

溶融還元の技術開発の現状

Present Status of the Smelting Reduction Processes

鶴 岡 一 夫*

Kazuo Tsuruoka

1. はじめに

鉄鋼業は、エネルギー多消費産業であり、1980年におけるわが国のエネルギー最終需要に占める鉄鋼業のウェイトは15.1%である。このようなエネルギー多消費産業である鉄鋼業の繁栄には、鉄源の確保は勿論のこと、安価なエネルギー源を大量に安定確保することが不可欠の要件になっている。

過去の鉄鋼生産プロセスの変遷を振り返ってみると、鉄源ならびにエネルギー源の制約のもとで、最適化を図る努力が重ねられて来ていることが明らかである。

すなわち、15世紀以降発展をとげた木炭高炉についてみても、その生産の増大とともに、森林資源の荒廃を招き、それが18世紀以降の石炭による高炉製鉄法の出現の原動力となったことは歴史的事実として記録に止められている。また、最近の例をとってみても、わが国において、1960年代の初めから行われた高炉におけるオイルの吹込みも、第2次石油危機以降、オイルの価格の高騰により、経済的最適解を求めるため往時の石炭系エネルギーのみによる高炉操業へと移行し、国際的な価格競争力の維持に努めて来ている。さらに、確立された製鉄体系と見做される高炉法に対する代替プロセスとして、高炉によらない製鉄法、すなわち、直接製鉄法も種々検討されて来ている。このうち、直接還元法による製鉄は、現在、安価な炭化水素を大量に供給出来る産油国において多数の商用プラントが建設されており、高炉代替プロセスとしてその地歩を固めつつある。

溶融還元法も、高炉によらない製鉄法の一つとして位置付けられるものであり、高炉の生産の弾力性の欠如を補完する手段として、過去半世紀にわたって開発

が進められ、近時においてスウェーデンにおける開発は注目に値するものがある。

一方、わが国においても、鉄鋼生産に不可欠な副原料であるフェロクロムの製造へ、溶融還元法を適用するための開発が進められており、脱電力による安価なフェロクロムの製造プロセスの早期確立が期待されている現状である。

2. 溶融還元法の開発の経緯と現状

鉄鉱石を、溶融状態で還元する方法を、溶融還元製錬法または溶融還元法と呼び、広義には高炉法もこの中に含むが、一般には、高炉によらない製鉄法として、古くから開発が試みられてきている。^{1) 2)}

すなわち、1930年代に低速回転炉による溶融還元法の企業化の試みがなされている。これは、Basset法³⁾ならびにStürzelberg法⁴⁾と呼ばれるもので、硫酸率ないしは低品位微粉鉱石を原料とし、石炭ないしはコークスの炭材と石灰石とともに、ロータリーキルン方式の回転炉に装入し、溶融還元を行うプロセスである。能力としては、数万t/年の小規模のものであるが、前者は戦前、フランス、スペイン、ポルトガル、日本で実用化されており、後者についても、1961年まで、西独において、プラントの稼動を継続したという実績を残している。第2次世界大戦中は、新しいプロセス開発は、一時中断状態にあったが、1950年代中頃より、新プロセスの開発が再開された。当初は、前2者と同様低速回転炉形式をとるDored法⁵⁾がある(図-1)。この低速回転炉を用いるプロセスでは、炉内上部燃焼帯温度が、1,800℃に達するが、下部の耐火物と溶鉄の接触部では、1,400℃の温度であり、回転により耐火物が急激な熱サイクルを受けることならびに絶えず耐火物が、FeO含有量の高いスラグと接触し、その損傷が大きいことなどの難点がある。また、生産性も低くかつ燃料原単位も高いという欠点もあり、その

* 川崎製鉄技術本部エネルギー技術部 部長

〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3

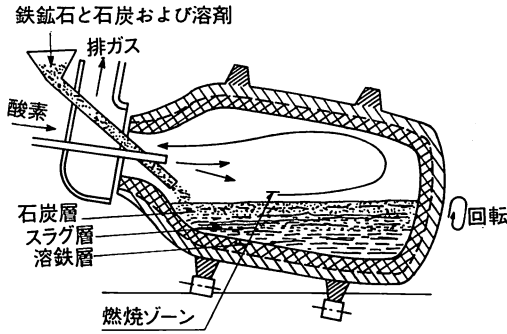


図-1 Dored法

開発は中止されている。

低速回転炉のもつ欠点を補うため、回転速度100rpm以上の高速回転炉によるプロセス開発が進められた。その狙いとするところは、高速回転による遠心力により炉壁耐火物表面を溶鉄層で覆い、FeOに富んだスラグと耐火物とを絶縁することにある。BISRAのCIP法⁶⁾、イタリアのRotored⁷⁾がこの方法に属する。このうち、前者は、炉体を水平に近い軸の回りの回転、後者は、炉を鉛直軸の回りに回転させる形式をとっている。しかしながら、高速回転炉法は、高速回転に伴う振動の問題などの難点があり、その開発は、パイロットプラントの域を出なかった。

回転炉形式のプロセスでは、原料は、塊鉱ないしは予め塊成化したものを使用するが、還元速度を高め、装置の生産性を向上させるため、粉鉱の使用を指向したプロセスの開発に重点が置かれるようになった。

フレーム溶解法は、化石燃料の燃焼フレーム中で、粉鉱を、溶解、還元させるもので、古くは、カナダのJet Smelting法⁸⁾、BISRAのCyclo Steel法⁹⁾などがあるが、エネルギー原単位が高く、発生ガスの処理に問題があった。図-2に示すInred法¹⁰⁾は、この流れを汲むプロセスであり、フレーム中での溶解、予備還元、誘導炉（最近アーク炉に変更）における最終還元の2段階よりなり、現在も、開発が継続されている。

以上の方法は、プロセスに必要な熱を、化石燃料の燃焼によって供給しているが、熱供給を電力に依存しようとするプロセスの開発も行われている。この方法は、ガスの還元ポテンシャルと入熱を独立に制御し得るという利点があり、電力の入力の方法によって種々の形式に分れる。

Elred法¹¹⁾は、予備還元、溶融還元の2段階よりなるプロセスで、溶融還元はアーク炉で行い、予備還元

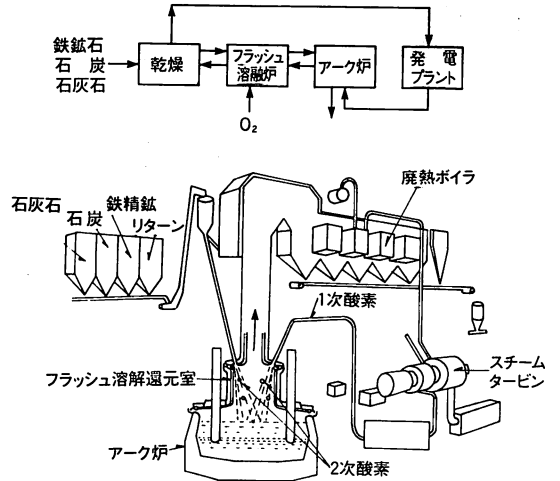


図-2 Inred法

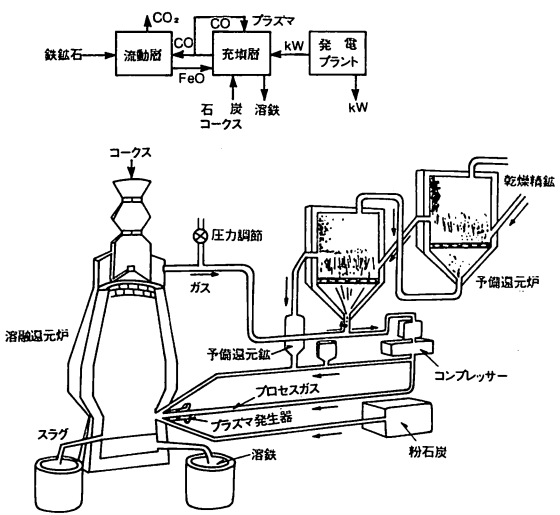


図-3 Plasmamelt法

された粉鉱は、中空の黒鉛電極により安定化したアーク中に吹込む方式をとっており、30万t/年規模のプラントの設置が計画されている。

また、大容量のプラズマ発生技術の進歩を反映して溶融還元反応の促進のため、この技術の活用を意図した開発が、欧米において進められている。このうち、Tetronics-EPP法¹²⁾は、自由に回転出来るプラズマトーチとリング状の対向電極の組合せで、プラズマ膜を形成させ、これに粉鉱と炭材を吹付ける形式をとっている。その他、プラズマフレームを鉄浴に吹付けるBethlehem Steel法などもあるが、まだ、試験操業の域を出ていない。

予備還元された粉鉱と炭材を、プラズマ化された還

表1 溶融還元プロセスの分類

溶融還元炉の熱源	溶融還元形式	1段階還元	2段階還元
電力	アーク炉 (電気製鉄法を含む)	N.R.I.M	Elkem Strategic-Udy Elred Inred
	プラズマ 利用	Tetronics- EPP	Plasmasmelt
化石燃料 の燃焼熱	回転炉 低速	Basset Stürzelberg Dored	
	回転炉 高速	CIP Rotored	
	フレイム 溶解	Jet Smelting	Cyclo-Steel (Flame Smelting)
	鉄浴中への 粉体吹込み	Eketorp-Vallak RIT-Injection KS	U.S. Steel Krupp

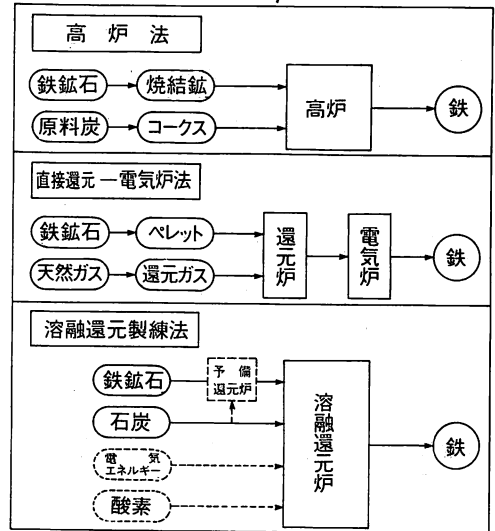


図-4 製鉄法の比較

元ガスとともに、シャフト炉に吹込む Plasmasmelt 法¹³⁾(図-3)の開発もスウェーデンで進められている。この方法におけるシャフト炉は、溶融還元炉と還元ガス発生炉の2つの機能を有しており、溶鉄1当りの原単位は、石炭200kg, コークス50kg, 電力1,120kWHといわれている。

化石燃料の燃焼熱を利用する方法のうち、鉄浴中に粉鉄、石炭、酸素を吹込んで溶鉄を得る方法がある。初期には、Eketorp-Vollak法、U.S. Steel法などのように、粉鉄などの吹付けを鉄浴の上より行う方法がとられていたが、最近では、底吹転炉技術の発展を背景として、鉄浴下部に、粉鉄、石炭、酸素を吹込む RIT Injection法なども開発されている。

この他、Elkem法、Strategic-Udy法などの電気製鉄法も、過去に開発され、企業化されたが、現在は、新規性のある技術開発は余り行われていない。

以上、溶融還元の開発の経緯と現状を概観したが、その代表的なプロセスを分類すると、表-1のようになる。このうち、Inred法、Elred法、Plasmasmelt法ならびにRIT Injection法の4つのプロセスの開発を鋭意進めているスウェーデンの努力は注目に値するものであり、溶融還元法が、高炉法を補完する技術として発展することが期待される。

また、後述するように、わが国においても、フェロアロイの製錬に、溶融還元法を適用すべく共同研究も開始されており、今後の展開がまたれるところである。

3. 他の製鉄法との比較

高炉によらない製鉄法は、直接製鉄法と呼ばれ、直接還元-電気炉法と溶融還元法の2つ製鉄法がある(図-4)。直接還元-電気炉法は、鉄鉱石を固体状態で還元して還元鉄を製造し、その還元鉄を電気炉で溶解するプロセスより成るものである。この方法は、還元ガス製造技術の進歩を背景として、1970年代の後半に急速に実用化が進み、天然ガスの産出国を中心として多数のプラントが建設された。還元炉の多くは、シャフト炉であり、原料として、粉鉄を塊成化したペレットが使用されている。粉鉄を塊成化する点においては、高炉法における焼結鉄と同様である。また、還元剤については、主流のシャフト炉においては、還元ガス、一部に実用化されているロータリーキルンでは、石炭が使用されているが、高炉法のように高い強度のコークスを作るための原料炭は不要である。しかしながら、還元ガス製造原料である天然ガス価格の高騰により、その実用化は、天然ガス価格の安価な地域に限定されるという状態に立ち到っている。

この制約から脱却するため、シャフト炉における還元ガスを、石炭ガス化によって得るという考え方もあるが、むしろ石炭を還元剤として直接使用できる溶融還元法が注目されるようになってきている。

溶融還元法を、高炉法と比較すると

- 1) 焼結鉄やペレットなどの塊成鉄が不要であり、安価な粉鉄が使用出来る。
- 2) 石炭ないし低い強度のコークスが直接使用出来

表2 溶融還元プロセスのエネルギー消費

エネルギー消費 (購入/製品 t)	単位発熱量	Rotored	Elred	Inred	Plasmasmelt	EPP	高 炉
石 炭 Kg GJ	25,960kJ/kg	1,880 47.51	700 18.17	635 16.48	200 5.19	440 11.4	(焼結用) 2
コークス Kg GJ	29,310kJ/kg				50 1.46		460 13.5
天然ガス m ³ GJ	37,680kJ/m ³	126 4.75					
酸 素 m ³ GJ	6,562kJ/m ³	420 2.75		530 3.48			(熱風炉用) 2
電 力 kWH GJ	9,584kJ/kWH		{700kWH 所内発生}	280 2.68	1,120 10.73	2,372 22.7	
注		排ガス発生	電力発生 (300kWH/t)	排ガス発生	—	排ガス発生	高炉ガス発生 (5.5GJ)
一次エネルギー 消費G.J(Gcal)	(排ガス控除含 まず)	55.0 (13.1)	18.2 (4.3)	22.6 (5.4)	17.4 (4.1)	34.1 (8.1)	17.5 (4.2)

出典：Stahl und Eisen誌，1981年7月1日号

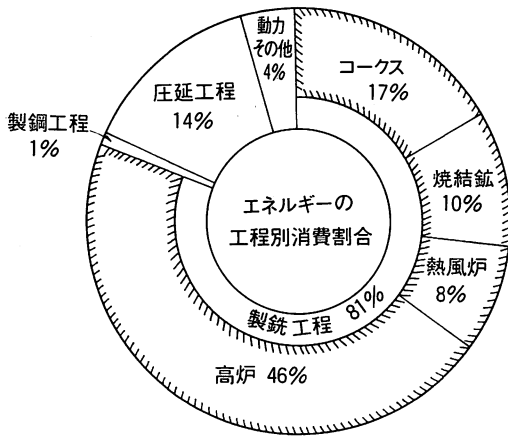


図-5 製鉄所におけるエネルギー消費の工程別割合

る。

3) エネルギー消費量が少ない。

4) 設備費が安く、小規模埋立地でも経済性があるなどの特徴があり、高炉法における原料鉱石ならびにコークスに課せられた制約から解放されたプロセスと見做すことが出来る。

次に、エネルギー消費の観点から、両者の比較を行う。図-5は、製鉄所でのエネルギー消費の割合を示すものである。製鉄所の全消費エネルギーの約80%が鉄鉱石と石炭から鉄鉄が出来るまでの製鉄工程で消費されている。このうち、高品質の石炭を用いるコークス製造工程と粉状の鉄鉱石を焼き固める焼結鉱製造工程とで、約27%のエネルギーが消費されている。したがって、賦存量の豊富な低品位の粉状の鉄鉱石を、そのまま使用出来る溶融還元法は、省エネルギーの観点からも好ましいプロセスであるといえよう。

表3 昭和55年度フェロアロイの品種別需給

(単位：1,000トン)

品 種	生産	消費	輸出	輸入
高炭素フェロマンガ	488	426	17	5
中・低炭素フェロマンガ	119	105	9	—
シリコマンガ	427	345	—	46
フェロシリコン	295	429	2	133
高炭素フェロクロム	348	499	—	252
低炭素フェロクロム	53	46	7	3
そ の 他	319	290	16	108
合 計	2,049	2,140	51	547

注：生産、消費は日本フェロアロイ協会調査。
輸出入は大蔵省通関統計。

また、表2は、溶融還元法と高炉法のエネルギー消費を比較したものである。この表では、発生ガスのエネルギー控除を行っていないので、単純な比較は困難であるが、高炉法とほぼ同等の数値を示しているプロセスもある。一般に、溶融還元法は発生ガス量も多く、還元炉の機能のほかに、ガス発生炉的な要素も強い。したがって、発生ガスの顕熱と潜熱を有効に利用する方法の確立が、今後の発展の鍵になろう。

4. フェロアロイ製造プロセスへの適用

4.1 新プロセス導入の必要性

フェロアロイは、鉄鋼生産の副原料として使用されており、その品種別需給を表3に示す。現在主要なフェロアロイは、電気炉法によって生産されており、わが国のフェロアロイ工業の電力消費量は、1976年以降80~110億kWH/年で推移しており、産業用電力消費

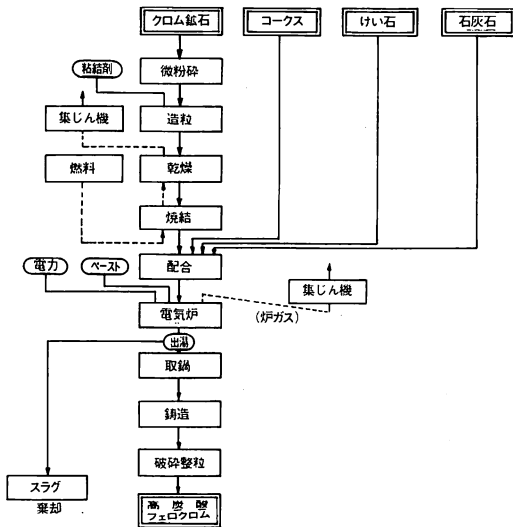


図-6 クロム鉱石事前処理による高炭素フェロクロム製造 出典：鉄鋼便覧(昭和54年10月第3版)

量の約3%に対応する。また、1980年のフェロアロイの全生産量約205万tに対して電力消費量は86億kWhであり、平均的にみてフェロアロイ生産に4,200kWh/tの電力が消費されていることになり、アルミニウムとともに典型的な電力多消費品種の一つであるといえよう。

フェロアロイの品種別に電力原単位をみると、高炭素フェロマンガンで約2,200kWh/t、Si含有量75%以上のフェロシリコンでは約9,300kWh/tである。また、高炭素フェロクロムの生産では(図-6)、鉱石を予備還元しない場合約3,800kWh/tであるが、予備還元すると、約2,300kWh/tに低下し、平均的にみると、約3,200kWh/tの電力原単位となっている。

周知のように、原油価格の高騰により、電力料金は上昇し、現在、わが国の電力料金は、他の主要フェロクロム生産国の数倍になっている。その結果、フェロアロイ生産原価に占めるエネルギー費は、フェロクロムを例にとると、電力費が約30%、炭材費約10%で、合計40%に達しており、フェロアロイ工業の国際競争力を著しく弱める原因となっている。特に、高炭素フェロクロムについては、近年輸入量が急増し、表3に示すように、1980年の輸入比率は全消費量の50%に達している。

以上のような状況からフェロアロイメーカーは、

- 1) 原料鉱石の予熱、予備還元などの導入による電力原単位の低減
- 2) 電気炉、キルン排ガスの回収と利用

3) 重油から石炭への燃料転換

4) 設備の集約化、大型化、効率化

などによる省エネルギー、合理化努力を進めているが、主要エネルギーを電力に依存するに過ぎず、その効果にも限界がある。したがって、脱電力を指向する生産プロセスへの転換が必須の技術開発課題となっている。

4.2 フェロクロムの熔融還元製錬技術の開発

電力多消費産業であるフェロアロイ業界の国際競争力の回復は、ナショナルセキュリティの観点から重要であるとの認識のもとで、1981年日本産業技術振興協会は、工業技術院の委託により、「金属の新還元プロセスに関するテクノロジー・アセスメント」²⁾を実施した。このテクノロジー・アセスメントにおいては、フェロアロイの中でも、消費量が比較的多く、かつ輸入比率の高いフェロクロムに重点が置かれており、フェロクロムの生産プロセスへ熔融還元法の適用について提言がまとめられた。

すなわち、フェロクロムの生産への熔融還元法の適用は、十分技術的可能性があり、当面開発の主流と考えられるプロセスは、ロータリーキルンによる予備還元と、電気炉に代る熔融還元炉を組み合わせた2段階プロセスであるが、流動層予備還元とコークス充填層による熔融還元とを組合せたプロセスについても、粉鉱がそのまま利用出来るなどの特徴により、開発が進展することを期待すると指摘している。また、熔融還元法の導入により、フェロクロム生産のための1次エネルギーは、電気炉法の10~13Gcal/tより、6~7Gcal/tと大巾に低減するものと予測している。

このテクノロジー・アセスメントの結論を1つの背景として、1982年よりフェロクロムの熔融還元製錬技術の開発が、「共通基盤型石油代替エネルギー技術開発費補助金制度」による補助事業として取り上げられ、6ヶ年の開発が、製錬新基盤技術研究組合によって推進されている。

組合における開発は、高炉6社(新日鉄、日本鋼管、川鉄、住金、神鋼、日新製鋼)、特殊鋼2社(大同特殊鋼、日立金属)、フェロアロイ3社(日本重化、日本電工、栗村金属)による共同研究の形式をとっている。当面、マイクロリアクターレベルの試験を行うことを目標とし、熔融還元炉の形式として、横型回転炉、上・底吹転炉の2つが対象となっており、1回の溶解量が、50~200kgのマイクロリアクターの建設が完了、試験操業が行われている。これらのマイクロリアクターへの装入鉱石は、塊成化されたペレットであり、予

備還元の影響を把握するため、還元率約80%のペレットを生産するキルン方式の試験装置も併行的に建設されている。

また、粉鉱の予備還元を行うため、流動層予備還元炉マイクロリアクター（処理能力、2～3t/day）の建設も進められており、本年末には建設を完了し、試験操業を行うことが予定されている。

マイクロリアクター規模の試験に引続いて、1回の処理量数トンのパイロットプラント規模の試験へと移行することが計画されているが、パイロットプラントは1形式とし、その形式選定は、マイクロリアクターによる試験の結果を評価して行うことになっている。

6年間の開発により、フェロクロムの溶融還元による製錬技術が実証されれば、電力依存の現行の生産プロセスより、石炭系エネルギーによる新製錬法への移行が可能となり、その結果として年間60万klの石油の消費低減につながるものと試算されている。

このような大きな期待のもとに、共同研究は進められているが、フェロクロムの溶融還元プロセスを実用化するための技術開発課題として

- 1) 操業技術の開発
 - a) 鉱石、炭材、酸素などの供給、吹込み技術
 - b) 溶融金属とスラグの分離、排出技術
 - c) 収率および製品品質保証技術
- 2) 予備還元技術
- 3) 耐火物の開発
- 4) トータルシステム技術
 - a) システムの最適化
 - a) 排ガスの顕熱、潜熱の有効利用

などがあり、これらの課題を解決し、早期に実用化の

途を開くことが期待されている。

5. おわりに

溶融還元の特徴、開発の現況について述べた。鉄鉱石の溶融還元は、高炉の生産の弾力性の欠如を補完するという位置付けを与えることが出来るが、スエーデンなどで進められている開発の今後の展開が期待される。

また、フェロアロイ生産の脱電力を指向した、わが国のフェロクロムの溶融還元に関する共同研究も、その開発が、まだ、緒についたばかりであるが、今後の開発努力により、早期に実用化の途が開かれることが望まれている。

文 献

- 1) 日本鉄鋼協会原子力部会「溶融還元調査報告書」(1978)
- 2) 日本産業技術振興協会「金属の新還元プロセスに関するテクノロジー・アセスメント」(1982)
- 3) R. Durrer: Stahl u. Eisen, 56, 268 (1936)
- 4) F. Eulenstein: Stahl u. Eisen, 57, 6 (1937)
- 5) Annon: Metal Bulletin, 31, 12, 17 (1965)
- 6) M. Finston: 鉄と鋼, 62, 424 (1976)
- 7) A. Ramamaciotti: Stahl u. Eisen, 98, 329 (1978)
- 8) The Metal Society: 「Direct reduction of iron ore」 351 (1978)
- 9) T. W. Johnson et. al: JISI, 5, 406 (1964)
- 10) C. A. Pickles et. al: ISIJ, 18, 369 (1978)
- 11) P. H. Collin: Iron and Steel Engineer, 3, 43 (1980)
- 12) Chemical Engineering, 75, (1979)
- 13) O. Wijk, et. al: Int. Conf. on Injection Metallurgy (1977)

