Cuの高い低級スクラップに悩まされたことを思い出します。

3.1 酸素製鋼法

昭和21年、カーネギー・イリノイス (Carnegie Illinois) のホームステッド(Homestead)工場は、ガス会社であるリンデと共同で225トン平炉における吹込酸素の純度が脱炭速度および酸素効率に及ぼす影響について研究し、幾多の貴重な実験結果を報告しています²⁾。

日本では昭和23年、帝国酸素の外国人技師の指導のもと、鉄鋼連盟加盟8社の幹部、技術者を集めて酸素吹き込み実験が尼崎製鋼株式会社 (現：神戸製鋼所) の40トン平炉で行われました³⁾。

酸素は160本ものボンベから減圧し5～10kg/cm²の圧力で、3/4インチのランスパイプを経て吹き込まれました。その結果、製鋼時間、燃料用重油の大幅な改善が図られたと報告しています²⁾。

電気炉における酸素の吹き込み実験は八幡製鐵所の20トン塩基性電気炉で行われ、その結果は昭和25年の第39回鉄鋼協会春期講演大会で発表されました。内容は酸化期に鉄鉱石を酸素源として使用していた従来法に比較し、酸素をトン当たり3.5m³使用することにより、製鋼時間は10%(30分)、電力使用量は9%(60kWh)節約出来たという報告でした²⁾。この実験結果は電気炉操業を担当する技術者に

とって誠に心躍るものでした。

当社、星崎工場も昭和26年2月に早速酸素ポンベ集合装置を購入しテストを開始しました。担当係長が自らランスパイプを持ち、酸素圧力を指示したり溶鋼中へのパイプ突っ込み角度や深さを調整しながらデーター採取を行いました。データー解析の結果、酸素製鋼法は明らかに効果のある技術とわかり、作業標準の作成を急ぎました。また、この間にランスパイプはその消耗量を少なくするため、吹精中に絶えずスラグをパイプに付着させる様に操作するなどの知恵も身につきました。

酸素吹き込み法のテストと比較し、空気吹き込み法も併せてテストを行いました。酸素法では鋼浴の攪拌が強烈にもかかわらずスプラッシュの発生は少ないが、空気法は吹き込み中のスプラッシュの発生が激しく、炉壁への地金付着が操業上大きな問題となることがわかりました⁴⁾。酸素製鋼法を拡大するに当たりポンベ入り酸素では経済的に採算が採れず、安価な酸素の入手が不可欠であることがわかり、同年12月にクロードPCA式酸素発生設備を導入しました⁵⁾。この後、鉄鋼各社で酸素製鋼法が採用されていく過程で、非常に溶損しやすい生パイプの内外面にアルミを拡散浸透（カロライジング）処理したランスパイプが開発され⁶⁾、現場作業の負荷低減に寄与したことも記しておきたいと思います。

「製鋼における精錬は酸素で始まり酸素で終わる」と言っても過言ではなく、現在でも立派に通用する言葉であると確信しています。

3.2 ステンレス溶製法

一般鋼における酸素製鋼法確立の次のステップは、電気炉でのステンレス鋼への挑戦でした。ステンレス鋼の精錬には通常の倍以上の大量の酸素吹き込み、即ち高圧酸素吹錬が必須です。酸素製鋼法の導入は「前もって配合計算さ

れた低炭素合金などの原料を単純に溶解する」従来の誘導炉法にとって変わる新しいプロセスを生み出しました。もちろん、昭和40年代に技術導入されたVOD法やAOD法などの炉外精錬法には及びませんが、低価格の高炭素合金を配合し、大容量の電気炉内で脱炭－Cr還元を行うことにより、低コストのステンレス鋼を生産することが可能になりました。

昭和27年より当社でも酸素製鋼法によるステンレス鋼生産を開始しましたが、安定生産に至るまでには数多くのハードルがありました。しかし、以下に示す様な周辺技術の進歩のおかげで量産化が可能となり、その後の急激な生産量増大に結びつきました。（図3参照）

(1) 耐火物の改善

終戦当時の炉ライニングは炉床が天然マグネシア、炉壁・天井は珪石レンガ、炉床補修材はドロマイトでした。

鉬石脱炭法の頃はこれで良かったかもしれませんが、酸素製鋼法の普及とともに、炉壁にも塩基性ライニングの必要が生じました。しかし、膨張率の大きいマグネシアレンガを焼成状態で使用するとスポーリングが起り、そのコスト、耐火度に見合うパフォーマンスが得られませんでした。これを解決したのが昭和25年頃に日本に導入されたアメリカのゼネラル・リフラクトリー社開発の商品名「Ritex」という鉄板被覆不焼成レンガ（Steel encased brick）です。後のマグクロ、クロマグレンガの開発とともに酸素製鋼の発展の功労者となりました。また、炉床材に使用されていた不純物の多い天然マグネシアでは、とてもステンレス鋼の酸素吹精末1850℃以上の高温に耐えられるものでなく、チャージ毎の補修も信頼性が低く、5～6チャージ毎にスタンプ補修を実施するのが常でした。

しかし、この問題も昭和20年代後半に耐火物用として海水マグネシアが国産化される様になり⁷⁾大幅に改善されました。

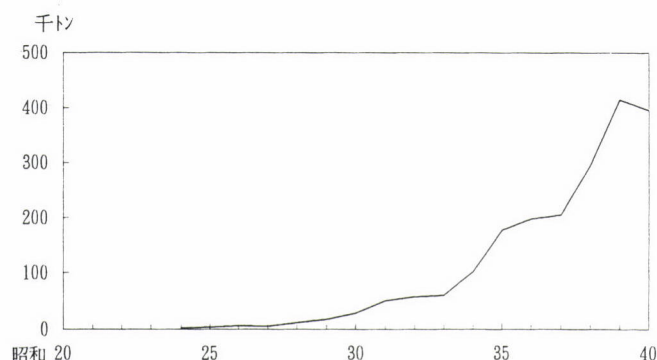


図3 日本のステンレス鋼圧延鋼材生産量推移
(通産省「鉄鋼統計月報」)

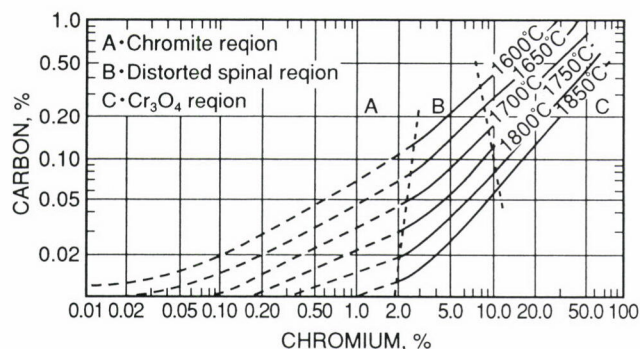
表1 昭和25年頃の製鋼分析における標準法の例

元素	定量方法	所要時間 (分)
C	ガス容量法	5～10
Si	重量法	40～50
Mn	過硫酸アンモニウム 酸化亜ひ酸ナトリウム滴定法	20～30
Ni	シアン化カリウム滴定法	15～20
Cr	過硫酸アンモニウム 酸化過マンガン酸カリウム滴定法	20～30

表2 炉容別電気炉基数¹¹⁾

(昭和21年)

炉容(t)	<1	1~3	3.5~6	6~8	10~12	15	20	30	計
基 数	22	344	104	72	53	12	7	1	615

図4 Cr-C-温度平衡図¹⁰⁾

(2) 溶鋼攪拌法について

酸素吹精後の超高温となった炉内へ還元剤や冷却材を投入し、溶鋼とスラグを攪拌してCr還元反応を促進し、成分偏析も解消することは重要な溶製上のポイントです。初めは鉄製のヘラにスラグをコーティングさせ、2～3人がかりで炉内攪拌をしたり、松材の丸太を突っ込んでスラグ攪拌を行うなど色々工夫をしましたが、いずれも完全なものではありませんでした。そこで、還元剤投入後の溶鋼を半分出鋼し、その取鍋を炉頂より反転して再度電気炉内へ投入し攪拌する「リレールドル法」を実施したり、後に、電気炉炉底に電磁スターラーを導入するようになりました。

(3) 分析技術、測温技術の進歩

昭和33年に機器分析が導入されるまでは、炉中成分を知る手段は化学分析法しかなく、例えば、表1に示す様にC分析では約10分、Crは約30分の分析時間が必要でした⁸⁾。現場では酸化期の煙の出方、炉内スラグの流動性、ランス吹き込み時ランス先端のガスの出方、スプーンで採取した溶鋼サンプルの表面状況を見てC量を推定し、いち早く現状を判断した上で次の作業の準備をするなどの技能を競っていました。とにかく、高温になった溶鋼を早く出鋼することが炉況の安定化につながるため、最終分析値が出たら直ちに計算尺で複雑な計算を行い、不足物の合金などを添加しヘラで攪拌するなど、大変な苦勞をしたことがなつかしく思い出されます。溶鋼の温度測定も、昭和30年代後半に現在使用されている様な消耗型熱電対が国産化⁹⁾されるまでは、スプーンサンプルで溶鋼表面に皮が張るまでの時間を測定して温度を推定したり、表面を光高温計で測定したりしていました。しかし、この方法もSiやCrが高いと判定を誤りやすく、技能を要する作業でした。

昭和30年よりスタートした特殊鋼部会で、各社情報交換

表3 大型電気炉建設状況(日本)¹²⁾

年	炉 容(t)	場 所
1927	10	大 同 製 鋼
1932	30	呉 海 軍 工 廠
1941	20	日 本 製 鐵 八 幡
1944	20	日 本 鋼 管

表4 大型電気炉建設状況(アメリカ)¹³⁾

年	炉 容(t)	場 所
1916	25	Illinois Steel Co.
1918	40	Charleston Navy Yard
1932	80	Timken Roller
1936	100	Bearing Co.

が盛んに行われるようになったこと、および、この時期に発表されたD.C.Hiltyのステンレス溶解に関する論文は¹⁰⁾従来の技能の域を脱するにふさわしい指針となりました。

(図4参照) また、多くの外国人専門家(例えば、アメリカArmco社のPaul Bjurberg氏など)が彼らの深い経験と理論を持って、現場で直接私達に指導していただいたのもなつかしい思い出です。

3.3 電気炉設備の進歩

我が国に設置された電気炉の基数は大正末期で約20基、昭和12年の支那事変開始当時で約200基、その後、増設は急ピッチで進み昭和21年には表2に示す様に615基に達していました。

当時、国産の電気炉は大同式、牛尾式、三菱式などがあり、容量的には6トン以下の小型炉が全体の76%を占めるという状況でした。電気炉設計技術力を炉容量という観点で比較しますと、国内では昭和7年に呉海軍工廠に設置された30トン炉が最大でしたが、アメリカでは昭和11年に既に100トン炉が建設されておりその違いがわかります¹²⁾。

(表3、表4参照)

昭和25年、朝鮮動乱の勃発により重工業が復興し電気炉の需要が再び芽生えて来ました。この頃のアメリカの鉄鋼関係の雑誌などに発表されている電気炉操業成績は、我が国のそれと比較してあまりにも差のあるものでした。例えば、トン当たりの電力消費量は500kWh程度(国内では650～800kWh)で、電極消耗量も5kg程度(同じく7～10kg)というものです¹⁴⁾。

電極消耗に関しては、昭和21～23年頃国内におけるピッチコークスの生産が戦時中の15%程度に減少し、その上品質が悪化したため、電極原単位が戦前の1.4倍以上となり大問題になったことがあります。

昭和23年に電極対策委員会が設立され、種々調査の結果、日本製の品質がアメリカ製に比較し著しく劣っている原因は、使用原料コークスの相違による電気伝導度の差であることが判明しました。

昭和24年よりアメリカGreat Lakes Carbon Corp.の石油コークスが輸入され、国産ピッチコークスはこの輸入品に全面的に切り替えられました¹²⁾。

それにしても、永年電気炉を設計製作し操業してきた者にとって、この差は大きな疑問でした。考えられる条件の違い、例えば、スクラップの品質や電力供給事情などを念頭に現地へ調査に出かけました。その結果、この差は電気炉そのものの差であり、高性能電気炉による迅速溶解にあるということを確認しました。当社の経営陣は「この大きな隔たりは一朝一夕でとても追いつけるものではなく、また、当時の電力事情、鉄鋼価格差などの差し迫った状況では放任できない」と判断しました。そして、「海外より技術を導入し我が国の電気炉技術を急速に先進国レベルまで高めるべきだ」との決定を下しました。

提携の相手はピッツバーグ・レクトロメルト電気炉会社(Pittsburgh LECTROMELT FURNACE CORP.)です。当時、我が国の関係者にもかなり知られているこの会社は、アメリカではもちろん、世界でも最大最良の電気炉設計製作会社の一つでした。昭和27年にこの会社との提携で、当社はダイドー・レクトロメルト電気炉として、設計製作図の一部または全部を使用して製作した電気炉を、国内およびアジア地域に供給することになりました。

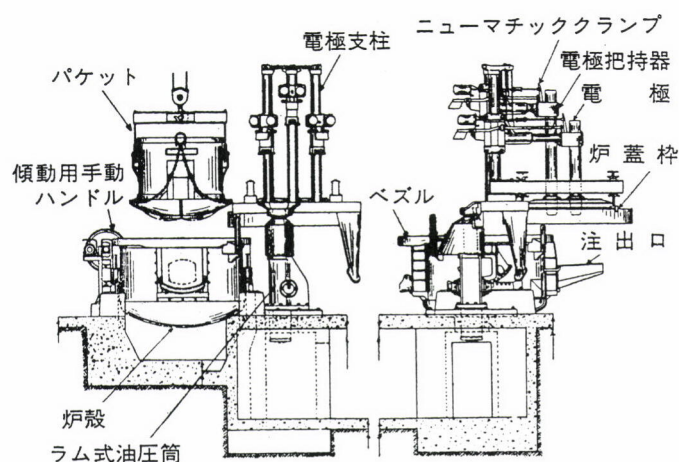


図5 ダイドー・レクトロメタル電気炉炉体¹⁴⁾

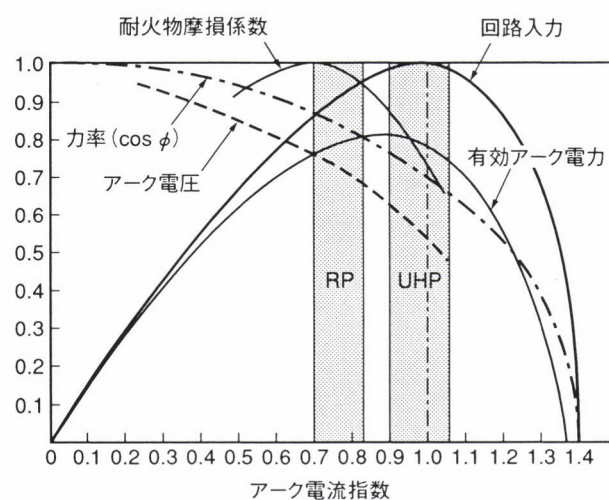
(1) ダイドー・レクトロメルト電気炉の特徴

炉体寸法について比較すると、戦前の電気製鋼研究会の標準炉殻径は6トン炉で3.3m、40トン炉で6.0m程度ですが、ダイドー・レクトロメルト電気炉はそれぞれ2.8m、4.9mと小さく¹⁴⁾、球形に近い形状で深い鋼浴を持つこと、また、スクラップ装入を炉頂装入方式としていることが大きな相違点でありました。当時、我が国では炉蓋をガーターに載せて移動する炉蓋移動方式と、炉体を引き出す炉体移動方式がありましたが、ほとんどの炉は炉蓋を移動させることなく原料スクラップを炉側部より装入する方式でした。私が実習をした5トン、10トン炉でも1個ずつ原料スクラップをヘラに乗せ、それを炉内へ装入するという極めて非能率的で大変な作業を行っていました。

しかし、ダイドー・レクトロメルト電気炉の炉頂装入方式は、図5に示す様に、炉体とは別に設置したラムによって炉蓋を持ち上げ、その場で注出口の方に旋回するSwing roof式でした。この方式は原料スクラップをバケットを介してまとめて炉内へ装入できることから、生産性が30%も向上しました¹⁵⁾。

当時、炉頂装入方式で炉蓋を移動する方式は、「移動であれ旋回であれ、傷みやすい炉蓋耐火物を高温のまま動かすことは、炉蓋耐火物の寿命を短くする」というのが共通の認識であり、この点に関する限り炉体移動の方が良いとの意見がありました。

しかし、ダイドー・レクトロメルト電気炉の様に液圧で円滑に駆動する方式は、静止とほとんど同じ状態で、かつ操作が迅速、装入時間も極めて短いことから、実際に冷た



項目	種別	R P	UHP
力率 (cos φ)	(%)	82～87	72～66
短絡比		2.5	1.3
アーク形状		ロングアーク	太いショートアーク

図6 アーク特性と耐火物摩損係数¹⁶⁾

い大気に露出する時間が短くなり、炉蓋耐火物寿命が炉体移動をも含めた他の方式よりも長くなりました。

変圧器容量については、同一容量の電気炉に対し変圧器容量が大きく、二次電圧も高めのものを使用するのがダイドー・レクトロメルト電気炉の特徴でした。例えば、前記電気製鋼研究会の標準では、公称容量6トンで2,400kVA、最高二次電圧170Vであるが、ダイドー・レクトロメルト電気炉は公称容量5トンで3,125~5,000kVA、最高二次電圧235~245Vとかなりの差がありました¹⁴⁾。当時、大電力を高電圧で投入する思想はすでにアメリカで採用されつつありました。その後、大容量の電気炉と変圧器の採用によりさらに生産性を高める操業が試みられ、昭和38年10月 W. E. SchwabeによりUHP (Ultra High Power) 理論がAIME Electric Furnace Conferenceにて発表されました。

基本的なUHP操業思想は大電力を投入して溶解速度を高めることにあり、低力率大電流ショートアーク操業をして高電力の太くて短いアークを溶鋼中に閉じ込め、アークの伝熱効率を上げてライニングの摩損を軽減するというものであります。(図6参照)

しかし、最近の電気炉操業法ではアークによる熱負荷対策として、アークをフォーミングスラグで包み込みFeOの還元も同時に行うカーボンインジェクション操業法の採用や、耐火物材質の改善、水冷ボックスの開発も進み、むしろロングアークによる原料スクラップの溶解促進、消費電力低減を目的とした高力率・高電圧によるUHP操業法が一般的となっています。

話をもとに戻すとして、もう一つダイドー・レクトロメルト電気炉の特筆すべき技術は各相の自動電流調整装置です。自動電流調整装置はUHP迅速溶解において特にその比重は大きく、炉の性能の心臓部品ともいえるべき装置です。この性能の良否によって電力原単位は10~20%程度すぐに変ってしまいます¹⁴⁾。

当時、我が国では電流計を見ながら操作者が把手、開閉器などで調整する手動式がかなり多く、自動式といってもバランス・リレー方式が大部分でした。この方式も性能上および保守面からかなり不満が多く、せつかく設置してあるにもかかわらず肝心の溶解初期は手動操作でやるのが普通でした。ダイドー・レクトロメルト電気炉では、ほとんどの場合Amplidyne方式を採用しており、高感度で遅れが少なくハンチングを起さず信頼性も高いこと、また、保守が楽で故障が起りにくいといった利点が多く、UHP迅速溶解操業を行うには不可欠な技術であったことを記憶しています。

また、電極駆動は、Amplidyne方式と昇降用電動機の組合わせの他に、ローブを無くしたServo Motorによる液圧

昇降式も確立されました。

ダイドー・レクトロメルト電気炉以外にも、昭和35年に石川島播磨重工がアメリカのU. S. Steel社American Bridge Divisionと技術提携を行いました。

American Bridgeはどちらかと言えば重厚で、機能的で軽快なレクトロメルトとは好対照でした。

ダイドー・レクトロメルト電気炉の1号機が昭和28年に完成して以来、昭和37年には記念すべき100基目として当時世界最大の250トン炉が中部鋼鉄に設置されました。

このような戦後の電気炉業界の復興ぶりを思う時、最新技術をいち早く導入し国際競争力をつけようとする若い日本のエネルギーを強く感じました。

4 造塊技術の進歩

戦後20年間における造塊技術の進歩は、以下の3項目に集約されると思います。

- (1) 鋼塊肌改善による手入れ工数削減
- (2) 鋼塊押湯技術の改善による歩留向上
- (3) 連続鑄造技術の試行

この中で、昭和30年代の後半は連続鑄造技術の揺籃期に当たります。連続鑄造法は単に造塊作業の改善に留まらず、鉄鋼界全体が根本的に物の考え方を変える画期的な技術であったことを特に記しておきます。

4.1 鋼塊肌改善技術

昭和20年代は、特殊鋼は上注法により造塊することが常道とされてきました。当時の思想は、「上注法は鋼塊底部より漸次凝固が始まり、凝固に伴う収縮は新たな溶鋼によって補われ、緻密にして内部欠陥の少ない鋼塊が得られるが、下注法では鋼塊肌はきれいでも湯道耐火物により溶鋼が汚染され、かつ鋼塊内部の収縮孔が発生しやすく高級特殊鋼の造塊法としては不適當である」というものでした。事実、250kg程度の鋼塊であれば、鑄型表面にタールあるいはホウ弗化物系などの塗料¹⁷⁾を塗布しておけば、上注とはいえずまずの鋼塊肌を得ることができました。しかし、圧延設備の進歩で鋼塊サイズが大きくなると、スプラッシュや二次生成酸化物の巻き込み、鋼塊と鑄型の焼き付きなどのトラブルも増加するようになり、従来なに気なく行われていた鋼塊皮削りが、歩留ロスや作業性の点で問題視されるようになってきました。

当社は、業界でいち早く上広鑄型による下注法を採用しましたが、二重肌などの表面欠陥防止のため高温鑄込を行っていました。

特殊鋼で現在のように酸化膜防止剤が使用される様に

なったのは昭和40年前半からです。

私がGußstahlwerkeのWitten工場を訪問した際、下注の鋳型内にひもで吊るされた灰黒色の粉末が入った袋を見て「何かな」と思いました。「湯上り時の溶鋼表面酸化防止剤としてフライアッシュを使用することなど誠に常識破りの技術だ」と感心したのは私ばかりではありませんでした。早速松坂貿易の仲介により鉄鋼メーカー数社共同でCarl-speater社から「Thermofin」を輸入し¹⁸⁾試用しました。

当時、輸出向けに溶製していたTi含有肌焼鋼では湯じわやスカム巻き込みによる欠陥で苦勞していましたが、「Thermofin」の使用により不良が激減したのは全く驚かされました。

次に、国内で考案された鋼塊肌改善技術を紹介したいと思います。それは昭和18年、日本鉄鋼協会の講演会で日本製鋼所・室蘭が発表した衣造塊法の試験結果です。酸性平炉の溶解精錬中に採取する溶鋼試料が、サンプル手杓の中で鋼滓に包まれて凝固した場合、表面が滑らかで極めてきれいな試料が得られることから着想し、先ず鋳型内に予め酸性平炉溶滓を注入しておき、その直後に溶鋼を上注するというものです¹⁹⁾。これをヒントに各社で珪化石灰、ホタル石やスラグを衣剤粉末とし、下注用の注入管内へ溶鋼とともに添加したり、鋳型表面に塗布したりいろいろと工夫を凝らしましたがテストの域を出ませんでした。当社、渋川工場では昭和47年まで、ガラス、ホタル石を原料としてスラグ溶解専用電気炉にて衣剤を溶製し、別炉で溶製した溶鋼と同時に出滓し、注入管にまず衣剤を注入し、その直後に溶鋼を注入するという「2炉－2鍋操業」による造塊法を実施していました。私は今だかつて衣造塊法で溶製されたTi含有ステンレス鋼の鋼塊肌に勝るものを目にしたことがない程、それは光り輝いていました。

しかし、この技術は造塊費用の増加が致命的となり、また、Ti含有ステンレス鋼用の酸化膜防止剤が開発されたこともあり消滅しました。

以上述べた様に、国内における酸化膜防止剤の開発は、下注法の定着とその後の連続鑄造技術の発展に大いに貢献することとなりました。

4.2 鋼塊押湯保温技術の開発

昭和25年以降、生産量の増大とともに1トンでも多く良品を生産したいというニーズのもと、鋼塊頭部切り捨て量減少が歩留向上の早道であるため、押湯保温技術の研究が盛んに行なわれました。

当時の押湯方法は、押湯棒は耐火レンガ内張りとし、保温材はワラやモミガラを使用し、ボールにて「ズンペ」と称して押湯部を揺動攪拌させ凝固収縮によって生ずる引け

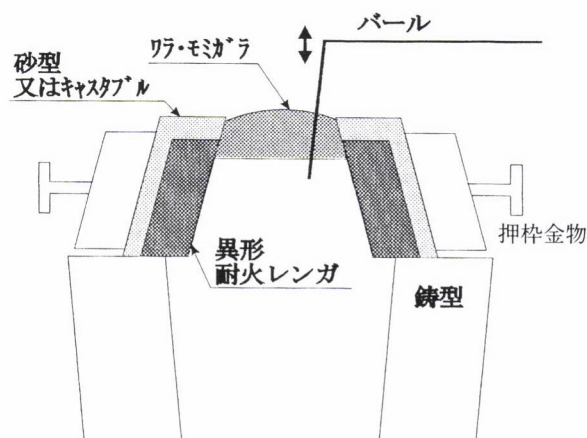


図7 押湯保温方法

表5 押湯保温材の配合例 (%)

例	CaSi	Al	MnO ₂	KNO ₃	スケール
A	13.0	17.5	1.5	—	68.0
B	13.0	8.5	17.4	4.4	56.7
C	25.0	25.0	20.0	6.0	24.0

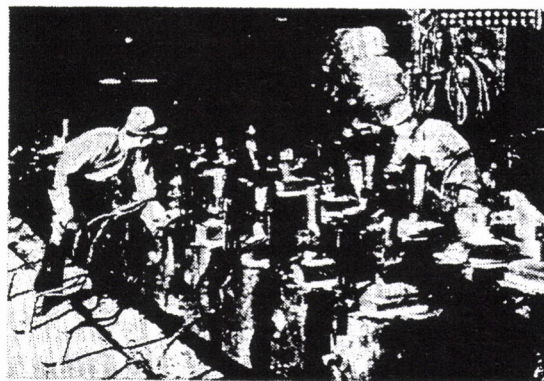


図8 500kg鋼塊の頭部加熱状況²¹⁾

を減少させようとするものでした。(図7参照)しかし、1次パイプが鋼塊本体にまで入り込み、頭部切り捨て量は依然多く、改善が必要でした。

昭和25年、J.W.Muellerらは押湯部の温度低下および熱の放散に関する研究を行ない

- (1) 押湯上面からの輻射および対流による熱ロス25%
 - (2) 押湯レンガが平衡温度になるために要する熱ロスは60%
 - (3) 押湯レンガ壁からの伝導による熱ロスは15%
- であることを調査しました²⁰⁾。

まず、押湯上面からの熱ロスを少なくする対策として、保温の強化とあわせて積極的に鋼塊頭部を加熱する方法が

表6 各種押湯保温法と押湯比²¹⁾

方 法	押湯比 (%)
普通耐火レンガ法	12~15
発熱性押湯保温剤	10~12
断熱レンガ法 (55%気孔率)	10~12
Kellog式アーク加熱法	7
発熱・断熱レンガ法 (Feedex)	5~7

試行されました。表5に示す様に、CaSiあるいはAlの燃焼熱やKNO₃による火薬性の発熱を利用した保温剤が開発され、歩留向上に有効であるとの報告がなされました²¹⁾。

昭和27年、アメリカのM.W.Kellog社で鋼塊頭部をアークで加熱する方法の工業化に成功し、これをAllegheny Ludlum社の230mm角鋼塊に適用し、従来の保温剤では75~90%であった歩留を90~95%に向上することが出来たと報告されています²²⁾。

この方法は、押湯部を保温性、介在物吸着性あるいは電導性を考慮した特殊なスラグで覆いその中に電極を漬して通電するもので、直流電源で電極は水冷式とし、その先端にはアークが出やすいように黒鉛リングが取り付けられていました。同じ年に住友金属工業がKellog社よりこの設備10基を輸入し、大阪工場に設置して好成績を得たとの報告がなされました。同時期に特殊製鋼（現；大同特殊鋼）では黒鉛電極を使用し、操業電圧をランプの明るさで判定する簡易アーク加熱装置を完成させ、大きな成果を得たとの報告をしています²³⁾。同年末、当社でもアーク加熱方式を取り入れ、電極調整を容易にする改善を行ないました。図8に当社の500kg鋼塊の頭部加熱状況を示します。

また、小型鋼塊用には小容量の溶接用トランスを利用した方法も採用されていました。しかし、作業性の問題や、スポーリングした黒鉛電極の破片により発生する頭部の浸炭問題などにより定着した技術には至りませんでした。

押湯レンガの熱ロス対策としては、耐火性、断熱性がありしかも熱容量の少ない内張り材の開発が行なわれ、アメリカPennsylvania大学では気孔率55%の押湯レンガを製造し、押湯歩留を改善したとの研究もありました²⁴⁾。しかし、工業規模で広く世界に使用されたのは、昭和26年にイギリスのFoseco社で「Feedex」という商品名で鋳鋼用に開発された発熱性押湯レンガです²⁵⁾。当社も昭和31年より鋼塊用として共同で基礎試験を行っていました。これは、前述の保温剤と同様にAlの燃焼熱を利用する方法で、点火すれば遊離酸素を発生する配合物とAl粉を適度な粘結剤を加えて混合し、所定の内張り押湯レンガ型につき固めて使用するものであります。溶鋼に接すると発熱し1900℃以上にもなります。発熱反応を起したこの高温耐火物は断熱性も良く、溶鋼はむしろ加熱されしばらく熔融状態を保つこ

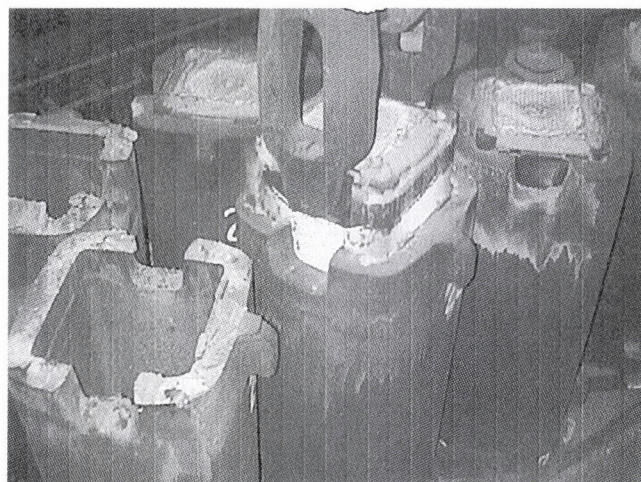


図9 スロテッド・モールド抽塊状況

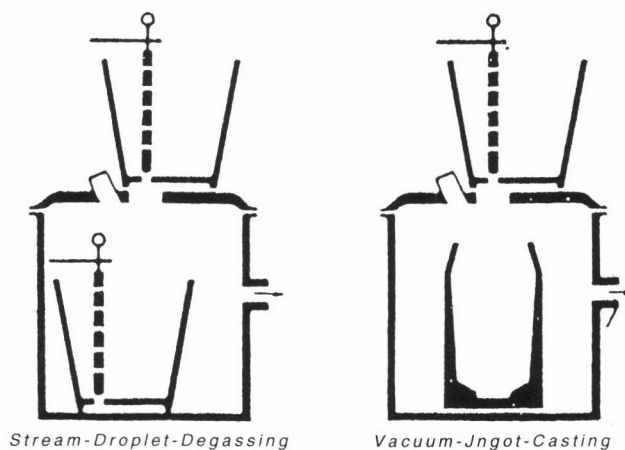


図10 各種の真空脱ガス

とにより、収縮孔へ溶鋼が補充され引けの少ない鋼塊を得ることができました。また、凝固完了後の発熱性押湯レンガの残渣は、作業員の工夫により簡単にバールにてリング状の状態で取り除くことが可能であり、後始末も楽であったことを記憶しています。

表6に昭和32年当時の各種押湯保温方法と押湯比を示しますが、新技術の開発による歩留改善効果は著しいものがあります。この後、さらに研究が進み、内張り発熱材と外枠が一体になった軽量押湯枠や、大型鋼塊用に安価な軽量断熱押湯枠が開発されました。当社、知多工場が世界で初めて量産実用化したスロテッド・モールドと、4本のコーナーピースで4辺の軽量押枠を固定する「Profax」²⁶⁾システムの組合せは、大型鋼塊を合理的に量産する画期的な技術であったと思います。「Profax」はスウェーデンのサンドビック社の開発によるもので、これをFoseco社が導入しました。スロテッド・モールドとは図9に示す様に鋳型頭部に切り込みを設けたモールドで、ストリッパー・クレーンにて直接この切り込み部を把み抽塊できるようFoseco社

により考案されました。

私はこのアイデアを同社のYoung社長より頂き、直ちに全面採用に踏み切りました。押棒金物を使った従来法では、押棒金物除去のため熱塊台車を鋳型ヤード内に一旦搬入し、モールド・クレーンにて除去した後分塊ヤードに運搬し、抽塊を行っていました。しかし、押棒金物を廃止したスロテッド・モールドの採用は、直接分塊ヤードに運搬し、ストリッパー・クレーンで抽塊が可能のため大幅に作業性が改善されたばかりでなく、砂型の後始末も省略されました。

この貴重な成果を、昭和45年アムステルダムで開かれた国際シンポジウム²⁶⁾にて講演したところ、我が国を始め鉄鋼先進各国の人々から熱心な質問攻めにあったことが懐かしく思い出されます。

現在、造塊方法はほとんど連続鋳造法に移行しましたが、大型鋼塊や一方向凝固を指向した特殊な鋼塊において、この時代に開発された技術がさらに改善され、今なお活用されているのを見るのはうれしいことであります。

4.3 連続鋳造技術の試行

国内における連続鋳造技術の導入は、昭和28年住友金属工業とIrving Rossi (後のConcast) とのライセンス契約に始まります。住友金属工業は昭和30年に半工業的設備を稼働させ、次いで昭和35年に2ストランド化し実生産に入りました²⁷⁾。

私が連続鋳造に接したのは、昭和32年欧米視察をされた上司からBritish Iron&Steel Reserch Associationの4インチ角ビレットより圧延された棒鋼、平板サンプルを見させていただいたのが始まりです。サンプルは外観疵が多く、横断マクロ検査でも周辺疵や中心部多孔質があり、当社の判定規準では合格とは言えない品質でした。

しかし、昭和35年にBöhler社より購入したマンネスマン方式による連続鋳造ビレットを当社にて圧延しましたが、圧延比6.6以上であれば中心偏析は残るもののパイプは圧着し、表面疵も浅く、用途によっては合格判定が下せそうな所まで品質レベルは急速に進歩していました。

昭和36年、特殊鋼メーカーである大同製鋼、三菱製鋼、山陽特殊製鋼、日本特殊鋼、北日本特殊鋼はJSSG(日本連続鋳造共同体)を結成し、SSG/OSIG(マンネスマン主体のドイツ連続鋳造共同体/Böhler主体のオーストリー連続鋳造利益共同体)と連続鋳造技術に関するライセンス契約を締結しました。以来、8回にわたり「鋼の連続鋳造における諸経験」というノウハウ集を受領し、関係者集まって翻訳、内容チェックを行いました。昭和39年には、JSSGが実施権を得た第1号機が北日本特殊鋼・八戸工場(現；

大太平洋金属)に設置され、低合金鋼、硬鋼線などの連続鋳造化が始まりました。

この後の連続鋳造技術の発達には目をみはるものがあります。特殊鋼分野では、昭和50年代に品質、操業面で安定した大断面ブルーム連鋳機の採用により一気に花が開きました。造塊作業のイメージを一変させたこの技術は、産業構造面では従来の鋳型、押棒業界の衰退と産業機械業界の製鋼分野への進出を促し、人事面では機械、圧延分野の人達に金属、冶金学科出身者の聖域であった製鋼の扉を開放するなど革新的なものとなりました。

5 真空脱ガス技術の導入

昭和25年、ドイツのBochumer Verein社が図10に示す様な真空鋳造法を開発しました²⁸⁾。本法は溶鋼が流動状態で真空処理されるため脱ガス効率が高く、現在も大型鍛鋼品に発生しやすい鋼中水素起因の白点欠陥防止策として適用されています。この成功を契機に真空技術はさらに発展し、昭和35年には取鍋脱ガス法、RH法、DH法が工業的規模で量産鋼に適用され始めていました。これらの方法は脱ガス処理ばかりでなく、ステンレス鋼の脱炭、および、溶鋼を攪拌することにより合金添加時の成分コントロール精度向上や溶鋼中介在物の低減が可能となりました。

昭和38年、アメリカG.M.のNew DepartureとRepublic Steelとで共同開発されたベアリングに関する情報は衝撃的でした。それは、真空処理された清浄な軸受鋼で作られたベアリングは、従来材と比較して3～6倍の転動寿命(B₁₀ Life)が得られたというものでした²⁹⁾³⁰⁾。特殊鋼メーカー各社はこぞって真空脱ガス装置導入の検討を始めました。昭和39年8月15日、私が初めて海外へ出張しましたのも、どの真空脱ガスプロセスを導入するかという命題を持っていたものでした。取鍋脱ガス法はGußthalwerkeのWitten工場、RH法はRuhrsthal、DH法はアメリカのCopperweld Steelなどで十分に勉強させて頂きました。取鍋脱ガス法は電気炉スラグを取鍋内へ持ち込まないことが脱ガス効率を確保する上で重要であるが、当時の技術ではそれが不十分なこと、また、DH法は溶鋼の吸い上げ・吐き出しをくりかえす際に取鍋上部耐火物が大気にさらされ、これにより溶鋼が再汚染される心配があるため不採用としました。一方、RH法は真空槽内で環流用のArガスにより溶鋼が流動となって飛散しているのを目の当たりにして「これは良い」と直感しました。取鍋脱ガス法とは異なり、電気炉スラグを取鍋内に持ち込めるため、出鋼時のペラン効果を十分に活かした脱硫も可能です。また、耐火物の観点からもRH法は他の2法に比較し、取鍋ストッパーがスラ

グや溶鋼の揺動により溶損される心配がなく、安定した操業が可能であると信じました。しかし、当時Ar吹き込み用のポーラスプラグは開発途上であり、RHガス吹込み部の寿命は5チャージ程度でしたが、これは耐火物メーカーの技術力でクリア出来ると判断しRH法を採用することにしました。RH法のオペレーター実習は、昭和38年に国内第1号機として稼働していた富士製鐵（現：新日鐵・広畑）にお願いしました。そして、昭和40年8月に第2号機としてホットランさせました。

今、真空脱ガス技術の変遷を振り返ってみますと、「あの時の選択に大きな間違いはなかった」と確信しております。

6 特殊溶解技術の進歩

特殊溶解法は、大別すると1次溶解法と再溶解法に区分されます。1次溶解法は真空誘導炉(VIF)に代表されるプロセスで、本法は実験手段としてはかなり古くから用いられてきましたが、戦後大型真空ポンプの実現などにより工業的規模での実用化が可能となりました。

昭和25～26年頃、アメリカにおいてジェットエンジン用耐熱鋼の要求が通常の大気溶解材の材質限界を超えたため、真空誘導溶解法が脚光を浴び、その後急速に発達しました。

再溶解法に区分されるプロセスはVAR (Vacuum Arc Remelting) とESR (Electro Slag Remelting) があります。VARが工業的に利用されたのは、昭和28年にW.J.KrollらによるTiの溶解が最初であり、我が国においてもアメリカからKroll氏らを招いて知識の吸収につとめ、研究開発が行われてきました。昭和33年に神戸製鋼所が本法を特殊鋼の溶解に応用し、コンセル・アーク法と称して溶解量100kgの鉄鋼生産用第1号機を設置しました。その後、本法の高級鋼の生産手段としての優秀性が認められて急速に普及し、昭和40年までに国内に20基³¹⁾が設置されました。

例えば、関東製鋼（現：大同特殊鋼・渋川工場）では昭和34年に500kgのVARを、また、日本特殊鋼（現：大同特殊鋼）大森工場は昭和38年に3トンVARを導入し、造船国日本を象徴する大型タンカーの蒸気タービンプレード材、戦後初の国産旅客機であるYS-11のフラッパーレール素材、世界一級の鉄道技術を支えた新幹線の軸受素材など生産してきました。再溶解するのだからとは言え、母材の品質はとても重要でした。精錬や表面品質が不十分な母材からはスカムを巻き込んだり、ブローホールの多い鋼塊しか得られず、後工程で皮削りやグラインダーなどの手入れが必要でした。「生まれ良ければ」の言葉は製鋼作業における真実であると今でも思います。

一方、ESRは昭和12年頃すでにアメリカにおいて工業化され、Hopkins法あるいはKellogg法として知られていました。しかし、戦後における真空技術の進歩により脱ガス効果のあるVARが特殊鋼の製造法として大きな発展を遂げたため、あまり注目されませんでした。ところが、昭和29年頃からソ連のPaton電気溶接研究所において、エレクトロスラグ溶接法の原理に基づいて鋼をとかす研究が進められ、Dnepropetsstal電気冶金工場で工業化されて現在のESRの基礎が確立されました。我が国では、ESRは日立金属工業（現：日立金属）安来工場に昭和35年に1トンESRが導入され、その後急速に発展しました。VARは真空精錬効果を主とした低水素低酸素鋼の積層凝固、ESRは高温の強塩基性スラグ反応による脱硫、介在物の微細分散効果、並びに良好な表面肌と積層凝固にその特徴があり、今では高品質でかつ高い信頼性を有する材料、いわゆる超高級鋼の製造には不可欠なプロセスとして定着し、用途に応じてはESR+VARの複合溶解も行なわれています。

7 おわりに

戦後20年間の特殊鋼の技術史という普遍的、かつ大変大きなテーマをいただきながら、私個人の体験および見聞を中心とした内容となり、記述に偏りがあることをご容赦いただきたいと思います。

私自身の記憶が風化しつつある現在、30～50年前の出来事を正確に記述することが困難なため、多くの方々に当時の資料を提供していただきましたことを深く感謝致します。

今もう一度当時を振り返ってみますと、国内、国外を問わず各分野の諸先輩の努力により、特殊鋼生産技術は凄まじい勢いで進歩してきた事がよくわかりました。

一方、この技術革新の中であって、忘れてならないのは人の情のありがたさでありました。戦後の復興期とはいえ、特殊鋼業界の足腰は弱く、不況による事業所の合併、閉鎖の例は数多く、また、天災による事業存続の危機もありました。私の場合は昭和34年9月26日の伊勢湾台風が思い出されます。この台風は東海地方に甚大な水害をもたらし、私の勤務する星崎工場は完全に水没してしまいました。もちろん前年にA.R.L.社より導入した我が国初の機器分析装置であるカントメーターも水没しました。工場の復旧には数多くの人々より援助を受けましたが、この報を受けたアメリカ人技師が急遽来日して下さり、10月18日の復旧後1チャージ目の分析に間に合わせていただいたこと、同年10月21日の特殊鋼部会に出席した折、同業の皆さんから「大丈夫ですか」と励ましの言葉をいただき感激したことなど

が走馬灯のように思い出されます。

今、特殊鋼業界は次の改革に向けての充電期間にあると思います。現状に至った歴史を知ることが、新たな方向性を見出す鍵だと考えます。今後を担う若いエンジニアの皆さんに期待することは、歴史を知り、現実を知り、現状を否定するチャレンジ精神を忘れないで欲しいということです。

参考文献

- 1) 鉄鋼新聞社：特殊鋼の知識、1980
- 2) 吉田恵：電気製鋼 21 (1950) 4
- 3) テイサン株式会社：私信
- 4) 高橋俊夫、瀧波勝文：電気製鋼 22 (1951) 5
- 5) 高橋俊夫：電気製鋼 24 (1953) 1
- 6) 滲透工業株式会社：私信
- 7) 宇部化学工業株式会社：私信
- 8) 日本鉄鋼協会共同研究会、鉄鋼分析部会編：特別報告書No.34
- 9) 大阪酸素工業株式会社：私信
- 10) D.C.Hilty, H.P.Rassbach, Walter Crafts : Journal of the Iron and Steel Institute, June 1955
- 11) 日本鉄鋼会調査部：1948, 5.1発行資料
- 12) 林達夫：電気製鋼 26 (1955) 3
- 13) D.L.Clark, J.A.Clark : Iron and Steel Engineer, Dec. 1950
- 14) 野田浩：電気製鋼 24 (1953) 2
- 15) C.F.Ramseyer : Iron and Steel Engineer, June 1951
- 16) 安川昭造、青鹿雅行：石川島播磨技報、9 (1969) 4
- 17) 坂井化学工業株式会社：私信
- 18) 株式会社エヌ・テー・シー：私信
- 19) 近藤ら：鉄と鋼 30 (1944)、217
- 20) J.W.Mueller, G.A.Bole : Steel, Jan.23.1950
- 21) 吉田恵：電気製鋼 28 (1957) 1
- 22) Kopecki : Iron Age 151.25th.March.1948
- 23) 石原正美：新日本経済 (1952) 4月号
- 24) Bruch M.Shield : Proc.of Open Hearth Conf.1955
- 25) H.D.Shephard : Iron Age Vol.176 No.21, 24.1955
- 26) T.Kishida : Iron and Steel, April 1971, Foseco Symposium 1970.
- 27) 大中都四郎、牛島清人：鉄と鋼、47 (1961)、1175
- 28) Arther : St.u.Ei 76 (1956)、61
- 29) Machine Design 35 (1963) Aug.1
- 30) Metal Progress 84 (1963) 8
- 31) 日本鉄鋼協会、共同研究会、特殊鋼部会：特別報告 No.8、鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩、1969 (1997年4月2日受付)