

© 1984 ISIJ

研究委員会調査研究小委員会報告



製鋼の将来技術

委員長 川上公成*

Avenues to Innovative Steelmaking Technologies in Japan

Kiminari KAWAKAMI

最近の粗鋼の年産総量は1億t前後で推移している。その内訳としては鉱石原料による粗鋼は10年前の8100万tから6500万tへ推移し、一方屑鉄原料による粗鋼は3600万tから3200万tへと推移している。両者の構成比率はほぼ7:3とほとんど変化はないが、生産手法で見ると転炉鋼比率は81%から72%へと9%低下している(付図1および2)。

技術的には転炉法では粗鋼熱原単位500万kcal/t以下、連続鋳造化比率85%以上を達成し、清浄鋼の量産による品質グレード・アップを計るとともに、さらに溶銑予備処理、熱銑片直接圧延、転炉内冷材溶解能力アップなどの新技術が開発されてきてはいるが、生産量低下にともなう低操業率に対処するため生産設備の効率的な運用がさらに必要となつてきている。一方電気炉法では溶解電力原単位は400kWh/t(熱原単位65万kcal/t以下)と低下し、電極原単位の低減などを含めた溶解コストの低減、増産から減産(短期休止も含めて)まで自由度の高い操業形態によつて柔軟に需要に対処できる機能などにより普通鋼分野での伸長が著しい。また良質の屑鉄使用と取鋼精錬の活用によつて合金鋼・高級鋼分野での品質グレード・アップが行われている。

鉄鋼をとりまく社会的背景としては通信、電算機、電子工業の急速な伸び、素材多様化、情報化社会など鉄鋼を含めた素材ニーズが多様化した。鉄鋼生産手法については輸入鋼材の増加、高級少量多品種指向などにより従来の画一量産型からの脱皮を迫られてきている。これからの製鋼新技術の開発は、従来とは異なつた幅広い視野でのニーズ、シーズに基づいた発想によつて検討されることが必要となるであろう。ここでは限られた条件の中で新しい製鋼分野にかかわる将来の新技術として新製錬・溶解法、超高純度精錬、電磁気冶金、新凝固プロセスの四項目を選んで検討したのでとりまとめて報告する。なお、セラミックス、C₁化学、ノンフェラス、アモルファスなど関連分野については今回は触れず、精錬・凝固での新技術を対象とした。

1. 新製錬・溶解法

溶銑を主要鉄源とする製鋼法として、この数年、集中的な研究開発が行われた結果、我が国独特の「溶銑予備処理-上底吹き転炉スラグなし脱炭」の組み合わせからなるプロセスが確立した。しかし、このプロセスが経済的に成立するための条件はかなり限られたものであることが明らかになりつつあり、「溶鋼を安価に製造する」という大命題に対して新しい観点から挑戦しなおす必要に迫られている。

その場合の着眼点としては

- (1) 製銑、製鋼の垣根を取りはらい、全体として溶鋼製造コストのミニマム化を考えること
- (2) 安価な鉄源(スクラップなど)を大量に使用できること
- (3) 高合金鋼については合金製造工程も含めて考えること

などがあげられる。これらを可能にするためには

- (i) 安価な燃料を用いて大量の熱を発生させ、かつ、それを溶解、反応に効率的に利用する技術の確立
- (ii) 原料あるいは燃料から持ち込まれる不純物を効率的に除去するための技術開発
- (iii) 除去した不純成分の資源としての有効活用や金属系成分の合金元素としての再利用の検討が必要になる。

今後日本の粗鋼生産の主原料比率が鉱石対屑鉄で7:3のまま推移するのか、あるいは欧米型の6:4に変化するのかは、今後の製錬技術開発にとつても関心の深い所ではある。現在の高炉-転炉法、UHP電炉法、合金鉄電炉法などを乗り越えるプロセスを作り上げるには、これまで研究されているものの他に、斬新なアイデア、シーズが強く望まれる。このような観点から挙げられる研究課題の例を表1に示す。したがつて、基礎研究としても従来の後追い型ではなく先導型となりうる内容のもの

昭和59年3月22日受付(Received Mar. 22, 1984)

* 本会研究委員会調査研究小委員会委員長 日本鋼管(株)中央研究所 工博(Technical Research Center, Nippon Kokan K.K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

表 1 新製錬・溶解法の研究課題の例

溶融還元製錬法	(i) 転炉型の鉄溶融還元法 (ii) 連続製鋼型鉄溶融還元法 (iii) ラテライト、マンガンノジュールなど未利用資源を用いた溶融還元法による合金鉄あるいは高合金溶湯製造法など
スクラップ新溶解法	(i) 電気炉に依存しないスクラップ溶解法 (a) 転炉でのスクラップ使用量増加 (b) 連続製鋼型スクラップ溶解法 (ii) 革新的電炉での高効率スクラップ溶解法 直流アーク炉, プラズマ炉 など
精 錬 法	(i) スクラップ中のトランプ元素の除去方法 (a) Sn, Zn など (b) Cu, Ni, Cr など (ii) 炭素溶湯および合金溶湯中の P, S, N などの新しい除去技術

が格好のテーマと考えられる。これに必要な研究手法、研究基盤としては、これまで、蓄積されてきた、冶金物性、融体精錬反応や伝熱現象にかかわる知識などを縦横に駆使することができる。

2. 超高純度精錬

1970 年代から 80 年代にかけて、鋼中の不純物濃度の低減化に成功し、清浄鋼が大量生産できるようになった。この不純物元素濃度の低減化は現在も進行しており、大量生産鋼の精錬限界が西暦 2000 年頃には、C=6 ppm, S=1 ppm, P=8 ppm, O=5 ppm, N=14 ppm, H=0.2 ppm になるという予測すらある (第 90, 91 回西山記念技術講座)。

超高純度鋼の製造に関する研究の大筋は、次のようなものになる。

- (1) 超高純度鋼の材質特性
 - (i) 不純物量が 1 ppm 以下の鋼はどのような特性を有するのか、とくに、1 ppm 以下の P, S, O が機械的性質、耐食性、表面処理特性、電気的性質、磁氣的性質などに与える影響
 - (ii) 極微量存在する不純物元素間の相互作用が材料

特性に及ぼす影響

- (iii) 微量不純物の分散状況を容易に示すことのできる分析技術の開発
- (2) 精錬方法
 - (i) 現状の精錬方法の精錬限界拡大のための研究
 - (ii) 超高純度鋼を精錬するための新しい精錬法の研究
例えば
 - (a) 気相同士を反応させ固体を析出させる方法
 - (b) 超高温の利用
 - (c) 凝固現象を利用する方法
 - (iii) 超高純度状態にいたるまでの冶金物理化学に関する研究、例えば、相変態などの熱力学的研究 (従来データをゼロ方向へ内挿すれば事が足りるかどうか)、反応速度の研究、など
 - (iv) 超高純度鋼を工業的に製造するための新耐火物の研究

今後 ppm 以下の超高純度鋼については、粒界偏析、核生成促進など凝固形態や結晶構造とのかかわりの中で研究が進められなければならない。一方、除去した不純成分の資源としての有効活用や金属系成分の合金元素としての再利用などは、基礎素材としての鋼の持つ普遍性からは避けられない項目であり、超高純度鋼と表裏をなす項目である。

3. 電磁気冶金

3.1 電磁気力の利用

電磁気力を応用した冶金プロセスを磁束と電流の印加方法に基づいて分類して示せば表 2 のごとくなる。この表に基づいて今後、以下の分野の研究が望まれる。

- (1) 電磁気力は熔融金属に対して次の 2 つの機能を持つ。
 - (i) 非接触下での攪拌と輸送

表 2 電磁気力を用いる冶金プロセスの分類

磁束を作用させるもの	移動交流磁界	{ 連 鑄 の 電 磁 攪 拌 A S E A - S K F 炉 電 磁 ポ ン プ 電 磁 ア ト マ イ ザ ー	} 溶融金属の形状制御
	固定交流磁界	{ 誘 導 炉 電 磁 鑄 造 レ ビ テ ー シ ョ ン 溶 融 金 属 の ハ ン ド リ ン グ	
	直流磁界	電 磁 プ レ ー キ , 単 結 晶 化	
電流を作用させるもの	交 流	E S R , ア ー ク 炉 , ア ー ク , プ ラ ズ マ	
	直 流	V A R , ア ー ク 炉 , ア ー ク , プ ラ ズ マ ア ル ミ 溶 解 精 錬 炉	
電流と磁束を併用するもの	交 流 ・ 直 流	磁 気 攪 拌 , (溶 接)	
	直 流 ・ 直 流	静 磁 場 通 電 方 式 電 磁 攪 拌	
	直 流 ・ 直 流	E S R , V A R の 電 磁 流 動	
	交 流 ・ 交 流		

(ii) 熔融金属の形状制御と表面形状の安定化

(i)の分野については、電磁攪拌、電磁ポンプとして実現されており、その理論的検討もなされている。一方、(ii)の分野については、アルミニウムの電磁铸造（モールドレス铸造）として実現されつつあるものの、理論面、実証面においてはまだ十分なる検討はなされていないのが現状である。(ii)に関連する技術としては、ツイーン・ロールによる金属薄板の直接成形におけるスリット流の扁平化と安定化、スラグ-メタル分離、水平レベーターション、モールドレス連铸等があり、その応用範囲は広い。

(2) アーク加熱装置、ESR等、熱源として大電流がメタルに印加されている。この場合、誘導磁界との相互作用によつてメタルは流動するが、外部から磁束を印加することにより、電気エネルギーの一部を運動エネルギーに変換することができる。

(3) 凝固組織の制御を目的として電磁気力が用いられている。例えば、移動磁界による電磁攪拌（等軸晶化）、直流磁界による柱状晶化あるいは単結晶化がある。しかし、これらは、電磁気力がメタルの流動を誘起あるいは抑制する機能を介して、凝固組織に変化を与えた結果と見ることができよう。今後、電流や磁束が直接（流動を介せず）、凝固組織に及ぼす効果を調べる必要がある。

3.2 アーク、プラズマ、ビーム精錬

高級材料への要求品質の向上に伴い、新しい精錬技術の出現が期待されている。

この中に、超高温精錬技術、高真空精錬技術の応用・開発が挙げられる。

超高温（2000°C以上）精錬では、アーク、プラズマ等を加熱源として超高温下でのメタルとスラグ、ガスとの反応を利用する。ここでは、反応の迅速性および不純物の蒸発除去など超高温域でのみ進行する反応の利用を目的とする。これを実現するには、まずメタルとスラグあるいはガスとの反応に関する超高温域での熱力学データの整備が必要となる。例えば、電気エネルギーは超高温の場合、アーク（プラズマ）状態など、を作りうる。プラズマ状態下での脱ガスは分子状の脱ガスではなく原子状脱ガスとなろう（ $2N \rightarrow N_2(g)$ ではなく、 $N(l) \rightarrow N(g)$ ）。界面平衡濃度はこれまでの熱力学データからは得られない。一方、溶解炉についても、溶鋼を超高温に保持するのに必要な耐火物あるいは雰囲気制御が自由にできる機能を有する炉等の開発が必要であり、さらに、加熱源についても、現在以上に効率のかつ迅速に昇温できるようなくふうが望まれる。

真空精錬は、 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ Torrの真空雰囲気下で行われる。溶解は通常水冷銅ハースあるいは水冷銅つぼを用いて行われ、耐火物・スラグは用いない。精錬には、

アーク、プラズマ・ビーム、電子・ビームなどが用いられる。電子・ビーム精錬は高速熱電子エネルギーを利用するものであるが、1200 kWの大型電子銃も開発されており、メルティングの分野で活発に利用されはじめてきている。精錬は、原理的にはビーム照射された高温部分での選択蒸発（分溜）、すなわち、蒸発成分など不純物あるいは珪酸化物（SiOなど）と主要成分元素との蒸気圧の差を利用する。このため、純金属、高融点金属の精錬にはその精錬特性が有効に活用されることが期待される反面、合金では成分調整のむつかしさが想像される。したがって、加熱方法、溶解方法など成分調整技術の開発が今後必要となる。

4. 新凝固プロセス

4.1 ストリップキャストイング

エネルギーショックを契機としてエネルギー、資源をミニマムにするプロセスの追求が精力的に進められ、その対策の一つとして連続铸造法の適用拡大が計られ、さらに圧延との直結化へと進み、最近では加熱炉を通さずに連铸機から出た铸片を直接圧延する方式も実用化されるに至っている。今後は圧延の負担軽減、さらにはアルミニウム部門等ではすでに実現しつつあるストリップキャスターを鋼用に開発することによつて、铸造から圧延にいたるプロセスの省略が大きなテーマとなろう。

急速凝固法としてはアルミニウムの铸造において現在実施されている技術をはじめ、薄铸片の铸造技術には片ロール方式、ツイーン・ロール方式、双ベルト方式、キャタピラ方式などが挙げられる。鋼の薄铸片铸造に関してはヘイズレー法が研究された経過がある。今後の研究・開発の目標は多岐にわたることが予想され、確実な開発目標の設定と目的に合致した研究計画の立案が主要なポイントとなろう。

この技術が工程に組み入れられるための最大の課題は生産性であり、従つてそれを可能にする設備技術上のアイデアと共に冷却速度を上げるための伝熱現象、境膜現象の研究と冷却速度を上げた場合の初期凝固現象、高温物性研究などの基礎研究が必要となる。

4.2 急速凝固

現在、有害不純物を極限にまで低下し、微量添加元素の特性を有効に活用する製錬技術や制御圧延、熱処理により鋼の機能の向上が計られている。今後は鋼の凝固時の冷却速度 $0.1 \sim 5.0^\circ\text{C/s}$ を $10^2 \sim 10^5^\circ\text{C/s}$ に高めた急冷凝固下での凝固現象や材質特性を研究し、従来とは異なる特徴を持ったプロセスの可能性が検討されるであろう。

極薄・細品の急冷凝固と並んで、より Massive な形

状のものにも極限状態を追求しようとする凝固法も現在いくつか研究されている。二、三の例を以下に示す。

4.3 一方向凝固

一方向凝固鋼塊は、鋼塊の高さが 0.7~1m で底面は 4m 前後の角形または矩形の形状を有しており、定盤上で下注ぎ鋳込みによつて作成される。重量は 20~70 t である。この鋼塊においては凝固組織は底面から上面に向かつて一方向に成長した柱状晶組織となり、偏析、収縮パイプのない健全な内質を有する大単重の鋼塊が得られる。用途は大単重の極厚板材向けであり、圧延においては柱状晶は従来どおり成長方向に対して直角に圧下される。

凝固組織の成長方向と直角方向について機械的性質や加工特性（ことに高温領域での）を比較すると、成長方向の特性が直角方向の特性に比べてはるかに優れている場合がある。これは成分系によつて異なり、とくに高合金系において顕著な場合がある。耐熱超合金鋳物の単結晶凝固法はこの特性を有効に活用した例であるが、他の分野での適応が待たれる。

結晶粒界の数が極めて少なくなるような凝固、あるいは単結晶凝固の連続化ができれば新機能材料として新しい分野が展開できる可能性がある。このような線材あるいは板材が連続鋳造されれば、加工特性と電磁特性に優れた新素材が大量に供給されることになる。加熱鋳型を用いて連続鋳造で一方向凝固材を得ようとするニューアイデアもあり、この方法は現在低融点の種々の材料に適用されてきている。

4.4 粒滴凝固

溶鋼を液滴にして固相を含んだ状態で鋳型内あるいはチル板上に集めて積層凝固させることにより微細な結晶組織を有する鋼塊を得る技術が開発されている。OSPREY 法などのスプレー・キャストや横型 VAR で微細組織を得ようとする VADER 法などがある。これらは複合材料の製造にも適しているようである。これらの方法を用いた場合はマクロ偏析やセミマクロ偏析は原理的にないようであるが、鋳塊内部の凝固の実態はよくわかつてはいない。粒滴が積層して凝固する現象に伴つて、微細な結晶粒度の調整、粒界現象などが新しい研究分野となろう。

4.5 合金粉末凝固

合金融液をアトマイズ法で急冷凝固すると、微細組織を持ち偏析の無い球状の粉末を作ることが可能である。これらの微粒子を、優れた特性を有する新材料開発のための粉末冶金用原料として供給する技術が期待される。今後はこのプロセスによる、均一な粒度分布を持つ粉末の製造法の研究、粉末の凝固及び凝固組織に関する研究および粉末鍛造法例えば DPC 法によつて作られた部品の性質に関する研究が必要となろう。

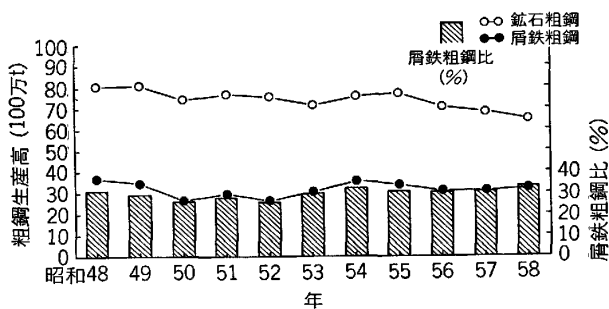
合金薄膜の急冷凝固現象については別な研究が要求されよう。すなわち過冷却凝固からのリカレンスに伴う相変態に関する研究である。金属は急冷凝固によつて静的に過冷却な準安定平衡が形成される。この分野では種々な相の自由エネルギーのヒエラルキー（序列）を具体的に求めることとか過冷却凝固のリカレンスに伴う相変態を熱力学的に実験し説明することが重要な意味を持つてくるであろう。

研究課題としては個々のプロセスに特有のものももちろん多いが、凝固結晶方位のコントロール、固-液共存時の凝固過程、塑性加工-再結晶挙動-材料性質などは多くのプロセスに共通した課題と考えられる。

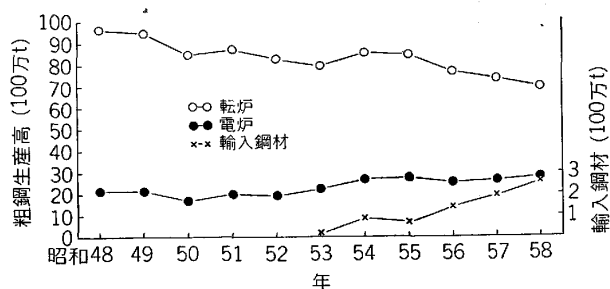
あ と が き

これからの製鋼分野での研究開発は現有の主要生産手法にかかわるテーマと、全く新しい新技術、新用途、新手法にかかわるクリエイティブなテーマとの二方面への展開が顕著になつてこよう。いずれも日本の鉄鋼業のサバイバルに不可欠な役割を期待されている。後者については研究目標の模索から開発能力（人材、期間、費用）の投与にいたるまでには、従来以上の先見性と、洞察力によつて作られた（忍耐強い）研究計画に基づいた目標選択と決断を行うことが必要となる。ここでは限られた条件のもとで、前記 4 項目について取りまとめた。これを一つの新しい試みのスタートとして精練と凝固現象の科学性を広範囲に応用するために、大いに議論されるきっかけになることが望まれる。

上記二方面の研究開発の努力は表裏一体、相互に関連して、製鋼技術全体の発展と、新しい製鋼分野としての新技術、新用途、新機能の開発をもたらすものである。



付図1 暦年全国粗鋼生産分析



付図2 暦年全国粗鋼生産高

(付図1, 2ともデータは「鉄鋼統計月報」(通商産業大臣官房調査統計部)による)

研究委員会調査研究小委員会委員

(昭和59年3月末現在)

氏名	所属・役職
委員長 川上 公成	日本鋼管(株)・技術研究所・第一研究部製鋼研究室長
委員 浅井 滋生	名古屋大学・工学部鉄鋼工学科・助教授
岡本 平	大阪大学・産業科学研究所・所長兼教授
坂田 直起	日本エネルギー経済研究所・研究部・主任研究員
雀部 実	千葉工業大学・工学部金属工学科・教授
佐野 信雄	東京大学・工学部金属工学科・教授
水渡 英昭	東北大学・選鉱製錬研究所・助教授
福沢 章	金属材料技術研究所・工業化研究部・第二研究室長
池田 隆果	住友金属工業(株)・中央技術研究所・主任研究員兼製鋼研究室主任

氏名	所属・役職
梶岡 博幸	新日本製鉄(株)・第三技術研究所・製鋼研究センター所長
片山 裕之	新日本製鉄(株)・第三技術研究所・製鋼研究センター主任研究員
高橋 正章	新日本製鉄(株)・設備技術本部・製鋼プラントエンジニアリング部・部長代理
中西 恭二	川崎製鉄(株)・技術研究所・水島研究部第一研究室長
野崎 輝彦	(株)神戸製鋼所・開発企画部・企画担当次長
垣生 泰弘	川崎製鉄(株)・技術研究所・第一研究部製鋼研究室長
湯浅 悟郎	大同特殊鋼(株)・中央研究所研究第二部・主席研究員
事務局 山村 武	日本鉄鋼協会・技術部主査
竹村 裕	日本鉄鋼協会・技術部主査