



低環境負荷・資源循環型対応の製鉄プロセス

A State of the Art and Development in Mini-mill Process Technology for Sustainable Steel

梅澤 修
Osamu Umezawa

横浜国立大学 大学院工学研究院
助教授

はじめに

我が国の鉄鋼メーカーは現代の一貫製鉄プロセスを確立し、高級かつ安価な鉄鋼材料の大量生産を続けてきた。その技術開発は世界に冠たるものであり、諸先輩方の努力と成果に敬意をはらいたい。各種材料の国内年間総生産量(重量比)を比較検討しても、鉄鋼はコンクリートとともに総量をほぼ二分する主要材料である。すなわち、我が国のインフラ(内需)の根幹をなす不可欠な材料である。一方、鉄鋼は旧来より製品リサイクルの優等生として挙げられる材料であるが、第二次世界大戦後に整備されたインフラ設備の更新時期を迎えつつあり、図1に示すように鉄スクラップの増大が見込ま

れる。しかも、ここ数年のうちに日本の総人口は減少に転じると予測されており¹⁾、一人あたりの鉄スクラップ発生量はさらに増えることになる。したがって、国土に蓄えられた鉄鋼製品の状況は、欧米におけるそれに近づきつつある。世界に目を向けてみると、中国の高度経済成長や米国における鉄スクラップ需要の高まりがあり、余剰な鉄スクラップを輸出するという解もある。しかし、我が国の将来にわたっての利益という視点から、それで良いのだろうか。

政府はミレニアム・プロジェクト事業を開始し^{2,3)}、その実施施策の一つである「資源循環型社会における物質・材料技術に関する調査」については、(社)未踏科学技術協会エコマテリアル研究会内に発足(平成12年4月)した調査委員会が担当して進めてきた⁴⁾。本調査は、資源循環型社会を支えるために開発すべき物質・材料技術課題を明確にすることを目的とし、自動車、鉄鋼・アルミニウム・ポリマー等の製品・素材、リサイクル関連等の企業や研究機関における取り組みの現状および今後の方向性についてまとめている。表1に鉄鋼関係の調査訪問先を示す。本稿では、それら調査内容を基に、低環境負荷あるいは資源循環型に対応する製鉄プロセスとして期待される薄スラブ連続鋳造/ミニ熱間圧延プロセスおよびストリップ連続鋳造を中心に展望してみる。そのため、薄板を中心とした普通鋼板が対象であること、製鉄プロセスや環境対策技術など⁵⁾について省くことをお許し願いたい。

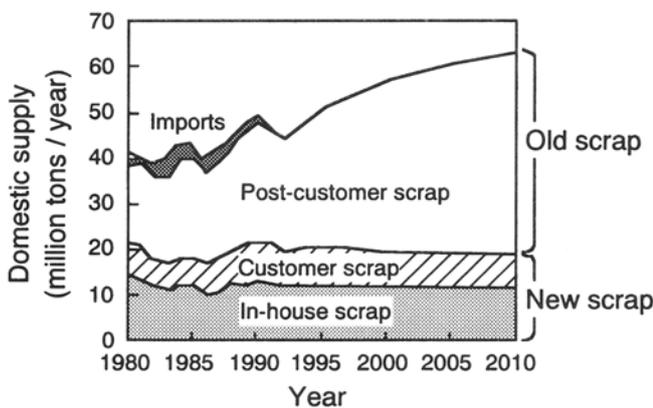


図1 日本におけるスクラップ量変化予測

表1 調査委員会における鉄鋼関係の調査訪問先

	Steel			Car Scrapping	Electronic Scrapping/ Secondary Materials
	BF/BOF	EAF	Special		
Domestic / 2000-2001	Nakayama	Tokyo	Aichi	Toyota Metals West-Japan Auto Recycle	Higashi-hama Recycle Center
USA / 2000		TRICO SDI			INMETCO
EU / 2001	CORUS			ECRIC	Arra terra Verbundstoff
	Thyssen Krupp				
	IRSID-USINOR	CSM Terni/AST			

② ミニミル

2.1 ミニミルとは

ミニミル (Mini-mill) という概念は、電気炉製鋼と棒・形鋼の連続鋳造機を組み合わせた結果生まれ、ミニミルメーカーは1960年代に米国を中心として発展した。ミニミルという用語は、例えば、粗圧延機や中間圧延機などを配さずに、仕上げ圧延機のみで鉄鋼生産を行う製造ラインの短い熱間圧延 (ミニ熱延ミル) 工場およびシステムを一般的に指すと筆者は理解している。したがって、旧来のミニミルは鉄筋棒鋼や小形形鋼を生産している。ここでは第1世代ミニミルと呼ぶことにする。

2.2 薄スラブ連続鋳造との出会い

1980年代末にNUCOR (米) Crawfordsville 工場の薄スラブ連続鋳造/ミニ熱延ミル (CSP) にはじまった米国での電気炉製鋼による薄鋼板製造は、その後、大きなインパクトを世界の鉄鋼メーカーに与えた。関連する著述も多く、薄スラブ連続鋳造の概要は文献等^{6, 28)}を参照いただきたい。安い電気代と広大な平原 (鉄スクラップの収集に有利な場所) を利用したミニミルの供給する安価な鋼板は、スクラップを主要な鉄源としている。これを第2世代ミニミルと呼ぶことにする。図2は一貫製鉄プロセス (Integrated) とミニミルプロセス (Mini-mill) の工程を示している。第2世代ミニミルの基本構成は、電気炉 (EAF)、レードル炉 (LF)、薄スラブ連続鋳造機 (TSC)、トンネル炉 (RHF: ロール炉床)、熱間圧延機、冷却テーブル、コイラーである。従来の一貫製鉄所における薄板の生産は、高炉や転炉はもとより、連続鋳造機

(CC) や熱間圧延機 (Hot Strip Mill) の大きな設備投資、広大な用地と薄板の広範な市場を必要とした。地域的な薄板需要に対して新規に参入する企業にとっては、少ない設備投資で柔軟な生産と省エネルギーなどが達成できるミニミルプロセスは、渡りに船であったわけである。この第2世代ミニミルにおける最大の技術的ポイントは、SMS (独) のM. Kolakowski 技師が発明したFunnel型のフットボールモールドにあり、1980年代にSMSが初めて薄スラブ連続鋳造の実用化に成功した。

NUCORが薄スラブ連続鋳造を導入した時期に、東京製鉄 (株) 岡山工場ではスラブ連続鋳造を選択した。我が国における経済性 (電力費など) と、鋼板の品質、ミニミル黎明期のリスク等を考慮した結果であろう。電気炉一薄スラブ連続鋳造の導入にあたっては、地域的な条件・問題の大きいことが伺える。

ここで、ミニミルや薄スラブ連続鋳造関連で使用される略語を表2に、また、代表的な薄スラブ連続鋳造プラントの一覧を表3にまとめて示す。Funnel型のフットボールモールドで薄スラブ連続鋳造を行うSMSのCSPプロセスをはじめ、MDH (独) のISPプロセス (DSPも含む)、Danieli (伊) のFTSCプロセスと、長方形モールドで中厚スラブ連続鋳造を行うVAI (奥) のCONROLLプロセス、SHI/SMI (日) のQSPプロセスとが実機化している。各プロセス別生産能力の割合は、大まかにCSP: 59%、FTSC: 13%、ISP: 10%、QSP: 9%、DSP: 5%、CONROLL: 4%と試算されている。近年の欧州における大企業の合併・再編の中でSMSとMDHが合併したSMS-Dが世界の「薄スラブ連続鋳造—ミニミル」プラント市場を席巻しているのが実情である。

2.3 未凝固域圧下とミニミル工場レイアウト

薄スラブ連続鋳造技術の進歩は目覚ましく、ISPプロセス^{29, 30)}に始まるモールド内での未凝固域圧下 (LCR)¹⁴⁾技術を取り入れたプラントが1990年代前半に稼働し始めた。第2世代のCSPプロセスを最初に投入したSDIを2000年夏に訪問したが、実生産において未凝固圧下はなされておらず50 mm厚さで鋳造していた。50 mmより薄いと、スラブの温度低下が問題になるようである。しかし、SDI以降に立ち上がったCSPプロセスは、ISP, QSP, DSPの各プロセスと同様に未凝固圧下機能を備えており、極薄スラブ (40 mm厚以下) の製造や、モールド壁の間隔を大きくして50 mm厚の標準的な薄スラブを製造することが可能である。つまり、スラブ厚さを中厚 (80 mm厚さ程度) から極薄まで可変できることになる。薄スラブ連続鋳造機の鋳造速度は約5 m/minと速いため、中厚スラブでの生産能力はスラブ連

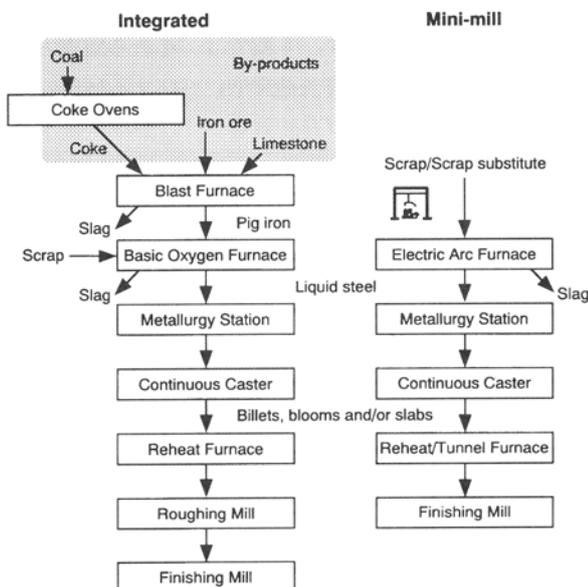


図2 一貫製鉄プロセスとミニミルプロセス

表2 薄スラブ連続鋳造およびストリップ鋳造に関する主な略語

Category	Short Title	Full Name	Comments
Process & Technical terms	BF	Blast Furnace	
	BOF	Basic Oxygen Furnace	
	CC	Continuous Casting	
	CC-DR	CC-Direct Rolling	
	CONROLL	Continuous Thin Slab Casting and Rolling Thechnology	VAI
	CPR	Casting Press Rolling	
	CSP	Compact Strip Production	SMS
	DRI	Direct Reduced Iron	
	DSP	Direct Sheet Plant	Corus (Hoogovens) with MHI and MDH
	EAFF	Electric Arc Furnace	
	EMBR	Electromagnetic Brake	
	FTSC	Flexible Thin Slab Caster	Danielli, Italy
	HCR	Hot Charge Rolling	
	HDR	Hot Direct Rolling	
	HBI	Hot Briquette Iron	Briquette of DRI
	ISP	Inline Strip Production	MDH
	Krupp Ecco Mill	Krupp Economic Compact Mill	Krupp Industrietechnik, Germany
	LCR	Liquid Core Reduction	
	NNSCC	Near Net Shape Continuous Casting	
	PTF	Pusher Type Furnace	Reheat Furnace
	QSP	Quality Strip Production	SMI/SHI
	RHF	Roller Hearth Furnace	Tunnel Furnace
	SC	Strip Casting	
	SEN	Submerged Entry Nozzle	
	TSC	Thin Slab Casting	
	UTHS	Ultra Thin Hot Strip	Chaparral Steel, USA; MD Stack, Germany
WBF	Walking Beam Furnace	Reheat Furnace	
Company & Institute	AST	Acciai Speciali Terni	Italy
	CSM	Centro Sviluppo Materiali S.p.A.	Italy
	Danielli	Danielli Centro Met	Italy
	IDI	Iron Dynamics, Inc.	subsidiary of SDI, USA
	IHI	Ishikawajima-Harima Heavy Industries	Japan
	IRSID	Institut de Recherches de la Siderurgie Francaise	group of USINOR, France
	MDH	Mannesmann Demag Huttentechnik	merged with SMS, Germany
	MHI	Mitsubishi Heavy Industries	Japan
	SDI	Steel Dynamics, Inc.	USA
	SHI	Sumitomo Heavy Industries	Japan
	SMI	Sumitomo Metal Industries	Japan
	SMS	Schloemann Siemag AG	now SMS-Demag AG, Germany
	TKS	Thyssen Krupp Stahl AG	Germany
	VAI	Vöest-Alpine Industrieanlagenbau GmbH	Austria

連続鋳造と遜色ないレベルに近づきつつある。また、中厚スラブ鋳造では、モールド壁の拡大あるいはモールド形状を長方形にすることが可能になるため、不純物の浮上除去やパウダー供給などが容易となり、スラブの品質向上に有利である。なお、ISPでは、未凝固域圧下に加えて、薄スラブ連続鋳造モールド下部における凝固直後圧延によって極薄スラブの製造を図っているが、制御が難しい高度な技術である。

また、薄スラブ連続鋳造機（生産能力を律速している）およびトンネル炉を2基並列（2ストランド）とし、トンネル炉の最終セグメントあるいはその前段セグメントが稼働する（平行移動、スイッチバックなど）ことにより、1基のミニミルと組み合わせる工場レイアウトが主流となってきている。これにより、1ストランドの場合と比べ生産能力が倍増する（約200万トン/年）。もちろん、それに併せて電気炉も、1基の交流アーク電気炉から、電極をスイングして2基で共用するように、また、直流アーク電気炉（約200トン容量）へと進化を続けており、出鋼サイクルは約50分/基である。

トンネル炉の全長は大体200-300mと長く、薄スラブミニミル工場における特徴である。そして、「薄スラブ連続

鋳造機—トンネル炉—圧延機」は一体で稼働しており、トンネル炉は生産時のトラブルに対処するためのバッファの役割も兼ねている。逆に言うと、生産時のトラブルに対して、薄スラブを鋳造し、後に再加熱して圧延するような柔軟性がないのである。何故ならば、薄スラブは比表面積が大きく、スケール被膜が薄いため、スラブ表面の不完全性（オシレーションマークなど）をスケール被膜に取り込み、デスクレーパーで除去する手法が適用困難なためである。トンネル炉は、スラブ加熱炉（WBF等）と比較して以下の特徴を持つ。建設費が安い、機械のメンテナンスが容易、加熱温度が均一、エネルギー消費量が小、バッファ時間が短い（20-40分）などである。しかし、レイアウトがコンパクトでなく、設備設置に困難さを伴う。

圧延機は、当初の仕上げ6スタンド（CSP）から、7スタンド（CSP）、あるいは、粗圧延機2スタンドと仕上げ圧延機5スタンド（QSP,DSP）が主流になっており、1mm厚の熱延鋼板を製造できる。圧延機には最新の技術が導入されており³¹⁾、SMSのCVC（連続クラウン可変ロール）³²⁾やMHIのPCM（ペアクロスミル）³³⁾が代表的である。CPR、Krupp

表3 主要な「薄スラブ連続—ミニミル」設備一覧¹³⁻¹⁶⁾

Region	Nation	Plant/City	Number of strand	Startup	Caster machine	Capacity kty	Slab thickness mm	Slab width mm	Liquid core reduction	Mini-mill machine	Hot strip thickness mm
North America	Canada	Algoma Steel/Sault Ste Marie	2	1997	Daniell	2,000	90 (70)	800/1,600	available	Daniell	min 1.0
	USA	Acme Steel/Riverdale	1	1996	SMS	900	50	900/1,600	none	SMS	min 1.25
		Armco/Mansfield	1	1995	VAI	1,100	100/132	635/1,283	none	-	min 1.7
		Gallatin/Warsaw	1	1995	SMS	1,000	50	1,000/1,560	none	SMS	min 1.65
		Ipsco/Montpeller	1	1997	MDH	1,300	100/150	1,220/3,050	available	MHI	min 2.29+thick
		Nucor Steel/Crawfordsville	2	1989/94	SMS	1,800	50	950/1,375	none	SMS	min 1.43
		Nucor Steel/Hickman	2	1992/94	SMS/Daniell	2,000	50 (40)	1,220/1,620	available	SMS	min 1.5
		Nucor Steel/Berkeley	1	1996	SMS	1,500	50	1,220/1,680	available	SMS	min 1.45
		North Star-BHP Steel/Delta	1	1996	SHI+SMI	1,500	90	900/1,560	none	MHI	min 1.4
		Steel Dynamics Inc./Butler	2	1995/98	SMS	2,000	50	990/1,560	available	SMS	min 1.0
	Trico Steel→Nucor/Decatur	2	1997	SHI+SMI	2,200	90 (70)	914/1,650	available	Insa/MHI	min 1.0	
Tuscaloosa/Tuscaloosa	1	1996	SMS	1,000	127	914/2,591	none	SMS	thick		
Mexico	Hylsa SA/Monterrey	2	1995/98	SMS	860	50	790/1,375	none	SMS	min 0.91	
Europe	Netherlands	Corus/Ijmuiden	1	2000	MDH	1,300	70/90	900/1,200	available	MHI	min 1.0
	Czech	Nova Hut/Ostrava	1	1995	VAI	1,000	125/150	740/1,575	none	-	min 1.5
	Germany	ThyssenKrupp Stahl/Duisburg	2	1999	SMS	2,000	70 (48)	900/1,600	available	SMS	min 1.0
	Italy	Arvedi/Cremona	1	1992	MDH	500	60 (40)	650/1,330	available	MHI	min 1.0
		AST/Terni	1	1992	SMS	1,000	70 (63)	1,000/1,500	available	SMS	-
	Spain	Aceria Compacta/Bilbao	1	1996	SMS	900	53	905/1,560	none	SMS	min 1.3
	Sweden	Avesta-Sheffield/Avesta	1	1988	VAI	600	100	1,400/2,100	none	-	thick
East Asia	Korea	Hanbo Steel/Asan Bay	2	1995	SMS	2,000	50	800/1,650	none	SMS	min 1.5
		Posco/Kwangyang	2	1996	MDH	1,800	60	800/1,350	available	MHI	min 1.2
	China	Zhujiang Steel/ -	1	1999	SMS	1,000	50	1000/1350	-	SMS	min 1.0
		Baotou Steel/ -	2	2000	SMS	2,000	-	800/1650	-	SMS	min 0.5
		Handan Iron/ -	1	2000	SMS	800	70	900/1680	none	SMS	min 1.2
South/Eastsouth Asia	India	Nippon Denro Ispat/DohM	1	1996	SMS	1,200	50	900/1,560	none	SMS	min 1.2
	Malaysia	Mega Steel/Port Klang	2	1998	SMS	2,000	50	900/1,560	none	SMS	min 1.2
		AMS/ -	2	1998	SMS	2,000	-	-	-	SMS	-
	Thailand	NSM Nakornhai/Chonburi	1	1997	SMS	1,200	45/70	1,220/1,600	none	SMS	min 1.2
		Siam Strip Mill/Rayong	1	1998	SHI+SMI	1,700	100 (80)	1,000/1,550	available	MHI	min 1.0
Africa	South Africa	Sakdanha Steel/Rivoria	1	1998	MDH	1,400	75/90	900/1,650	none	MHI	min 1.0

Ecco Mill³⁴⁾やUTHSなどの大圧下技術の開発が進められたが、製造プラントへの導入・稼働は見送られているようである³⁵⁾。一貫製鉄所における熱間圧延機ラインと大きく異なるのは、粗圧延機や中間圧延機などが省略されているか、タンデム粗圧延機のみであるため、トンネル炉出口から仕上げ圧延機入口までの距離が短いことである。また、冷却テーブルの全長も数十mと短い。

このように未凝固域圧下を備えた薄スラブ連続鑄造機への進化、最新の圧延技術や制御技術の採用によりミニミルは北米から欧州、そしてアジアへと広がり、薄鋼板を製造する一大勢力が形作られた。これらを第3世代ミニミルと呼ぶことにする。同時に安定した鉄源供給を確保するため、例えば、SDI²⁷⁾では回転炉床を用いて「鉄鉱石粉+石炭粉」を直接還元して銑鉄を製造するなどの取り組みが進められている。

2.4 一貫製鉄プロセスとの組み合わせ

1990年後半以降、Algoma製鉄：FTSC、Thyssen Krupp製鉄 (TKS)：CSP^{36,37)}、Corus (旧Hoogovens)：DSP^{38,39)}といった一貫製鉄メーカーが、「薄スラブ連続鑄

造—ミニミル」ラインを従来の一貫製鉄プロセスと組み合わせるプラントを立ち上げた。すなわち、BF-BOF-TSC/Mini-millプロセスの登場である。TKSでは老朽化した工場をこの新プラントに更新するなど、もはやミニミルの存在は製鉄所の再編・合理化や資源循環型・低環境負荷型プロセスへの移行と相まって切り離せない状況にある。図3にミニミルの一貫製鉄ラインとの組み合わせプロセスの流れを、他のプロセスと併せて示す。2001年夏に訪問したTKSとCORUSでは、転炉から出湯した溶銑 (300トン/チャージ) を取鍋でミニミルラインのレードル炉に供給している。したがって、BF-BOF-TSC/Mini-millプロセスは製品に応じた一貫製鉄ラインとミニミルラインの選択ができ、ミニミルラインのトラブル時の対応などの柔軟性もEAF-TSC/Mini-millプロセスより優れていると予想される。

POSCOのように独立してミニミルを有する一貫製鉄メーカーはあったものの、このBF-BOF-TSC/Mini-millプロセスにより「ミニミル=電気炉メーカー」という図式が崩れたわけである。従来の電気炉製鋼では、窒素のピックアップによる高N (鑄造時70-80ppm)の問題が避けられない。高

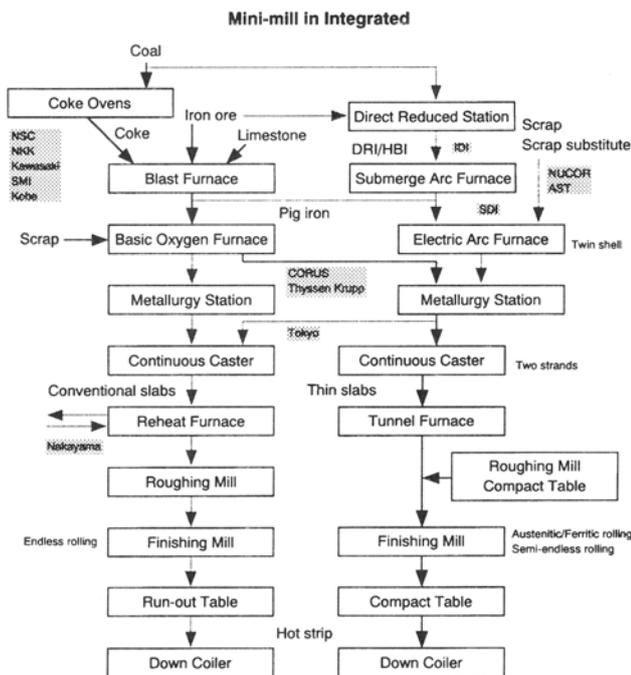


図3 各製鉄プロセスの工程概要

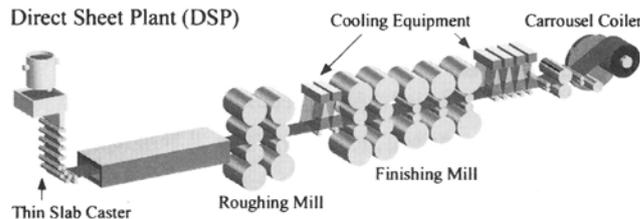


図4 DSPラインの概念図

炉・転炉製鋼では casting time N : 30-40ppm であり、侵入型元素の固溶量を低める高級鋼の製造に有利である。しかも、転炉から供給される高品質な溶銑と、薄スラブの冷却容易性を利用した、少量・多品種に対応する材質制御を意図してプラントの設計がなされているのが最大の特徴である。すなわち、中厚スラブに未凝固域圧下(スラブの結晶粒径と偏析に影響)を施すと同時に、冷却と熱間圧延プロセスに工夫が凝らされている。図4に薄スラブ連続铸造—ミニミルラインの概念図例(CORUS)を示す。多品種・少量生産に向けて、同一組成から(同一チャージの薄スラブ毎に)金属組織と特性の異なる鋼板を製造できるよう、仕上げ圧延前の冷却条件(中間冷却やカーテンウォール冷却によるオーステナイト域圧延とフェライト域圧延の選択)、圧延条件(各スタンドでの圧下率)、半連続圧延(強加工)、冷却条件(相変態と結晶粒径)と巻き取り温度(再結晶と析出)が細かく制御されている。

以上より、BF-BOF-TSC/Mini-mill プロセスは第3世代ミニミルの発展型と位置づけられる。当初の安価な鋼板を供給するというミニミル製品の位置づけから、寸法規格精度、寸法の均一性、力学特性の均一性が高く、オーダーへの対応が早いミニミル製品への脱皮が進んでいる。

3 ニアネット铸造・直送圧延と材質制御

3.1 フェライト圧延

前述のように、薄スラブ連続铸造—ミニミルプロセスにお

ける材質制御は、(1) 未凝固域圧下：スラブの結晶粒径と偏析、(2) 仕上げ圧延前温度：オーステナイト域圧延とフェライト域圧延の選択、(3) 圧延率：加工組織、(4) 圧延後冷却速度(最大約400℃/sec)：相変態と結晶粒径、(5) 巻き取り温度：析出物と結晶粒径、が主たる内容である。特に、中間冷却やカーテンウォール冷却と圧延後冷却の組み合わせにより組織制御に柔軟性が得られた。すなわち、オーステナイト再結晶域、オーステナイト未再結晶域(A_{r3}変態点近傍)とフェライト域での圧延、加工量、加工後の冷却速度と巻き取り温度の組み合わせによって種々の材質制御が可能となる。フェライト圧延(Ferritic Rolling)⁴⁰⁾は低温強加工による結晶粒微細化に有効である。また、圧延後の冷却によっては、粗大な再結晶組織を得て、低降伏比で成形性に優れた鋼板を製造することも可能である。同様な連続熱間圧延プロセスにおける材質制御については、川崎製鉄(株)千葉製鉄所の全連続熱間圧延や中山製鋼所(株)船町工場の強加工連続熱間圧延^{41,42)}における取り組みが先んじている。

3.2 ストリップ連続铸造

ヨーロッパにおけるストリップ連続铸造^{6,35)}の技術開発は、Myosotisプロジェクトに始まるUSINORとTKSの共同研究と、VAIとASTの共同研究(VASTRIP)とが統合したEUROSTRIPプロジェクトのもとで進められている⁴³⁻⁴⁸⁾。KTN(Krupp Thyssen Nirosta)のKrefeld-PIP(Pre-Industrial Plant)、ASTのTerni-PP(Pilot Plant)、Aachen工科大およびIRSIDの研究設備がある。図5にストリップ連続铸造ラインの概要を示す。いずれも電気炉製鋼との組み合わせで、双ロール連続铸造機(垂直型)とインライン圧延機で構成されている。304ステンレス鋼板の他、炭素鋼や電磁鋼板(AST)が対象である。

BHPとIHIは、双ロールストリップ連続铸造とインラインの1スタンド圧延機からなるシステムを立ち上げ、1.3~2.1mm厚の炭素鋼の製造に成功した。このシステムでは、8mass%Cu(通常は<0.1mass%Cu)までを許容する炭素鋼の製造ができると報告されている。NUCORはCrawfordsville工場にこのシステムを導入中である。ストリップ連続铸造では、鋳片の高温保持時間が非常に短く、スケール

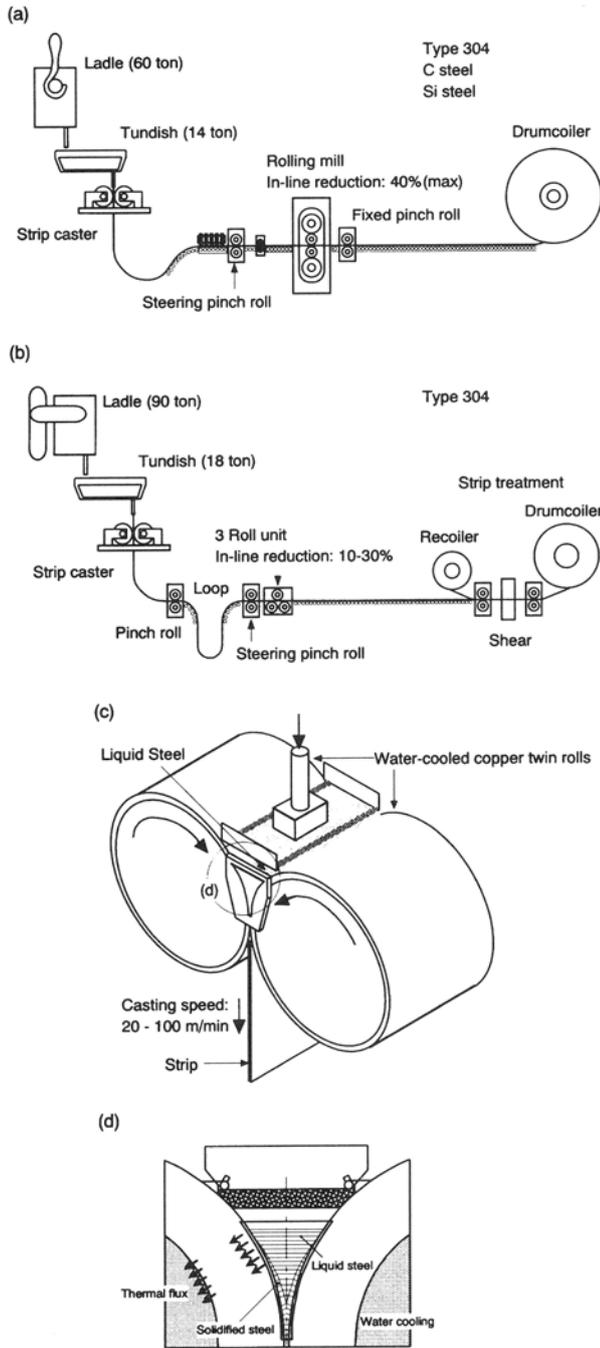


図5 ストリップ連続铸造ラインの概念図
(a) Terni PP, (b) Krefeld PIP,
(c) 双ロール法概念図, (d) 铸造部拡大図

の形成がわずかであることから、Cu含有にともなう鋼板表面の熱間脆性割れ⁴⁹⁾を回避しやすい。図6に示す老廃スクラップ中のCu濃度予測によれば、平均Cu濃度は0.2 mass%を超え、さらに増加する見込みである。そのため、スラブ铸造による薄鋼板製造においては、銑鉄などによる溶銑の希釈なり、低Cu濃度スクラップ利用などの対策が必要である。また、凝固速度が非常に大きいため、不純物元素を過飽和に固溶あるいは微細な凝固マイクロ偏析を形成する⁵⁰⁻⁵¹⁾。したが

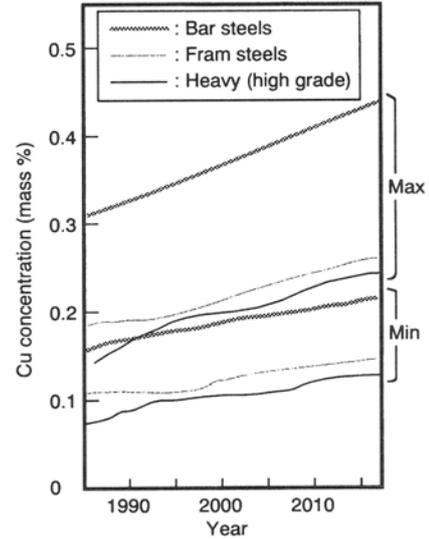


図6 国内老廃スクラップ中のCu濃度変化予測

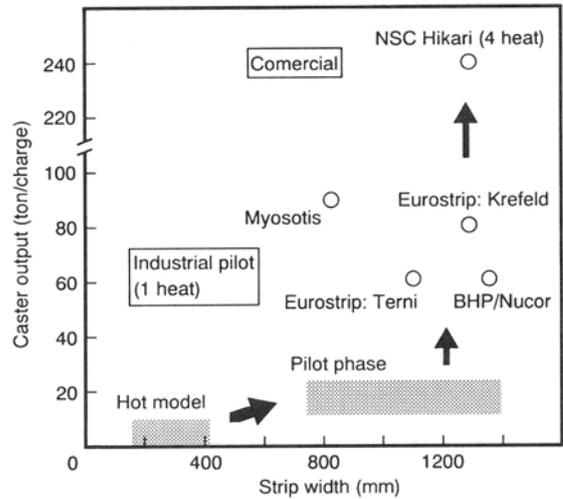


図7 ストリップ連続铸造プラントの開発状況

って、Cuの他、PやSなど精錬によりスラグ中に除去する不純物についてもそれらの許容範囲が拡大できる。ストリップ連続铸造は、CuやSnといったトランプ元素を含有するスクラップを鉄源とする場合や脱燐および脱硫の負荷を軽減する場合に有効性を発揮すると期待される。

また、ストリップ連続铸造技術をリードする新日本製鐵(株)(光製鐵所)は、三菱重工業(株)と共同開発したストリップ铸造によるステンレス鋼板の実生産段階に入った⁵²⁾。各プラント規模の概要は、図7のように整理され、各ストリップ铸造プラントの鋼板生産規模は年産100万トン以下である。表4に示すように薄スラブ連続铸造や一貫製鉄プロセスと比較すると、生産規模および設備規模は数分の一である。しかし、ストリップ铸造プラントや薄スラブ連続铸造プラント(電気炉製鋼あるいは既存の高炉および転炉を用いる場合)の建設費や設備投資額は一貫製鉄よりもはるかに小額ですむ

(図8)。多品種・少量生産に対応するのであれば、これらニアネット鑄造プロセスは、生産能力当たりの新規投資額と生産コストともに一貫製鉄プロセスよりも有利である。ただし、薄スラブ連続鑄造とストリップ鑄造のコスト差異は小さく⁵³⁾、また、ストリップ鑄片固有の表面品質などが問題となる³⁵⁾。したがって、ストリップ鑄造プラントでは、対象鋼種が何であるか、その生産量や鉄スクラップ中の不純物などの問題について、薄スラブ連続鑄造に対する有利性が需要である。消費エネルギー (MJ/ton) およびCO₂排出量 (kg/ton) について、簡略な予測結果を図9に示す。高炉一転炉 (還元) プロセスの環境負荷の大きさは如何ともし難く、電気炉製鋼の約4倍近い負荷として算出される。なお前提条件として、電気炉での消費電力を約400kWh/ton、鑄造機の消費電力を約70kWh/ton (鑄造機の違いは無視)、材料は0.1mass%炭素鋼、炉の加熱温度は、入口で1000℃、出口で1200℃とした。電力のCO₂排出量換算は0.456kg/kWhである。

3.3 加工熱処理と材質制御

薄スラブ連続鑄造やストリップ鑄造を基本とした薄鋼板製造新プロセスは、コスト、環境負荷等での優位をより高めなければならない。したがって、高品質鋼の製造を目指すだけでなく、単純成分系で多様な特性を組織制御によって発現することや、不純物許容組織制御法に新機軸をおかざるをえない⁵⁰⁾。すなわち、微細凝固組織制御と超微細粒を生成できる (必ずしも最終的な金属組織が微細粒であるという意味ではない) 加工熱処理ラインであることが重要な要件となる。し

かも、直送圧延 (HDR) による実現と、圧下量が限られるという制約を克服する困難が存在する。直送圧延材の材質制御研究は、国内鉄鋼各社において精力的に研究開発が進められてきた。1980年代半ばに田村⁵⁴⁾によるまとめがなされている。近年、同協会講演大会や大学・研究機関の場において、凝固組織から一貫した組織制御を課題とする研究討議が活発化しており、新プロセスを念頭に置いた凝固一直送圧延による組織制御について再考する時期を迎えたのではないだろうか。

ミニミルによる高品質鋼の生産は可能であろうか。高N鋼は高強度であるが、マーケットが小さく、衝撃吸収エネルギーを下げる問題点を有している。さらに、冷間圧延や溶融垂鉛メッキに悪影響をもたらすことから、一般的には溶湯中のN量を下げることが求められる。他の不純物としてはCu、Ni、Cr、Sn、Moが代表的であり、いずれも表面品質などへの悪影響があることから、それら不純物の低減が求められる。しかし、自動車向けの製品が多いSDIでは、1mm厚の熱延鋼板の製造、自動車向け高N熱間圧延板 (ドローイング製品) や高級熱間圧延板の開発が進んでいた。ミニミル製品が高付加価値化の流れを歩むのは必然であろう。そのためには、高強度であることを生かしつつ、成形性と韌性の確保が必要である。成形性と低温韌性向上のために、圧延温度の低温化による組織の微細化が指向されている。しかし、低温圧延 (フェライト域圧延) では異方性の強い集合組織が発

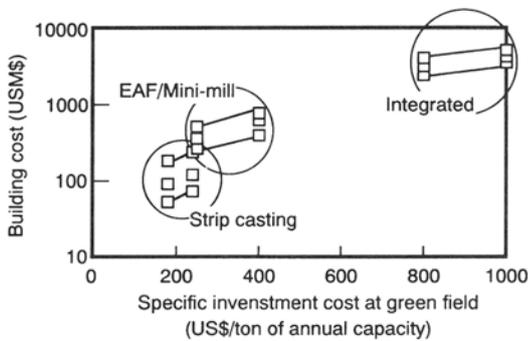


図8 各製鉄プロセスの設備投資額見積もり

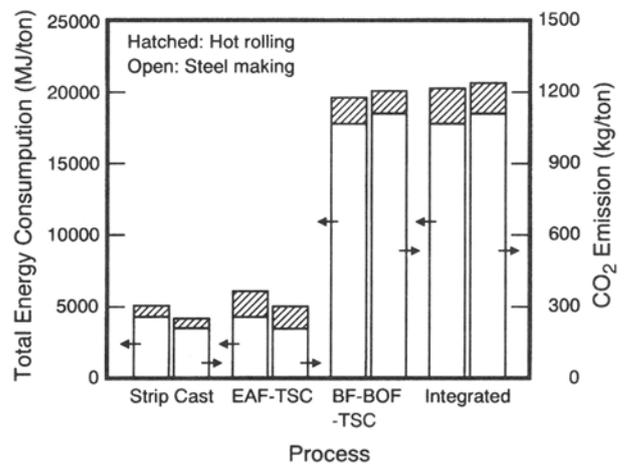


図9 各製鉄プロセスの環境負荷予測

表4 鑄造方法による生産比較

	Strip casting	Mini-mill	Integrated
Steel making	EAF	EAF/BF-BOF	BF-BOF
Casting (1 or 2 strands)	strip	thin slab	conventional
Cast thickness (mm)	1.5 to 6	40 to 100	180 to 250
Mill	0/2 stand hot mill	compact mill	hot strip mill
Production capacity (Mton/year)	0.3 to 1.0	1.0 to 2.0	3.5 or more

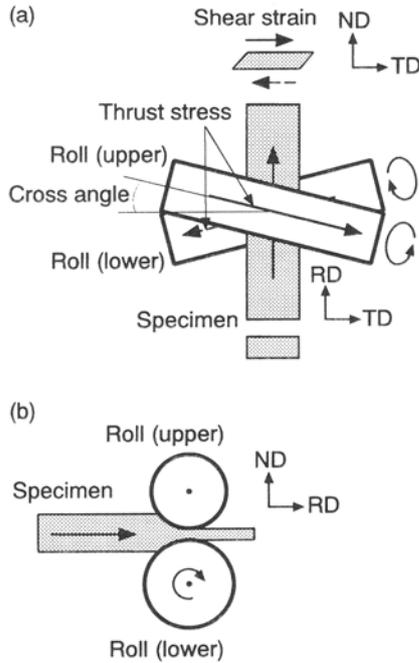


図10 大クロス圧延 (a) と小径異径片駆動圧延 (b) の概念図

達し、セパレーション等の弊害を生じることから、結晶方位のランダム化が必要となる⁵⁵⁾。また、結晶粒の微細化とランダム化は不純物許容組織としても有効である⁵⁵⁾。すなわち、粒界面積の増大による粒界偏析元素の希釈の効果や、粒界脆性におけるき裂発生抵抗の上昇である。ところが、ランダム方位を有する微細結晶粒組織制御を施すには、多方向加工が必要となる。平圧延において加工方向を変えずに多方向加工を施すには、付加的せん断ひずみを導入する以外に工業化に適合する方法が見当たらない。方法としては、従来からクロス圧延や異周速圧延が知られている。図10にクロス圧延⁵⁶⁾と小径異径片駆動圧延の概念図を示す。後者は、すでに中山製鋼所(株)の強加工熱間圧延システムに組み込まれ、実機化している⁴¹⁻⁴²⁾。図11は、アルミニウムを用い、0度から10度のクロス角度(一方向クロス)を与えた場合のせん断変形の様子を板中心部のスリット(板厚方向)によって調べた結果を示している。大クロス圧延は、集合組織異方性を圧延方向(RD)からずらす(一方向クロス)、あるいは緩和する(交互クロス)効果がある。また、大クロス圧延は板幅方向のせん断変形を付与するため、限られた圧下量でも相対ひずみ量をより大きくすることが可能となる。さらに、交互クロス圧延では降伏比が小さくなる効果などを見いだしている。したがって、熱間圧延での圧下量が制限されるストリップ鋳造や薄スラブ連続鋳造では、インラインの大クロスミニミル圧延と組み合わせるのが有効と考えられる。

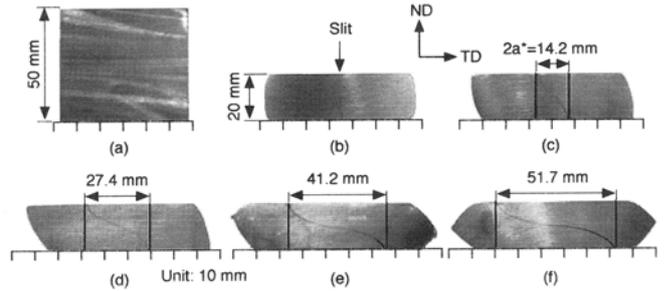


図11 図10 3パス(厚:50-40-30-20mm)一方向クロス圧延を施したAlのRD断面写真
(a) 未圧延材, (b) クロス角 0deg, (c) クロス角 2.5deg, (d) クロス角 5deg, (e) クロス角 7.5deg, (f) クロス角 10deg

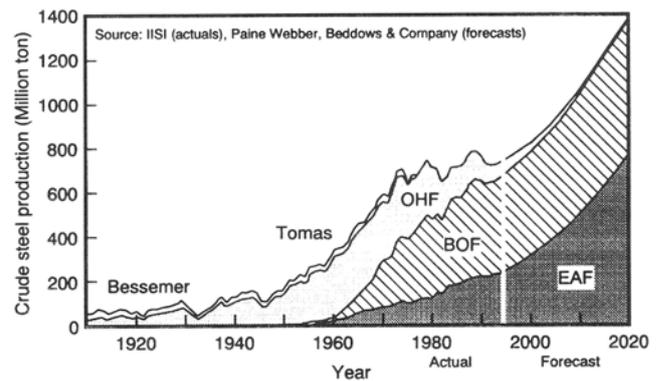


図12 世界の粗鋼生産量予測(製鋼法別)
EAF:電気炉, BOF:LD転炉, OHF:平炉

4 多様なプロセスの共存

既に先進工業国で生き残っている一貫製鉄所は、ほぼ例外なく「大型高炉—大型転炉—大型熱延工場」が枢軸骨格となっている。すなわち、最大の鋼材市場である薄板製品を生産する高効率の薄板工場を持たない製鉄所は、高炉の維持も一貫製鉄所としての存立もできないわけである。一方、中長期的展望に立つと、世界の鋼材需要の伸びと電気炉製鋼の伸び(図12)に対する銑鉄の供給が十分に追従できるかどうか不明である。環境負荷が高く、立地や設備投資の条件が厳しい高炉—転炉法の生産量には大きな変化が見込めない。国内鉄鋼製品の需要(内需)は飽和しているものの、世界最大の市場かつ生産拠点である中国に隣接し、設備投資額の大きい高炉を既存設備として多く保有している我が国では、銑鉄やスラブを国際市場に半製品として供給することを含めたプロセスの多様性を確保することが重要と考える。

今まで、国内の鉄スクラップ発生量、電気炉製鋼による生産量、内需は比較的うまくバランスしてきた。電気炉製鋼の今後⁵⁷⁻⁶²⁾や、鉄源の展望⁶³⁻⁶⁶⁾については参考文献に詳しく記述されている。しかし、その後の薄スラブ連続機プラントの急激な拡張は、世界的な粗鋼生産と鉄スクラップの balan

スを突き崩しかねない。電気炉製鋼のサバイバル条件の一つは、自前の代替鉄源プラントを有することになる。良質スクラップの供給量に恵まれた米国のミニミルですら対応を進めており、東アジア地域では必須条件になると思われる。鉄スクラップは地域性や変動性をもって発生する。国内でも鉄スクラップの東日本から西日本への輸送が生じている。このような物流コストの問題を解消するには、スクラップの巨大発生市場（東京）からの輸送が容易な地域、できれば一貫製鉄所の一角に立地するミニミルプラントが合理的でないだろうか。我が国における自動車スクラップや廃電化機器の処理技術は世界最先端にある⁴⁾。廃車処理に代表されるような分解分別型技術の開発、例えば、微破碎・選別（豊田メタル（株））やシュレッターレス（西日本オートリサイクル（株））技術の進歩は、用途別のスクラップ供給に道を開くと期待している。

世界では、図3に示すようなIntegrated、BF-BOF-TSC/Mini-mill、EAF-TSC/Mini-mill、EAF-CC/Hot-stripと、ストリップ連続鑄造の計5種類の製鉄プロセスが稼働している。我が国は、技術開発力と設備や鉄源環境の両面から見て、それらすべてを統合化した製鉄システムを構築できる条件を満たす数少ない国の一つではないだろうか。プラスチックの高炉燃料への利用、ダストやスラッジからのZn分離などの環境技術開発とともに、鉄鋼生産そのものにおいても既存の一貫製鉄所を生かした新プロセスの開発やプロセスの多様性を高める技術開発を産学官においてより推進すべきである⁴⁾。

5 おわりに

国際的には、鉄の製造プロセスはすでに多様化した状態にある。我が国においても薄鋼板の製造プロセス開発に国際的な共同と競争の原理が持ち込まれるのは自明である。そこでは、低コスト、低環境負荷、プロセスの柔軟性、高付加価値化などがキーワードであろう。国内鉄鋼各社は、欧米に先んじて新プロセス研究や直送圧延をはじめとした材質制御研究を行ってきており、それらのポテンシャルは世界に冠たるものに違いない。種々の鉄源と種々のプロセスを任意に組み合わせ、要求性能に合わせた最適な組織制御を選択できる夢のような複合化製鉄システムを構築できないものだろうか。

本稿は、「資源循環型社会における物質・材料技術に関する調査委員会」の活動を基に取りまとめた。最後に、調査にご協力いただいた関係各位および各社に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 日本の将来推計人口, 国立社会保障・人口問題研究所 (<http://www.ipss.go.jp/>)
- 2) <http://www.kantei.go.jp/jp/mille/index.html>
- 3) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/wanokuni/index.html>
- 4) 資源循環型社会における物質・材料技術に関する調査報告書, 未踏科学技術協会 (<http://www.sntt.or.jp/jyunkan/>), (2002)
- 5) 例えば, <http://www.jisf.or.jp/index.html>
- 6) 渡部忠男: 鉄と鋼, 88 (2002), 107.
- 7) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1994) 9, 22.
- 8) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1994) 10, 33.
- 9) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1994) 11, 38.
- 10) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1994) 12, 33.
- 11) <http://www.nucor.com>
- 12) <http://www.sms-ag.de/english/index.htm>
- 13) 戸崎泰之: 鉄鋼界, (1997) 4, 18.
- 14) A. Chatterjee and S. Changra: Steel World, 3 (1998), 45.
- 15) D. Ameling: stahl und eisen, 120 (2000) 9, 27.
- 16) G. Brascugli: stahl und eisen, 120 (2000) 11, 47.
- 17) (株) 日鉄技術情報センター: 鉄鋼界, (1994) 9, 33.
- 18) 荻林成彰: 金属, 71 (2001), 7.
- 19) 下村泰人: Tekkohkai, (1999) 11, 19.
- 20) 上田裕二郎: 鉄鋼界, (1997) 4, 2.
- 21) 上田裕二郎: 鉄鋼界, (1997) 4, 9.
- 22) (社) 日本鉄鋼連盟 海外調査部: 鉄鋼界, (1997) 3, 52.
- 23) <http://www.VAI.at>
- 24) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1996) 2, 36.
- 25) 三谷一雄: 鉄鋼界, (1996) 4, 33.
- 26) <http://www.steeldynamics.com>
- 27) P. Nilles: Metall. Plant and Tech. International, 3 (1994), 46.
- 28) 武智 弘, 川崎 薫, 鈴木 亨: 日本金属学会報, 29 (1990), 413.
- 29) F.P. Pleschiutschnigg, H.D. Hoppmann, I. Hagen and G. Gosio: stahl und eisen, 113 (1993) 3, 53.
- 30) L. Manini and A. Mantova: Inter. Conf. on New Developments in Metall. Process Tech., VDEh, German Iron and Steel Inst., (1999), 183.
- 31) 森本和夫: 塑性と加工, 36 (1995) 417, 1122.
- 32) G. Flemming, F. Hofmann, W. Rohde, and D. Rosenthal: stahl und eisen, 113 (1993) 2, 37.
- 33) 清水孝宣, 山崎育邦, 岩谷 浄, 武口 達, 亀谷 敦:

- 三菱重工技報, 36-6 (1999), 288.
- 34) G. Post, G. Urban, P. Meierling, T. Hoster, P. Fink and W.D. Popke : stahl und eisen, 109 (1989) 9, 477.
- 35) (株) 日鉄技術情報センター : 鉄鋼界, (1994) 10, 55.
- 36) C. Hendricks, W. Rasim, H. Janssen, H. Schnitzer, E. Sowka and P. Tese : Inter. Conf. on New Developments in Metall. Process Tech., VDEh, German Iron and Steel Inst., (1999), 286.
- 37) <http://www.tks.thyssenkrupp.com>
- 38) <http://www.corusgroup.com>
- 39) http://www.mhi.co.jp/machine/product/steel/ste_01.htm
- 40) L. Leroy and J.C. Herman : Proc. Conf. Microalloy 95, Pittsburgh, (1995), 213.
- 41) <http://www.nakayama-steel.co.jp/>
- 42) 倉橋隆郎, 竹士伊知郎, 森本敬治, 柳本 潤 : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1157.
- 43) A. Girgensohn, A.R. Buchner and K.-H. Tacke : Ironmaking and Steelmaking, 27 (2000), 317.
- 44) M. Walter, S. Stebner, J.M. Damasse, P. Tolve and G. Hohenbichler : Proc. CCC2000, Linz, Opening Session No.4, (2000)
- 45) A. Mascanzoni J.- M. Damasse and G. Hohenbichler : Proc. CCC2000, Linz, Innovation Session No.5, (2000)
- 46) G. Hohenbichler, U. Albrecht-Fruh, J.M. Damasse and R. Capotosti : Proc. CCC2000, Linz, Innovation Session No.6, (2000)
- 47) J. Kroos, T. Evertz, M. Dubke, U. Urlaub, W. Reichelt, W. Trakowski, K.-H. Spitzer, K. Schwerdtfeger and R. Nystrom : Inter. Conf. on New Developments in Metall. Process Tech., VDEh, German Iron and Steel Inst., (1999), 156.
- 48) J.M. Damasse, D. Themines and L. Vendeville : Inter. Conf. on New Developments in Metall. Process Tech., VDEh, German Iron and Steel Inst., (1999), 164.
- 49) 柴田浩司 : 熱処理, 40 (2000) 2, 55.
- 50) L.L. Schorsh : McKinsey Quarterly, No.2, (1996), 1.
- 51) O. Umezawa, N. Yoshida, K. Hirata, T. Higuchi, N. Sakuma and K. Nagai : J. Advanced Science, 13 (2002), 175.
- 52) 中島啓之, 竹内英麿, 細田秀人, 山田 衛, 多名賀剛, 庄田俊二, 磯上勝行, 蔵谷秀也, 山本恵一, 佐々木邦政 : CAMP-ISIJ, 15 (2002) 1, 208.
- 53) K. Hirata, O. Umezawa and K. Nagai : Mater. Trans., 43 (2002), 305.
- 54) 田村今男 : 鉄と鋼, 74 (1988), 1426.
- 55) T. Hanamura, T. Yamashita, O. Umezawa, S. Torizuka and K. Nagai : J. Advanced Science, 13 (2002), 179.
- 56) T. Hanamura, T. Higuchi, T. Yamashita, O. Umezawa, T. Inoue, S. Torizuka and K. Nagai : CAMP-ISIJ, 13 (2000) 6, 1254.
- 57) 神谷春樹 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 1.
- 58) 小山政夫 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 21.
- 59) 須田興世 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 57.
- 60) 藤井資也 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 87.
- 61) 山地 巖 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 99.
- 62) 豊田 浩 : 第27・28回白石記念講座 普通鋼電気炉業のストラテジー, 日本鉄鋼協会, (1994), 131.
- 63) 稲角忠弘, 小山政夫 : 第165・166回西山記念技術講座 鉄源の多様化とその展望, 日本鉄鋼協会, (1997), 25.
- 64) 福島 勤 : 第165・166回西山記念技術講座 鉄源の多様化とその展望, 日本鉄鋼協会, (1997), 107.
- 65) 森 広司 : 第165・166回西山記念技術講座 鉄源の多様化とその展望, 日本鉄鋼協会, (1997), 117.
- 66) 武内美継 : 第165・166回西山記念技術講座 鉄源の多様化とその展望, 日本鉄鋼協会, (1997), 149.

(2002年2月21日受付)