



西ドイツにおける連鑄研究の動向

鈴木 俊 夫*

Recent Studies on Continuous Castings in West Germany

Toshio SUZUKI

1. はじめに

筆者は先般 1980 年よりの 2 年間クラウスタール工科大学の Schwerdtfeger 教授の下で研究する機会を得た。そこでの研究テーマは、連鑄鑄片の変形に関連した鋼の高温クリープの測定であつた。この間、西ドイツにおける連鑄研究やその運営の一端にふれ、改めてその興味を深くした。研究部門・操業技術部門の数多くの研究者や技術者が密接な関係を保ち研究を行つている日本に比べ、西ドイツでは、比較的少数の研究指導者がそれぞれの問題意識や方法論に従つて多くのスタッフを使い研究を行つている。このため、筆者のように連続鑄造の実際的知識に乏しい者にも特定の研究内容やその方向を理解することは容易であつた。しかし、筆者が直接知り得たものは現在行われている研究の一部であり、鉄鋼各社の技術的研究や連鑄機開発状況などはわずかに資料により推測し得たものにすぎない。従つて、以下本稿に述べる西ドイツ連鑄研究の概要も必ずしも十分な客観性を持つものでないことを御承知おき願いたい。

最近の連鑄研究の内容を述べる前に、西ドイツ鉄鋼業界の概要に簡単にふれる。西ドイツ国内には現在、Tysen AG, Krupp-Stahl AG, Mannesmann AG などの一貫製鉄所を持つ大手鉄鋼メーカーのほか、Böhler AG, Hamburger Stahlwerke GmbH などの電気炉、特殊鋼メーカー、合わせて 60 数社が存在している¹⁾。これらの大部分は、ライン川中流のルール地方とフランス国境のザール地方に集中している。西ドイツの粗鋼生産能力は約 6700 万 t であるが、1980 年の粗鋼生産は約 4400 万 t に留まつている。このうち、約 78% が転炉、15% が電気炉、残り 7% が平炉により生産されている。図 1 は、1970 年より 10 年間の粗鋼生産と連鑄比率を示す。粗鋼生産が 1974 年の約 5300 万 t をピークに、以後 4000 万 t 前後に低迷しているのに対し、連鑄比率は 1973 年の石油ショック後も着実な増加を示し、1980 年には約 46% に達している。これは、日本の約 70% に次いで高いもので、アメリカ合衆国の 20%、ソ連の 10% (1979

年) を大きく上まわつている²⁾。

1981 年 1 月現在の鉄鋼主要 4 カ国の連鑄機数 (建設中を含む) を表 1 に示す³⁾。西ドイツを日本と比較した場合、粗鋼生産量の差を考慮しても、ビレット、ブルーム連鑄機の導入の遅れが目立っている。これは、Stahl und Eisen 誌に掲載された新規設備の紹介にもみられるように^{4)~7)}、最近の連鑄化率の上昇も大手鉄鋼会社やその系列会社による大型スラブ連鑄機の導入によるものであることからもうかがわれる。このような状況を反映してか、西ドイツでは、ビレットやブルーム連鑄機を対象とした研究も盛んであり、Böhler AG⁸⁾ や Krupp Stahl AG によるビレット用水平連鑄機の開発もその一例であろう。研究の大部分がスラブ連鑄機に関するものとなつている日本に対し、このような点にも製鉄機械生産国でもある西ドイツの連鑄研究の特徴の一端が表れているといえよう。

2. 西ドイツにおける連鑄研究

ここでは西ドイツの連鑄研究の概要を述べる。まず VDEh を中心とする研究プロジェクトの組織や運営、続いて、この VDEh や BMFT の研究プロジェクトで行われている研究概要を示す。さらにその具体的例として Schwerdtfeger 教授の研究の詳細を述べてゆく。

2-1 研究プロジェクト“鋼の鑄造と凝固”

西ドイツにおける連鑄研究は、各鉄鋼会社、大学、各種研究所などで行われている。大学や研究所では受託研究や共同研究の形で企業との接触もあるが、さまざまな情報交換や問題の把握は、VDEh (ドイツ鉄鋼協会: Verein Deutscher Eisenhüttenleute) や BMFT (科学技術省: Bundesministerium für Forschung und Technologie) などの研究プロジェクトや各種委員会の場を利用して行われている。このような西ドイツ国内の研究行政機関や研究団体のほか、ドイツあるいはヨーロッパの鉄鋼研究に大きな影響を及ぼしているものに EGKS (ヨーロッパ共同体石炭鉄鋼組合: Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl) がある。これには、西ドイ

昭和 57 年 11 月 27 日受付 (Received Nov. 27, 1982) (依頼展望)

* 長岡技術科学大学 工博 (The Technological University of Nagaoka, 1603-1 Nagamine Kamitomioka-cho Nagaoka 949-54)

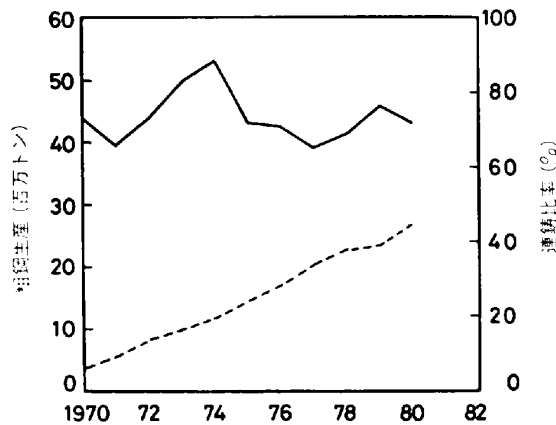


図 1 西ドイツの粗鋼生産と連鑄比率の推移

表 1 主要 4 か国の保有連鑄機数

	ビレット連鑄機 (ストランド数)	ブルーム連鑄機 (ストランド数)	スラブ連鑄機 (ストランド数)
西 ド イ ツ	12 (51)	11 (57)	22 (37)
日 本	75 (244)	46 (145)	48 (77)
アメリカ合衆国	54 (164)	24 (98)	25 (35)
ソ 連	4 (19)	6 (26)	5 (8)

ツをはじめイギリス、フランス、イタリア、などが参加しており、ヨーロッパ共同体内の下部機関としてヨーロッパ鉄鋼業界の動向にも深く関わり合っている。EGKSでは、各種政策や行政に関する検討のほか、石炭鉄鋼業に関連した研究の企画が行われている。ここでは、加盟各国の研究機関や研究団体の提案する研究プロジェクトが検討され、研究費が交付される。1982年度には、そのような 81 の研究プロジェクトに対し、約 47 億円が支出された⁹⁾。また EGKS は、研究プロジェクトを直接企画運営し、このうち連鑄研究に関連したものが、1969 年に開始され現在も継続されている研究プロジェクト“鋼の鑄造と凝固 (Gießen und Erstarren von Stahl)”である。この研究プロジェクトの研究テーマに従って各国の研究機関や研究グループが連鑄研究を行つている。西ドイツでは、VDEh がこの EGKS の研究プロジェクトを代表分担し、その下で国内各研究機関が個別的な研究を行つている。この VDEh の下で行われている研究全体にもやはり研究プロジェクト“鋼の鑄造と凝固”という名称が与えられている。

表 2 は、研究プロジェクト“鋼の鑄造と凝固”の主要項目を示したものであるが、定められた研究期間の終了後、その成果は報告書として刊行される。表中の第 1 期、第 2 期の研究項目は、すでに発行された報告書¹⁰⁾¹¹⁾をもとに EGKS の研究プロジェクトについて記した。また、第 3 期、第 4 期については、EGKS ではなく、VDEh の研究項目となつている。このため、各期の研究項目を直接対比することはできないが、インゴット鑄造から連鑄鑄造へ、また連鑄の凝固・偏析に関する問題から変形

表 2 プロジェクト研究“鋼の鑄造と凝固”の推移

主たる研究テーマ	
第 1 期* (1969—1973)	1. 脱酸 2. 凝固における熱伝導 3. 鑄塊、連鑄鑄片の凝固組織 4. 高純度インゴットの凝固 5. 凝固組織評価
第 2 期* (1974—1977)	1. 鋼中の酸素 2. 熱伝導と割れ 3. 核発生と結晶成長 4. 鑄塊の内部性状と表面品質 5. 連続鑄造
第 3 期** (1978—1981)	1. 連鑄における溶鋼、パウダー、大気の相互作用 2. 2 次冷却帯における温度分布と凝固速度 3. 凝固シェルの機械的性質 4. マクロ偏析
第 4 期** (1982—1985)	1. 溶鋼、パウダー、大気と溶鋼酸化 2. 連鑄パウダー 3. パルジング 4. 変形挙動と割れ

* EGKS における研究テーマ
** VDEh

割れの問題へと、その研究の推移がうかがわれる。

EGKS や VDEh の研究プロジェクトのほか、BMFT の下でも連鑄に関連した基礎的・実用的研究が行われているが、これについては、毎年開催される報告会などを通じてその概要を知ることができる。このような各種研究プロジェクトには、鉄鋼各社や大学などからさまざまな研究者が参加し、共通の問題の解決にあたつているといえよう。これらの研究者は、スタッフを除くとそれほど多くない。そのような連鑄研究者を表 3 に示す。ただ表中には製鋼など間接的に連鑄研究に関与している人々は除かれていることと、所属機関の規模や性格により研究範囲などに相異のあることは、御注意いただきたい。

2.2 連鑄研究の概要

この節では最近の連鑄研究の概要を前述の VDEh や BMFT の研究プロジェクトで行われている研究を中心として述べる。ただ、これらに関する正式報告書など公開資料が少なく、その具体的内容や目的の詳細は必ずしも明らかではない。以下、連鑄機の工程順に研究概要を述べてゆく。

2.2.1 取鍋・タンディシュ

取鍋・タンディシュ関係では、介在物制御や表面品質向上を目的とした溶鋼酸化やスラグのまき込みに関する研究が行われている。前者については、取鍋・タンディシュ間の溶鋼酸化とその表面品質・清浄度に対する影響が研究され、溶鋼流の被覆やタンディシュライニングの改善などが試みられている。また、ビレット連鑄で鑄込み流の被覆が行われ、清浄度に対する効果が検討された。スラグのまき込みについては、タンディシュへの鑄込み流やタンディシュ内の溶鋼流動の解析や実験が行われ、タンディシュ容量、溶鋼出口、堰などの影響が研究されている。

2.2.2 鑄型

鑄型に関連した研究では、まずビレット、ブルーム連鑄鑄片の変形・熱収縮の解析が挙げられる。これは表面

表 3 西ドイツにおける連鑄研究者

所	属	研究者名	主たる研究	
1	TH Aachen, Aachen	Prof. Dr. Ing.	E.-H. Schmidtman	変形挙動, 脆化
2	TU Berlin, Berlin	Prof. Dr. phil.	F. Oeters	凝固, 変形挙動
3	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	Prof. Dr. Ing.	R. Jescher	熱伝達
4	Betriebsforschungsinstitut der VDEh, Düsseldorf	Prof. Dr. Ing.	K. Schwerdtfeger	電磁攪拌, 凝固, バルジング, 変形挙動
5	Böhler AG, Düsseldorf	Dr. rer. nat.	R. Keck	測定法, 制御
6	ESTEL Hütten Werke Dortmund AG, Dortmund	Dr. Ing.	P. Stadler	水平連鑄
		Dr. Ing.	R. Scheel	パウダー
		Dr. Ing.	K. Rüttiger	凝固, 偏析, 割れ, 変形挙動
		Dr. rer. nat.	A. Diener	"
7	Fried. Krupp GmbH, Krupp Forschungsinstitut, Essen	Dr. Ing.	J. Pötschke	水平連鑄
8	Hamburger Stahlwerke GmbH, Hamburg	Dr. Ing.	K. Stercken	鑄型, 変形挙動
9	Krupp Stahl AG, Reinhausen	Dr. Ing.	P. Hammerschmid	凝固, 偏析, バルジング
10	Mannesmann Forschungsinstitut GmbH, Duisburg-Huckingen	Dr. Ing.	K. Wünnenberg	連鑄全般
		Dr. Ing.	H. Jacobi	"
11	Mannesmann AG, Duisburg	Dip. Ing.	H. Schrewe	"
12	Röchlingen-Burbach GmbH, Völklingen	Dip. Ing.	R. Jauch	電磁攪拌
13	Tyssen AG, Duisburg	Dr. Ing.	H. Litterscheidt	パウダー, 凝固, 熱伝達

欠陥防止や生産性の向上を目的として、実験・解析の両面からの研究が行われている。特に鑄片の変形に対する数値解析では、熱応力によるクリープ変形の解析が行われ、エアギャップの形成と鑄片-鑄型間の熱伝達の問題が検討されている。また、これらの研究を踏まえた鑄型の改良も行われ、鑄型表面品質の向上がなされた。また、鑄片凝固殻の応力測定も試みられている¹²⁾。

連鑄パウダーは、表2に見られるように第4期の研究プロジェクトの主要テーマにも取り上げられ、現在盛んに研究されている。各種パウダーの熱伝導度、粘性などの物性値の測定のほか、鑄片-鑄型間の潤滑特性やオンレーションマーク・表面割れとの関連が検討されている。操業技術に関したものは、超音波¹³⁾や赤外線を用いた湯面計測技術や、ビレット連鑄の鑄型内電磁攪拌などがあげられる。

2.2.3 2次冷却帯

2次冷却帯における鑄片の冷却は、主として連鑄スラブの変形や表面割れを防止する目的で、さまざまな方向から研究されている。スプレー冷却や噴霧冷却といった各種冷却法の熱伝達特性の測定や、スラブ鑄片表面温度、ガイドロールの温度分布の測定¹⁴⁾を通じ、鑄片冷却過程の把握が試みられ、表面割れなどとの関連が研究されている。2次冷却帯での鑄片の凝固では、理論解析が行われているほか、超音波などによる凝固殻厚の測定も試みられている。さらに、中心偏析の原因の1つであるブリッジングや、鑄片の非対称組織の形成に関する実験の報告もある¹⁵⁾¹⁶⁾。

電磁攪拌の研究は、偏析・組織制御や介在物制御を目的として、溶鋼流動解析を中心に、現在も継続して行われている。乱流モデルによる溶鋼流動の数値解析¹⁷⁾¹⁸⁾やそのマクロ偏析に対する影響¹⁹⁾が報告されている。

またこれらの解析とは別に、実機における電磁攪拌の効果がさまざまな鋼種について検討されているほか、交流電流付加も試みられている。

2.2.4 変形・割れ

連鑄鑄片の変形や割れは、単にその問題に留まらず、

マクロ偏析やポロシティなどさまざまな内部欠陥の形成に関わり、連鑄機の原理や構造に対する基本的問題であろう²⁰⁾。そのような観点からもこれらの研究は、前述VDEhの研究プロジェクトにも取り上げられ、現在盛んな研究が行われている。これまでの研究では、基礎的なものとして、鋼の高温変形挙動・脆化挙動またこれらに対する各成分の影響に関する研究がある²¹⁾²²⁾。また、鑄片の変形解析のデータを求めるために、鋼の高温クリープの測定が行われている。さらに、これらのデータを、極めて複雑な温度・応力状態にある連鑄鑄片に、どのように適用するかが検討されている。変形の予測や解析という点では、前述の鑄型内の熱変形のほか、バルジングの解析があげられる。これは、モデル連鑄機によるバルジング量の測定²³⁾やロールギャップの実態の把握²⁴⁾を通じて定量的に明らかにされたバルジングを理論的に解析したもので、中心偏析などに対するバルジングの影響が明らかにされた^{25)~27)}。これらの解析をもとに、実機におけるガイドロール調整や軽圧下²⁸⁾の影響が検討されている。実機におけるバルジング歪み、矯正歪みの評価と内部欠陥への影響、また多点矯正の効果などの問題は、鉄鋼各社で研究されているが、その詳細は不明である。

2.2.5 その他

上に述べた連鑄研究のほか、鑄型の幅変更技術²⁹⁾や、スラブあるいは複数ブルーム連鑄可能な複合鑄型³⁰⁾などの報告がある。また、連鑄機の開発研究としてはBöhler AGなどによる水平連鑄機のほか、現在Fried. Krupp GmbHにより進められている直接圧延機³¹⁾の開発があげられよう。この直接圧延機については、鑄片の熱伝導や変形などに対する基礎的研究がすでに行われており、また、1982年にはEGKSより研究費も助成され、今後の成果が期待されている。

2.3 Scgwerdtfeger 教授の研究

前節の研究概要は、各種資料を総合したもので、具体的な研究内容やその目的、方法などの詳細を十分に述べることができなかつた。そこで、Schwerdtfeger 教授の下で現在行われている研究を紹介し、その参考とする。

表 4 Schwerdtfeger 教授の研究テーマ

1	電磁攪拌による溶鋼流動の解析
2	連铸ビレットの铸型内における収縮変形
3	連铸用パウダーおよびオイルの熱伝導特性
4	オシレーションマークの形成機構
5	鋼の高温における変形
6	取鍋内ガス攪拌と溶鋼流動
7	石炭ガスの脱硫
8	鉄鉱石中のバナジウムの抽出

Schwerdtfeger 教授の現在の研究テーマを表 4 に示すが、このほか連铸に関連した研究として、バルジング解析^{25)~27)}、電磁攪拌による溶鋼流動解析^{17)~19)}、軽圧下による中心偏析の低減²⁸⁾、連铸鑄片の非対称組織やブリッジングに関する実験¹⁵⁾¹⁶⁾などがすでに報告されている。以下表 4 に従って内容を紹介する。

電磁攪拌による溶鋼流動の解析は、過去数年間にわたり継続して研究されている。現在はスラブ、ブルームを対象とした 2 次元解析が行われている。これは $K-\varepsilon$ モデルを用いた乱流計算により、3 速度成分を求めるもので、丸ビレットに対しては、すでに結果が得られている。その結果、層流計算によつて得られているものと比べ速度分布や最大速度が大きく異なることが、示されている。今後は、計算の収束性が検討され、各種鑄片や電磁攪拌様式についての解析が行われるだろう。

連铸ビレットの铸型内における収縮変形に関する研究は、鑄片-铸型間のエアギャップの形成とこれに伴う鑄形抜熱の変化を把握することが当面の問題とされている。これは、理論解析と実験の両面から研究されている。前者では、鑄片の冷却に伴い生ずる熱応力が計算され、これによる変形が解析される。変形機構として弾性変形、塑性変形、クリープ変形の場合が比較検討されている。ここで困難な点は、固液界面で応力・歪みがゼロでなければならないという物理的条件をいかに適合させるかという問題であるが、各時間さきみごとに繰り返される熱応力計算の境界条件に取り入れることで解決している。後者は、熱収縮変形の解析結果の妥当性の検討とさまざまな変形の特徴を把握する事を目的として行われている。実験は、100 kg の小型鑄塊の変形を铸型内に設置された差動トランスで測定するという方法で行われている。

連铸パウダー、オイルの熱伝導の測定は、铸型内の鑄片の凝固解析に対する基礎データを求めることが目的である。連铸パウダーの熱伝導度測定では、鉄あるいはモリブデン発熱板上で溶融させたパウダーの上に、水冷銅鑄型を置き、定常状態での平均熱伝導度を求めている。この方法では、パウダーの熱伝導度のほか、铸型-パウダー、パウダー-鑄片間の熱伝達係数も測定できる。測定された結果によれば、鑄片温度の上昇に伴いふく射伝熱の寄与が伝導の寄与を上まわり、熱伝達の様相は極めて複雑なものとなる。さらに、鑄片-铸型間の熱伝達量

は、パウダーの吸収係数や厚みにより大きく変化し、パウダー内の発熱、発光が重要となることなどが明らかにされた。連铸オイルについては、その物性や鑄型-鑄片間での沸騰状態が研究される。

オシレーションマークの形成機構に関する研究では、鑄片の初期凝固形態や凝固シェルに働くせん断力の評価を中心にモデル実験が行われている。これは、有機溶液とゴムをそれぞれパウダー、鑄片に模したシミュレーション実験であり、鑄型振動による鑄片の動きを直接観察している。さらに鑄片のうけるせん断力の解析、鑄片の変形モードと変形量の解析が行われる。

鋼の高温変形に関する研究では、鑄片の変形解析に必要とされるクリープ変形のデータが求められている。ここでは、一定応力下のクリープ変形の定式化のほか、連铸鑄片がうける複雑な応力を想定した実験も試みられている。

これらの研究は、電磁攪拌に関するものを除けば、互いに密接な関係をもっている。連铸ビレットの生産性を高め、鑄片の品質向上をはかるために、鑄型の改善を図る。このために、基本的現象の把握、基礎データの収集を行い、現象の定量的解析を行うというものであろう。このような研究の方法は、研究指導者である Schwerdtfeger 教授の個性を強く反映したものではあるが、西ドイツにおける研究の 1 つの類型でもある。

3. おわりに

以上西ドイツの連铸研究の概要を述べてきたが、ここで今後の方向に対する筆者の個人的見解を述べたい。

連铸技術の最近の進歩は著しく、さまざまな技術開発がなされてきた。また、各国の連铸比率は今後も増加し続けることが予想されている³²⁾。このような状況のもとに西ドイツでは操業、設備技術の改善や研究が今後も続けられていくだろう。しかし、一方では、商品としての連铸機や連铸操業設備の開発が重視されていくであろう。これは、過去の技術開発の経緯を別にしても、西ドイツ内の鉄鋼各社の生産規模や集約度を考えた場合、十分に可能性があると思える。このような場合には、Schwerdtfeger 教授のような研究方法が極めて有効となるだろう。

次に具体的な研究について述べる。

まず介在物制御を目的としたタンディッシュ内の溶鋼流動の解析は今後も引き続き行われるであろうが、これと共に電磁攪拌を利用した介在物制御技術が研究されるだろう。次に铸型に関連して、前述の鑄片の変形の研究はさらに進められると共に、不均一変形・非対称変形の問題が取り上げられるだろう。これにはいくつかの数学的困難が伴うが、鑄型の改善を考える場合には、最終的に重要となろう。また表面欠陥の成因に関連し、鑄型振動、パウダーなどを総合的にとらえた鑄片の初期凝固の研究

が行われるだろう。そしてここでも、従来の定常的、周期的な解析だけでなく、さまざまな擾乱に対するマクロ的定常状態の変動などが検討されるだろう。

鑄片の変形挙動については、バルジング歪みや矯正歪みの定量的把握などさらに詳細な研究が続けられる。また鋼の変形に対する凝固組織、結晶粒、偏析の影響をはじめ、温度勾配、応力変化の影響が検討されるだろう。

さらに、各種割れに対する現象の定量的研究、割れの進展に対する力学的研究などが行われるだろう。

これらの問題とは別に、現在日本に比べて遅れている工程の自動化に対する研究は、現場を中心に今後大に行われるであろう。

おわりにあたり、VDEhの研究プロジェクトの運営・研究などさまざまな御教示をいただいたクラウスター工科大学のK. Schwerdtfeger教授ならびにK-H. Tacke博士(現Concast AG)に心から感謝の意を表す。また、本稿の構成などさまざまな御助言をいただいた新日鉄(株)八幡製鉄所の南憲次氏に感謝の意を表す。

文 献

- 1) Handbuch der Europäischen Eisen und Stahlwerke, 7 Auflage (1981), p. 80 [Montan und Wirtschaftsverlag]
- 2) Taschenbuch für Stahlindustrie (VDEh 編) (1982), p. 91 [Verlag Stahleisen]
- 3) 同上 p. 134 (Concast Stahlstranggießanlagen in der Welt, 7 Ausgabe よりの転載)
- 4) E. HÖFFKEN and K-H. ABELE: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 11
- 5) E-T. SACK, R. HOFFMANN, and G. DIENER: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 17
- 6) K-A. ZIMMERMANN, F. WERNER, W. KLEINE-KLEFFMANN, and R. BERTRAM: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 3
- 7) K-A. ZIMMERMANN, R. BRUDER, W. KLEINE-KLEFFMANN, and E. SCHULZ: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 671
- 8) H. G. ROSENSTOCK, F. REGNITTER, and H. KÜPPERSBUSCH: Stahl Eisen, 102 (1982), p. 403
- 9) Stahl Eisen, 102 (1982), p. 121
- 10) Gießen and Erstarren von Stahl Teil I, Zusammenfassender Forschungsbericht (1978) [EC]
- 11) Gießen and Erstarren von Stahl Teil II, Zusammenfassender Forschungsbericht (1980) [EC]
- 12) J. FRÖBER and F. OETERS: Arch. Eisenhüttenwes., 51 (1980), p. 43
- 13) H-P. HIPPLER, F. ISSELSTEIN, and R. KECK: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 519
- 14) A. DIENER and A. DRASTIK: Arch. Eisenhüttenwes., 53 (1982), p. 13
- 15) P. STADTLER, K. HAGEN, P. HAMMERSCHMID, and K. SCHWERDTFEGER: 第4回日独セミナー(1980), p. 201
- 16) Li HUANG and K. SCHWERDTFEGER: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 153
- 17) K-H. TACKE and K. SCHWERDTFEGER: Stahl Eisen, 99 (1979), p. 7
- 18) K-H. TACKE, M. DUBKE, and K. SCHWERDTFEGER: 第4回日独セミナー (1980), p. 131
- 19) K-H. TACKE, A. GRILL, K. MIYAZAWA, and K. SCHWERDTFEGER: Arch. Eisenhüttenwes., 52 (1981), p. 15
- 20) K. WÜNNENBERG and H. JACOBI: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 874
- 21) E. SCHMIDTMANN and L. PLEUGEL: Arch. Eisenhüttenwes., 51 (1980), p. 49
- 22) E. SCHMIDTMANN and L. PLEUGEL: Arch. Eisenhüttenwes., 51 (1980), p. 55
- 23) K. WÜNNENBERG: Stahl Eisen, 98 (1978), p. 254
- 24) H. SCHREWE and K. WÜNNENBERG: Trans. Metall. Soc. AIME, 61 (1978), p. 248
- 25) K. MIYAZAWA and K. SCHWERDTFEGER: Ironmaking Steelmaking, 6 (1979), p. 67
- 26) A. GRILL and K. SCHWERDTFEGER: Ironmaking Steelmaking, 6 (1979), p. 131
- 27) K. MIYAZAWA and K. SCHWERDTFEGER: Arch. Eisenhüttenwes., 52 (1982), p. 415
- 28) K. SCHWERDTFEGER, G. RUDOLPH, O. EHRICH, and K-H. TACKE: Shlußbericht zum BMFT Forschungsvorhaben Nr. S020 (1979)
- 29) K. WÜNNENBERG: Stahl Eisen, 102 (1982), p. 657
- 30) Stahl Eisen, 101 (1981), p. 390
- 31) J. PÖTSCHKE and D. NEUSCHÜTZ: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 1367
- 32) H. SCHREWE: Ironmaking Steelmaking, 8 (1981), p. 85