



UDC 669.181.054

## 溶融還元に関する技術開発の現状

中 村 正 和\*・徳 光 直 樹\*<sup>2</sup>

### Present State of the Smelting Reduction Processes

Masakazu NAKAMURA and Naoki TOKUMITSU

#### 1. 緒 言

18世紀以降、製鉄法の主流を歩み続け、さらにプロセスとしての完成度を高めつつある高炉製鉄法であるが、第2次大戦後エネルギー資源が石炭から石油へ大きく転換するのにともない。これに付随して開発された技術の移入などもあつていわゆる“高炉によらざる製鉄法”—直接製鉄法—が多数検討された<sup>1)~3)</sup>。

特に近年発展途上国が基盤産業としての製鉄所保有を指向するに及んで、直接製鉄法による商用プラントがかなりの数建設され稼働している<sup>4)</sup>。

従来、直接製鉄法は産油国のようにエネルギー資源的な有利さがなければ成立し難く、わが国のように原燃料のほとんどを輸入に頼る場合には反応器として優れた性能を有し、量産メリットの出やすい高炉法が有利とされてきた。

しかし高炉の生産弾力性が討議され、製鉄プロセスがエネルギーの発生装置として評価される現在、鉄製造機能追求の窮極の形としてその優位性を誇つた高炉法とは別の視点から製鉄技術を検討する必要があるのではなからうか。

高炉によらざる製鉄法の一つとして最近注目を集めている溶融還元法は、反応器単体としての性能において高炉に及ばないまでも、以下に述べるような利点によりシステムとして考えた場合には優位性が現れる可能性がある。

すなわち、溶融還元法では、石炭や鉄鉱石を原則として粉体のまま使用し焼結鉱、ペレット、コークスなどいわゆる塊成化の工程が省略され、したがって鉄鉱石や石炭についての品質上の制約から解放されると共に、設備費や運転費、エネルギー原単位などの面でも大幅な節減の可能性が生ずるからである。

溶融還元プロセスの狙いは、高炉法における通気性の

束縛からの解放、および直接還元法における脈石分離の問題を解決しながらさらに工程省略を目指すところにあると言えよう。

#### 2. 溶融還元法の開発過程

溶融還元法の開発過程を歴史的に見れば、まず低速回転炉がロータリーキルン類似の技術として1930年から1960年代に登場した。次いで固定炉式、フレーム中溶解還元炉が1950年代から1960年代にかけて研究され、特にU.S. Steel社の方法<sup>5)</sup>は高炉に代わる大量生産プロセスを目標にパイロットプラント実験を行い注目されたが、その後研究成果の報告が中断している。いずれも高いFeO含有スラグによる炉体侵食、またはこれを回避するための冷却によるエネルギー原単位の上昇が原因とされている。

1960年代末から1975年頃にかけて炉体保護を目的とした高速回転炉がイタリア、英国で研究された。しかし、同法も高速回転にともなう振動などの問題が新たに発生し根本的な解決には至らなかつた。近年、製鋼技術の分野において底吹転炉の復活や取鍋精錬技術の進展など、技術の流れに一つの節目が生ずる気配がある。これらは溶鋼中に精錬ガスや固体粉末を吹き込んで高速反応を起こさせようとするものであるが、この技術を溶融還元に適用しようとする試みがスウェーデンの王立技術院(Royal Institute of Technology)で開発が進められているRIT法である。この方法は化石燃料を直接熱源とするプロセスでは現在開発が継続中の唯一の技術である。

一方、鉄鉱石の還元で電力を利用することは電気高炉として1900年代初頭から開発が始められた。そして1920年代には低シャフト炉として現在の電気製鉄炉に近いものが登場している。その後、さらに低シャフト化、自焼成電極の採用、炉の密閉化によるCOガスの回収とその鉱石予備還元への利用などさまざまな改善が

昭和55年9月9日受付 (Received Sept. 9, 1980) (依頼解説)

\* 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

はかられてきた。黒鉛電極を用いる電気製鉄炉は技術的にはほぼ完成したとみられ、ユーゴスラビア、南アフリカなどで実用炉が稼動している。

近年、伝熱効率の向上、システムとしての省エネルギーを狙って Elred 法、Inred 法など種々の形式の電気加熱型溶融還元炉が開発されつつある。また、核エネルギー研究、宇宙工学研究と共に発達したプラズマ技術の導入もはかられており、これには高炉との接点に位置付けられるベルギー CRM のプラズマ高炉、スウェーデン SKF 社における Plasmasmelt 法などがある。特に米国 Bethlehem 社では H<sub>2</sub> プラズマによる溶融還元の開発を継続中で、化石燃料に依存しない未来の製鉄技術として見守る必要がある。

溶融還元法に関連して昨今注目すべきは、世界的な石炭ガス化技術開発の波に触発され、このプロセスを製鉄のためのみではなく、化石燃料のガス化目的に適用しようとする動きがあることである。この場合、鉄浴は熱媒体あるいは触媒として機能する訳であるが、製鉄とエネルギー製造をそれぞれ独立して制御することが可能であれば、高炉法に較べてより“柔軟”なエネルギー製造システムとなるであろう。

なお、研究開発が最も活発に行われているのはスウェーデンである。スウェーデン技術開発国家評議会(STU, National Swedish Board for Technical Development)の支援で Future Steelworks というプロジェクト(リーダー S. EKETORP 教授)が1976年頃から活動している。

このプロジェクトは将来あるべき鉄鋼業の姿を総合的に一技術、経済、人間、社会的観点から一検討、抽出することを目的としている。全部で20のサブプロジェクトを設けており、そのうちのひとつプロセス冶金のグループでは鉄鉱石の還元に関し① Elred 法 ② Inred 法 ③ RIT-Injection 法 ④ Plasmasmelt 法の4つの溶融還元法を支持している。いずれも石油、強粘結炭など希少なエネルギー源からの脱却と現行法に比較しての省エネルギーを目標としている。

### 3. 溶融還元プロセスの構成と特徴

鉄鉱石の還元反応は大きな吸熱反応であるから反応器に大量のエネルギーを供給しなければならない。またFeOを含むスラグは炉体耐火材料を激しく侵食するので炉壁の保護方法をくふうする必要がある。さらに、通気性の束縛からの脱却は反応効率、熱交換効率の犠牲の上に立脚しておりプロセスからの排出ガスの顕・潜熱の有効利用が必須であることは論を待たない。

これらの要件をみたとすべく、種々の形式の還元炉およびシステムが提案されている。まず、プロセスを特徴づける要因として溶融炉の炉形式があり、これには低速回転炉、高速回転炉および固定炉がある。また、還元を2

段階に分割し、予備還元炉を持ち排出ガスの利用を図っているものもある。また、他の分類としてはエネルギー入力方式にもとづき、化石燃料の燃焼熱を利用するもの、電力を用いるものがあり、上記炉形式による分類との組合せによつて多くのプロセスが存在することになる。

以上の点を考慮し、過去および現在において提案されたプロセスを分類し代表的なものを紹介する。

なお各プロセスについては日本鉄鋼協会共同研究会・原子力部会第2小委員会溶融還元 W.G. 報告書に詳細な報告があるので、本稿では個々のプロセスに立ち入るのを避け、代表的なプロセスの特徴を比較することによつて技術開発の問題点をあきらかとする立場をとりたい。

#### 3.1 低速回転炉法

この方法は、炉内で発生したCOガスの燃焼熱を浴に効率よく伝えることを意図した、いわゆるロータリーキルン方式で比較的初期のプロセスで試みられた。この方式には Basset 法<sup>9)9)</sup>、Stürzelberg 法<sup>10)</sup>、Consett Iron Co 法<sup>11)</sup>、Bouchet 法<sup>12)</sup>、Dored<sup>13)~15)</sup>などであり、Fig. 1は1965年から1971年にかけて研究されたDored法の概念図である。これと似たBasset法は戦前、フランス、スペイン、ポルトガル、日本で行われ、1939年にはデンマークで35000t/yの設備が建設された。しかし、これらの方法はいずれも回転にともなつて炉壁が急激な熱サイクルを受けること、FeOが炉壁面に付着したまま高温にさらされることのために耐火物原単位が非常に大きくなる。また、反応が鉄浴とスラグの界面で起こり炉容拡大の割には反応面積が増加せず、生産性が低いとともに燃料コストが高く現在では開発が中止されている。

#### 3.2 高速回転炉法

低速回転炉における炉体損傷を回避することを意図したプロセスで、炉体を水平に近い軸の回りに(BISRAにおけるCIP法<sup>16)17)</sup>、Republic Steel社におけるRotary Reactor System<sup>18)</sup>、または鉛直軸の回りに(イタリア-Rotored法<sup>19)</sup>)高速回転させ、遠心力により重い溶鉄層で耐火物表面を覆つてFeOに富んだスラグと耐火材料の絶縁を狙つたものである。

Fig. 2は1971年から1973年にかけてヨーロッパ

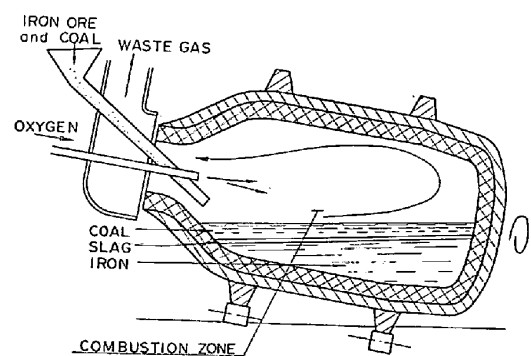


Fig. 1. Dored process.

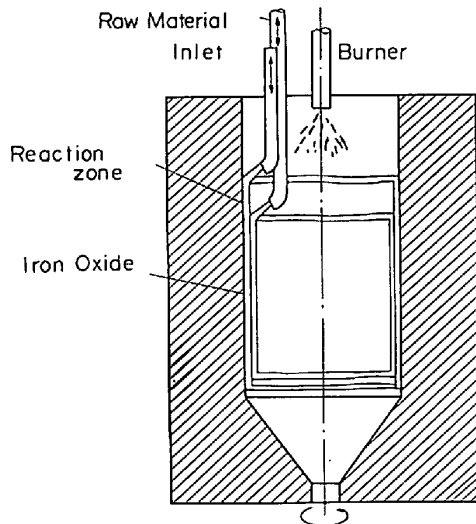


Fig. 2. Rotored process.

石炭鉄鋼共同体の援助を受けてイタリアで開発された Rotored 反応炉の概念図である。操業条件により  $C=0.02\%$ ,  $S<0.05\%$  の溶鉄が得られ脱炭工程の省略が可能としているが、エネルギー原単位が推定で  $5 \text{ Gcal/t-metal}$  と高く、生産性もパーナからの熱伝達律速により低く、あまり将来性があるとは思えない。

### 3.3 粉末吹き込み法

化石燃料の燃焼熱を利用する方法のうち、鉄浴中に酸化鉄、石炭などの補助燃料、酸素を吹き込んで溶鉄を得る方法であり、粉末のもつ大きな比表面積、鉄浴がもつ大熱容量、吹き込みによる攪拌効果などによつて高い生産性を目指している。

あらかじめ溶融した酸化鉄浴に還元剤を吹き込む方法 (U.S.Steel 法<sup>20)</sup>, 馬野プロセス<sup>21)</sup>) と、鉄浴中に鉱石及び還元剤を吹き込み溶鉄中  $C$  により還元を行う方法 (RIT 法<sup>22)23)</sup>, Eketorp-Vallak 法<sup>24)</sup>) がある。前者は、エネルギー効率は高いが耐火物の保護に困難がある。これを解決する方策としての冷却強化は熱損失の増大につながり現実的ではない。馬野プロセスにおいて提案されているような過剰  $\text{CaO}$  添加のような化学的配慮による炉体保護も一つの考え方であろう。後者の 1 例としてスウェーデンにおける RIT-Injection 法がある<sup>25)</sup>。Fig. 3 に示すように、鉄鉱石および石炭が酸素と共に鉄浴に吹き込まれ、石炭の一部は燃焼して鉄浴に熱を与えるが、残りは浴に溶け込み浴の  $C$  濃度を約  $2\%$  に保つ。この方法では浴の大部分が金属鉄であり耐火物の問題は比較的少ない。しかし、上記反応により発生した  $\text{CO}$  ガスはほとんどそのまま系外へ逃げることになるため、その顕熱をいかにプロセス内へ還流させるかが問題となる。

昨今、溶融塩または鉄浴による石炭ガス化が検討されているが、製鉄プロセスとしての上述の欠点を逆用しようとするものと言えよう。RIT 法においても、石炭中の  $S$  は鉄浴へ移行するとされており、これもむしろクリー

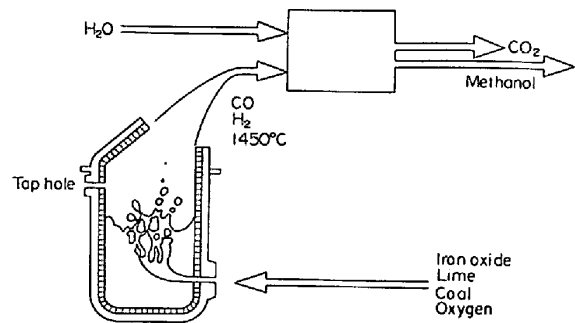


Fig. 3. R.I.T. Injection process.

ンガス製造のために有利である。

従来、この方法は粉末などの吹き込み方法、吹き込みノズルの保全対策に問題があるとされたが、底吹転炉の復活に見られるように、いわゆる Injection metallurgy の進歩により反応機構解明による Break through および装置開発とともに将来期待される方式と思われる。

### 3.4 フレーム溶解還元法 (化石燃料)

化石燃料の燃焼フレーム中で粉状鉄鉱石を瞬時に加熱溶解 (還元) しようとするもので BISRA の Cyclo-Steel 法<sup>26)</sup>, スウェーデン Boliden Kemi AB の Inred 法<sup>28)</sup>がある。フレーム炉は伝熱の点では優れた炉とみられ生産規模を拡大することも比較的容易と思われる。しかし、気固の接触時間が短いので還元がフレーム中だけでは不十分となるおそれがあり、鉱石のフレーム中滞留時間の延長、または最終還元を受持つ炉のデザインがプロセスの優劣を決めるポイントとなる。

Fig. 4 に示す Inred 法\* では、現在  $5 \text{ t/h}$  のパイロットプラント実験中と伝えられるが、円筒形の予備還元部に固体還元剤を酸素と共に吹き込み、フレーム中で鉱石を溶解、予備還元を行う。予備還元された鉱石はコークスと共に鉄浴中に落下し、鉄中  $C$  により還元されて鉄鉄となるように設計されている。なお、このプロセスでは炉下部の加熱に誘導加熱方式を採用している。誘導加熱炉は電極が不用であり、浴内部から加熱する点でアーク炉にくらべて熱効率が向上することが期待できるがエネルギー入力の高密度化、電源の大型化の点に問題があり、スケールアップに際してくふうが必要であろう。

### 3.5 フレーム溶解還元法 (電力)

プロセスに必要な熱の入力を電力に依存しようとするもので、還元雰囲気を持続しつつ熱を外部から供給できるので技術的困難は少ない。ガスの還元力とプロセスへの入熱量を独立して制御できる点で前項における化石燃料燃焼方式のものより有利である。ただし、工程内に何らかの形で発電部分を含むことになるため電力コストあるいは発電効率がこれらプロセスの成否を決定する。

この方式のプロセスには大別して 2 種類の形式があり

\* Inred 法について最近の情報によれば、加熱方法を誘導加熱方式から黒鉛電極によるアーク加熱方式に変更した模様である。

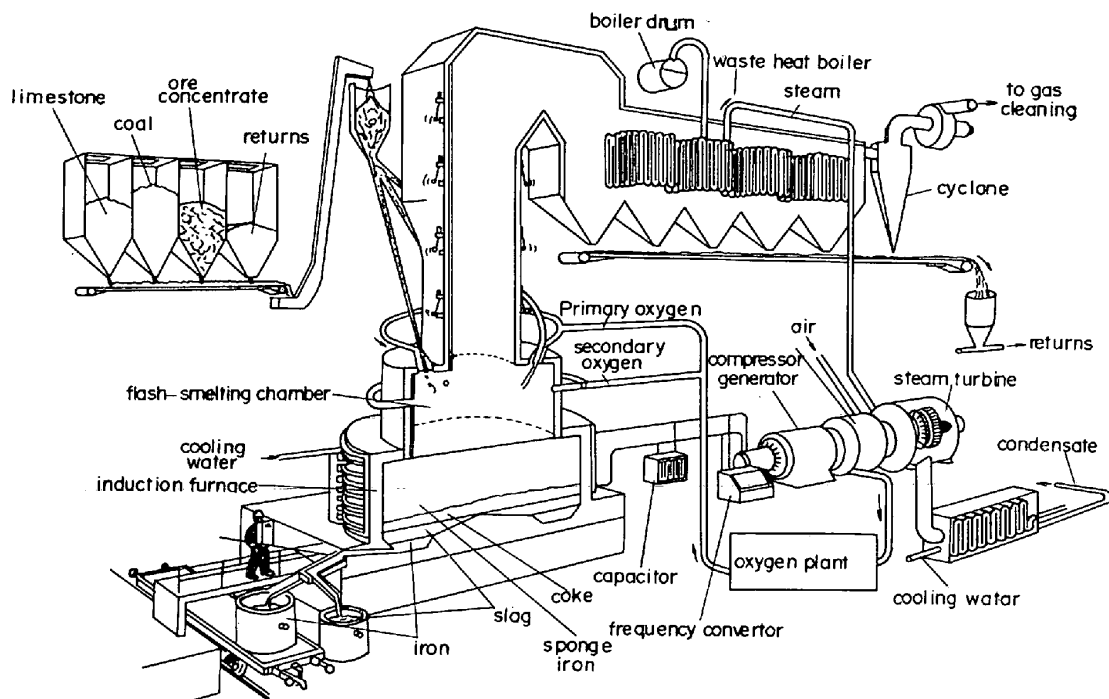


Fig. 4. Inred process.

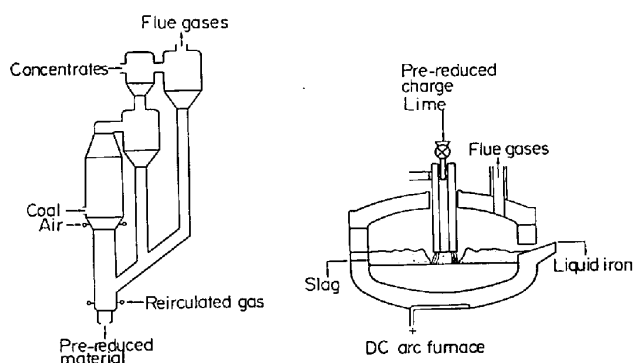


Fig. 5. Elred process.

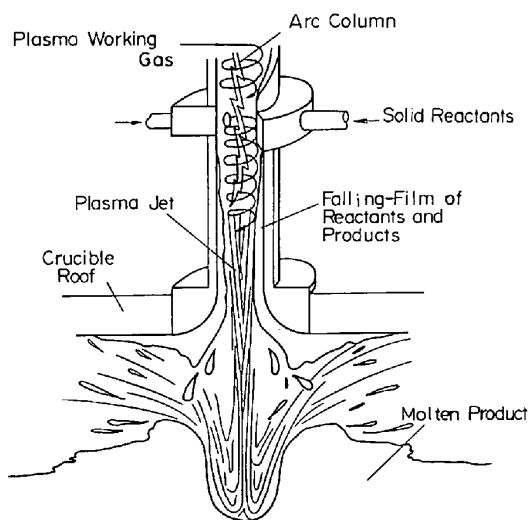


Fig. 6. Bethlehem plasma reactor.

①中空の黒鉛電極にアルゴンなどを吹き込み安定化したアークを用いるアーク炉形式のもの（カナダの EAFR 法<sup>28)</sup>、スウェーデン Stora Kopparberg-Asea 社の Elred 法<sup>29)</sup>）、特殊な形状の水冷電極を用いてプラズマを作り、このプラズマ中で加熱還元を行おうとするものがある。さらに後者については、②プラズマフレームを上から鉄浴に吹き付けるタイプ（Bethlehem-Steel 法<sup>30)31)</sup>、英国の E.P.P. 法<sup>32)</sup>）、③シャフト炉に吹き込むタイプ（ベルギーの C.R.M. 法<sup>33)</sup>、スウェーデン S.K.F. 社の Plasmasmelt 法<sup>34)</sup>）の2つに分類することができる。

第①の形式は安定化したアーク中へ予備還元した酸化鉄を吹き込むというもので Fig. 5 に Elred 法<sup>29)</sup> の例を示した。Selfagglomeration 法<sup>35)</sup> に似た予備還元工程に特徴がある。

第②の形式は還元ガスの加熱をプラズマ炉によつて行

うもので、Fig. 6 に Bethlehem<sup>30)31)</sup>社の例を示した。Falling film plasma reactor と呼ばれるプラズマトーチに主な特徴がある。タングステン陽極と円筒状の水冷銅陰極間で  $H_2$ ,  $CH_4$  などの高温還元ガスをプラズマ化し、その中に粉鉄石を陰極壁面に対し接線方向に吹き込んで還元を行う。鉄石は遠心力により円筒内をフィルム状に付着しながら流下するので大きな熱効率、反応効率が得られるとしている。

第③の形式はシャフト炉とプラズマ炉の組み合わせであり、CRM 法<sup>33)</sup>は従来の高炉羽口部に Fig. 7 に示すようなプラズマ炉を設置し、プラズマの形で高炉に電力

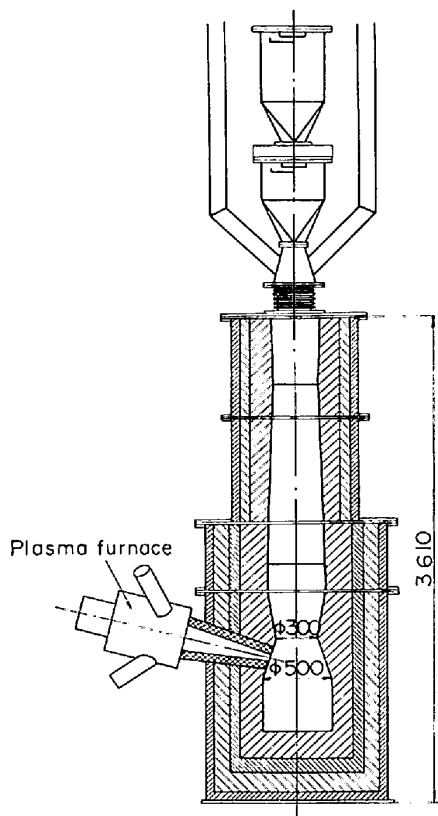


Fig. 7. C.R.M. Blast furnace with plasma reactor.

Table 1. Experimental blast furnace test trials.

Hot blast					
Volume	Nm <sup>3</sup>	2 070	—	—	—
T°	°C	748	—	—	—
Reducing gas					
Volume	Nm <sup>3</sup> /MTHM	—	3 160	2 990	2 800
T°	°C	—	2 290	2 160	2 070
Feedstock air/gas ratio			5.6	3.5	3.2
Dry coke rate	kg/MTHM	717	428	248	179
Top gas					
CO	%	29.9	21.6	22.4	19
CO <sup>2</sup>	%	10.0	6.6	5.2	7.1
H <sub>2</sub>	%	0.8	15.0	21.3	21.2
Pig iron					
Production	MTHM/d	1.29	0.90	1.26	1.35
Si	%	0.64	0.59	0.28	0.31
Slag					
CaO/SiO <sub>2</sub>		1.12	1.17	1.12	0.93

を入力することによって試験高炉ながらコークス比を180 kg/tまで下げ、しかも安定した操業を維持することに成功している。

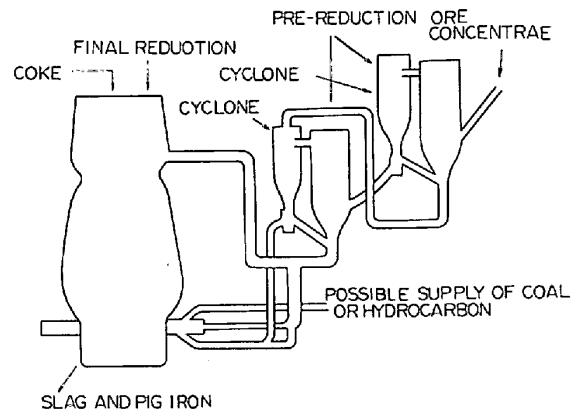


Fig. 8. S.K.F. Plasmasmelt process.

代表的な操業諸元を Table 1 に示す。

一方、Plasmasmelt 法では Fig. 8 に示す主反応器であるシャフト炉にはコークスのみが充填されている。このコークス層は、流動層還元炉において予備還元された鉱石と石炭などの還元剤が、プラズマ炉によつてプラズマ化された炉頂ガスと共に羽口から吹き込まれ、瞬時に溶解する反応の場を提供すると同時に還元ガスの発生器となつている。

この2つのプロセスの相違は還元的主要部分がシャフト炉内で起こるかどうかの差であり、この差によつて装入物が塊状である必要性の有無が生じると同時に、還元ガスの利用効率、熱効率に差を生じプロセス全体としての熱損失、動力費に影響を及ぼすことになる。

しかし、いずれにしてもこの2つは炉の形式からみて高炉操業者にとって親しみの持てるプロセスであり、電力コストが低下した時点ではすぐにも移行できるプロセスと言える。

### 3.6 アーク加熱還元炉

黒鉛電極を用いるアーク炉による還元は、いわゆる電気製鉄法として長い歴史を持つが、電気エネルギーの大入力の困難、CO ガス発生量が少なくこれを還元に有効に利用できないなどの理由によりプロセスとしては停滞状態にあつた。

Fig. 9 に示す科学技術庁金属材料技術研究所において開発中の熔融還元法<sup>36)</sup>は、黒鉛電極三相アーク炉であ

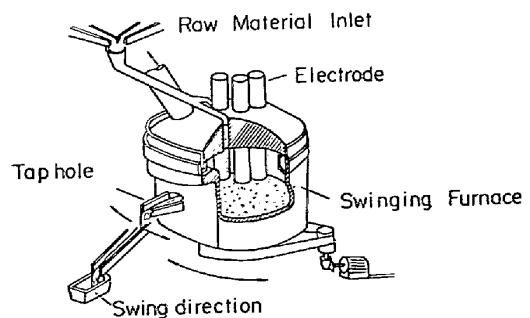


Fig. 9. N.R.I.M process.

Table 2. Summary of the smelting reduction process.

Type	Process	R & D	Feature
Low speed rotating reactor	Basset (Lucian Basset) Sturzelberg (Sachtleben A.G. Demag) Dored (Stora-Kopparberg)	35 000 t/y (1939) Denmark 48 t/d (1961) West Germany 36 t (1965~1968) Sweden	Improve efficiency of heat exchange by rotating furnace
High speed rotating reactor	C I P (BISRA) Rotary reactor system (Republic Steel) Rotored (CSM)	0.65m dia. × 3m (1969~1975) G. B. (~1950) U. S. A 0.70m dia. × 0.7m (1971~1973) Italy	Avoid erosion by keeping slag apart from wall due to centrifugal force
Powder injection	U. S. Steel (U. S. S. ) RIT-Injection (RIT) Ekatorp-Vallak (RIT)	100 t/d (1961~1971) U. S. A. 6 t Bottom blowing furnace (1974~ ) Sweden 1.5 t/h (~1966) Sweden	High productivity due to large reaction interface in the bath
Flame smelting (fuel combustion)	Cyclo-Steel (BISRA) Inred (Boliden)	0.9 m dia. × 4m (1955) G. B. 120 t/d (1977~ ) Sweden	High productivity due to high combustion intensity
(electric power)	1 EAFR (Tront Univ.) Elred (Stora Kopparberg, Asea) 2 Bethlehem (Bethlehem Steel) E. P. P. (Tetronics R and D) 3 C. R. M. (C. R. M.) Plasmasmelt (SKF)	100 kW (1979~ ) Canada 30 t (1971~ ) Sweden 1 MW (1975~ ) U.S.A. 1.4 MW (1978~ ) G. B. 1.35 t/d (~1979) Belgium 3.5 MW (~1980) Sweden	Easy to control the atmospheric condition in the reactor independent of heat input
Arc furnace	NR I M (National Research Institute for Metals)	3 t/h (1976~ ) Japan	Improve productivity by stirring due to swing of furnace

るが、炉体を水平反転させることにより熱分布の改善を図り、通常のアーク炉に比して 10~20% の電力効率向上を得たとしている。

排出ガスは鉱石の予熱に用いられるが、予熱炉は炉内滞留量 1t、炉内原料充填率 60% の特殊ロータリーキルンが開発され、80%還元され 900°C に加熱された鉱石を溶融炉に熱間装入することによりさらに 30% の電力節減が可能であるとしている。原理的には既に実用化されている電気製鉄炉であり技術的に未知の要素は少ないが、大型化に際し炉の回転にともなう機械的な問題が懸念される。

Table 2 に代表的な溶融還元プロセスの特徴と開発状況を示した。

#### 4. プロセス開発の手掛り

前節において述べたように溶融還元には、大別して反応が気相中で行われるものと、液相中で行われるものがあり、また反応系への熱の供給を電気エネルギーに頼るもの、または化石燃料の(部分)酸化熱に依存するものがある。各プロセスの特徴はこれらの組み合わせによつて発生することになる。溶融還元法の今後の開発見通しを行うに際し、その方向付けの一助として従来報告された

研究結果の整理を試みる。なお、引用例は紙面の関係でそれぞれの分野での代表であり網羅的なものではない。

##### 4-1 反応速度について

高炉、シャフト炉など充填層反応器に較べて、熱交換、反応効率の低下がほとんど不可避と思われる。したがって、予想される反応器容積当たりの生産性低下にともなう不利を回避するために、反応速度の上昇を図ることが不可欠である。そのために解決しなければならない基本的問題点は以下のようなものであろう。

##### 1) 気相還元

Ezz<sup>27)</sup>らの研究によれば、①反応温度の上昇にしたがつて反応時間は短くなるが、Fig. 10 に示すように徐々に飽和してくる、②粒径の影響も Fig. 11 に示すように特に 700°C 以上の高温域において小さくなる。Fig. 12 に示すように、還元ガス量に対する鉱石比の増大により還元速度は遅くなる、などのことがわかる。したがって溶融点以上の高温を想定した場合でも還元所要時間は数 10秒程度が必要と思われる。なお、粒子径はガスとの相対速度を確保する意味からもあまり小さくなりすぎない方がよいと思われる。また、A. EL-GEASSY らの研究<sup>28)</sup>による Fig. 13 の実験例からもわかるように CO ガスに比して H<sub>2</sub> ガスの方が速い。したがって熱的な余裕があ

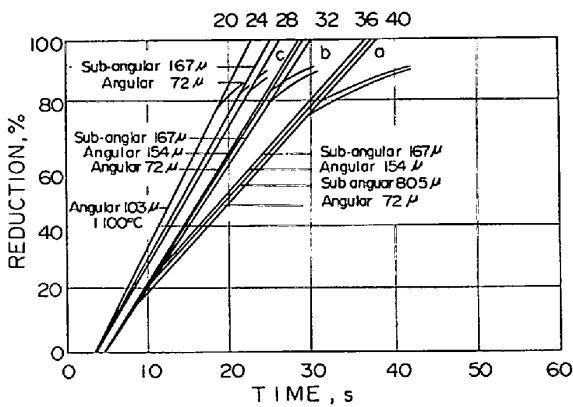


Fig. 10. Rate of reduction.

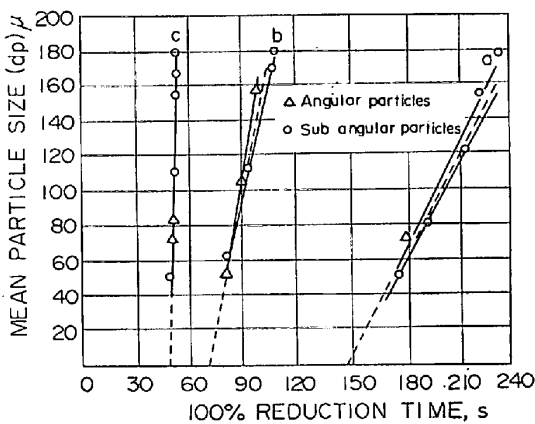


Fig. 11. Relation between particle size and 100% reduction time.

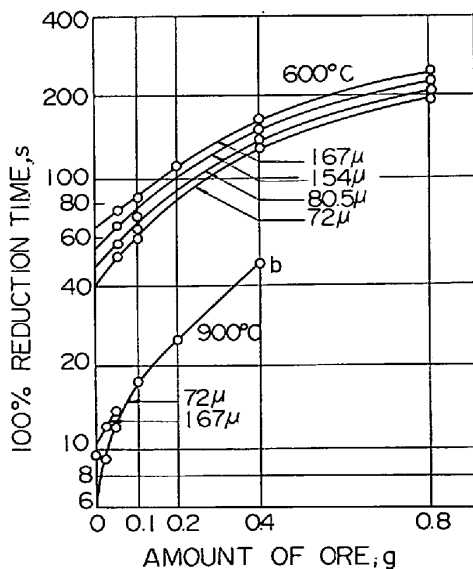


Fig. 12. Relation between amount of ore and 100% reduction time.

れば H<sub>2</sub> 還元が理論的には有利である。

2) 液相還元

固体Cによる溶融酸化鉄の還元速度については数多くの基礎実験がなされている。相馬<sup>39)</sup>らの実験でも Fig. 14

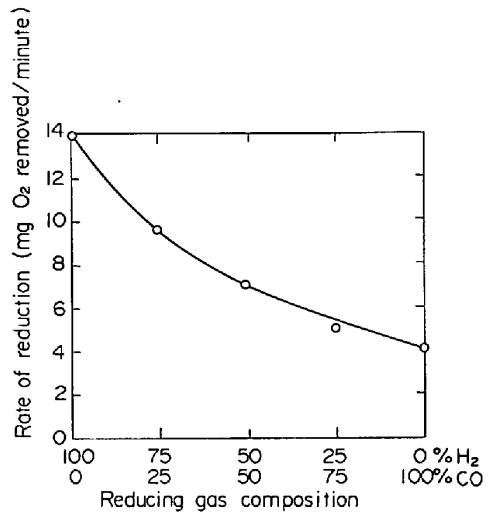


Fig. 13. Effect of gas composition on the rate of reduction.

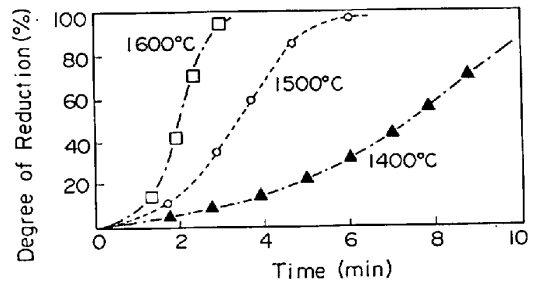


Fig. 14. Reduction of pure FeO by graphite crucible.

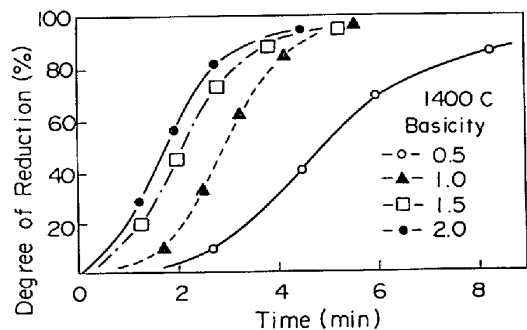


Fig. 15. Effect of basicity on reduction of FeO-CaO-SiO<sub>2</sub> slag.

に示したように反応温度の影響は顕著である。また、Fig. 15 に示すようにスラグ組成の影響も大きい。

須賀田ら<sup>40)</sup>は反応速度を  $a_{FeO}$  で整理しているが、前節で述べたごとくスラグ組成は耐火材料の侵食に密接な関係があり、慎重な検討が必要であろう。

一方、鉄中Cによる還元速度は Fig. 16<sup>41)</sup> に示したように固体Cのそれに比して非常に速い。したがって、酸化鉄中に固体Cを吹き込むよりも、Cを含んだ溶鉄に酸化鉄を吹き込む方が有利となる。

しかし、いずれの場合においても酸化鉄の還元にした

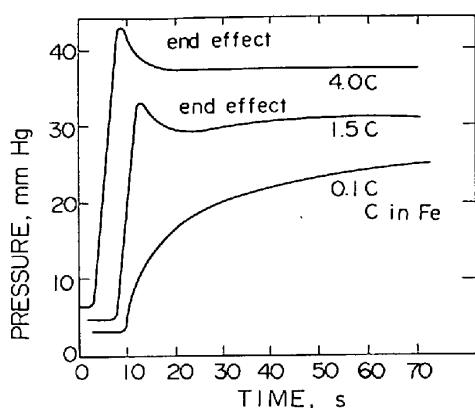


Fig. 16. Typical curves for reduction of FeO by Fe-C melts.

がつて CO ガスが発生し、気泡を生ずれば反応速度に影響を及ぼすことは必至であるし、また操業面での Bubbling や Stopping といった問題も発生するであろう。さらに、溶鉄への石炭吹き込みを想定すればガス相を経由した C の移行機構<sup>42)</sup>、融体内におけるガス相の反応工学的研究<sup>43)</sup>が必要である。もちろん、H<sub>2</sub> 還元機構が明らかとされねばならない<sup>44)</sup>。

3) プラズマ反応<sup>45)46)</sup>

プラズマの製錬および溶解への応用は 1960 年頃から盛んとなつた。プラズマの特徴の第 1 はその高い温度であり、高温のため解離した還元ガスが特異な反応を示すことが知られている<sup>47)</sup>。たとえば、Fig. 17 は溶融酸化鉄を水素プラズマにより還元した例であるが、H<sub>2</sub> の利用率が約 60% となり、これは平衡論から予想される 42% よりはるかに高い。また、Fig. 18 はプラズマで還元中に P が揮散除去されることを示している。

さらに、解離した原子状のガスが低温の物体に触れると表面で再結合し解離エネルギーを放出する。これは見掛上熱伝達率が上昇したことになり、鉄鉱石などの急速加熱の目的に好適である。

4) 周辺技術からの技術移入

周辺技術に期待する問題点は、反応器より排出される高温、高カロリーガスをいかに活用し得るかに集約される。このため、高温除塵装置、高温熱交換器、高変換効率発電システムなどの開発が必要と思われるが、いずれも現時点で満足すべきものはない。問題は溶融還元炉本体の場合と同様耐熱材料でネックになつている。しかし、国家的規模での研究が世界中で進められており、いずれ実用可能なレベルに達することが期待される。

5) エネルギー比較

シャフト炉、ロータリーキルンなどの場合と異なり、溶融還元については実用炉がまだ稼動するに至っていない。したがって現地でのエネルギー原単位などの比較はあまり意味をなさないと思われる。特に比較の対象として関心のある高炉法の場合、プロセスとしての完

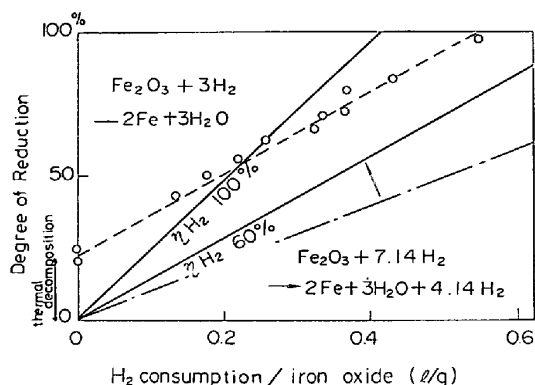


Fig. 17. H<sub>2</sub> Efficiency on plasma reduction.

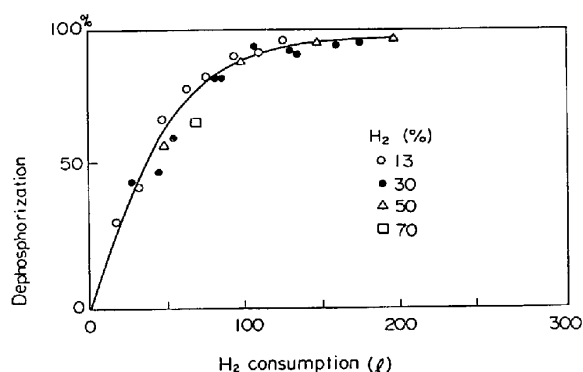


Fig. 18. Relation between H<sub>2</sub> consumption and dephosphorization.

成度が高く、炉体放散熱や用役の大小などを問題にする段階にきている。

原料と成品とが同一であれば各プロセスの所要エネルギーは、原理的には、熱損失といわゆる用役の大小によって決定される。溶融還元法については、まだ、プロセスが技術的に成立し得るかどうか問題にされる段階に止まつており、高炉法との所要エネルギー比較についてこのような計価を行うためには、さらに大規模なパイロットプラント実験が必要であろう。

エネルギー的にみた溶融還元の優劣は、おそらく還元炉本体としては劣るであろうエネルギー所要量を、工程省略、装置のコンパクト化などによりシステムとしていかに切り下げるかにかかっていると思われる。

試算によれば、現在高炉製鉄工程におけるエネルギー収支は、入側で  $10.0 \times 10^9$  cal/t-銑鉄、出側では  $5.7 \times 10^9$  cal/t-銑鉄であり、ネットのエネルギー消費量は約  $4.3 \times 10^9$  cal/t-銑鉄となる。ただし、コークス比 400kg/t-銑鉄、重油比 45kg/t-銑鉄、焼結鉱比 1200 kg/t-銑鉄とする。この内訳はコークス炉部分で  $0.65 \times 10^9$  cal/t、焼結炉部分で  $0.62 \times 10^9$  cal/t、高炉部分で  $3.04 \times 10^9$  cal/t などである<sup>48)</sup>。

将来、エネルギー回収技術の進歩によりこれらの値はさらに低下すると思われるが<sup>49)</sup>、極端に単純化して考えた



場合、すなわち溶融還元炉のみですべての製鉄工程を代替したとすれば、当面溶融還元炉におけるエネルギー収支の増加分が焼結炉とコークス炉におけるネットの所要エネルギー量  $1.27 \times 10^9 \text{ cal/t}$  銑鉄を越えなければ、原理的には溶融還元が成立する訳である。

## 5. 結 言

溶融還元法は高炉やシャフト炉のような充填層形式反応器からの脱却により通気性の束縛から開放され、資源・エネルギー的に極めて広い自由度を獲得できる可能性を有するという意味で非常に魅力のあるプロセスと言える。

また、生産性向上のための高い反応温度は、同時に従来とは異なつた反応の実現が期待できることとなり、付加価値の高い対象分野、たとえば高合金鋼などの直接製造などへの適用が考えられる。

溶融還元法に関する技術的問題点の第1は高温の鉄酸化物に耐える反応容器の問題であり、第2のコストあるいはエネルギー収支的な観点からの問題点は高温排出ガスの利用効率を如何に上昇させ得るかにある。

溶融還元法のこれまでの開発経過をきわめて主観的に眺めてみると、その狙いとアプローチの方法が、古典的な冶金反応に終始しているものが挫折し、最近の先端的周辺技術との結合を図つたり、狙いを化学工業などとの複合化に置くものに今後の期待が寄せられているように思われる。その意味で溶融還元法は転機に立つており、いま必要なことは従来の製鉄法にとられない自由な発想とこれにもとづく技術開発であるとも言えよう。

## 文 献

- 1) 近藤真一: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1542
- 2) 西田信直: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 705
- 3) 近藤真一: 第39回西山記念技術講座; 直接製鉄の最近の進歩, (日本鉄鋼協会編) (1976), p. 64
- 4) 三井物産, 直接還元グループ: 鉄鋼界, (1977) 7, p. 24
- 5) Chemical and Engineering News (1967) Aug. 7 p. 46
- 6) 森 一美: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 348
- 7) S. EKETORP: The Project Future Steelworks, The 2nd Japan-Sweden Joint Meeting on Ferrous Metallurgy (1978) Mar. Tokyo
- 8) R. DURRER: Stahl u. Eisen, 56 (1936), p. 268
- 9) 大原久之: 鉄と鋼, 25(1939), p. 831
- 10) F. EULENSTEIN: Stahl u. Eisen, 57 (1937), p. 6
- 11) T. F. PEARSON, C. G. ARMSTRONG: JISI, (1964) Jan. p. 1
- 12) C. ARCHER, and J. L. GATERAIS: International Congress on the Production and Utilization of Reduced Ore, (1967) May, p. 29 (Evian)
- 13) ANON: The Iron Age, (1963) 31. Oct., p. 104
- 14) A. JOSEFSSON, E. BENGTSSON, and K. ALMGVIST: AIME Ironmaking Proc., 23 (1964), p. 275
- 15) ANON: Metal Bulletin, (1965) 31. Dec, p. 17
- 16) S. EKETORP: JISI, (1972), p. 1
- 17) M. FINNSTON: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 424
- 18) N. P. GOSS and A. K. BLOUGH: ISIJ, 11 (1971), p. 287
- 19) A. RAMAMACIOTTI: Stahl u. Eisen, 98 (1978), p. 329
- 20) U. S. Patent No. 3, 264, 096 (1967)
- 21) 馬野: 特開昭 52-37509, 特公昭 51-45523
- 22) O. WIJK: Austrian Process Metallurgy Seminar, (1976) Nov. 8
- 23) S. EKETORP and O. WIJK: Int. Conf. on Injection Metallurgy, (1977) June 9 (Luella)
- 24) ANON: Steel Times, (1967) may 19, p. 587
- 25) S. EKETORP: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 3156
- 26) T. W. JOHNSON and J. DAVISON: JISI (1964) May, p. 406
- 27) H. I. ELVANDER, I. A. EDENWALL, and S. C.-J. HELLESTAM: Ironmaking and Steelmaking (1979) 5, p. 235
- 28) C. A. PICKLES, S. S. WANG, A. MCLEAN, C. B. ALCOCK, and R. S. SEGSWORTH, ISIJ, 18 (1978), p. 369
- 29) P. H. COLLIN: Iron and Steel Engineer, (1980) Mar., p. 43
- 30) R. G. GOLD, W. R. SANDALL, P. G. CHEPLICK, and P. R. MACRAE: Ironmaking and Steelmaking, 4 (1977), p. 10
- 31) P. R. MACRAE: 82 nd. National Meeting of Am. Inst. of Chem. Eng., (1976) Aug. 29. (Atlantic City)
- 32) Chem. Engineering, (1979) Feb. 26, p. 75
- 33) N. PONGHIS, R. VIDAL, and A. POOS: Proc. 38 th AIME-ISS, 38 (1979), p. 224 (Detroit)
- 34) O. WIJK, and S. EKETORP: Int. Conf. on Injection Metallurgy, (1977) June 9 (Luella)
- 35) 近藤真一, 宮坂尚親, 杉山 喬: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 204
- 36) 金材技研, (1979) 12, p. 1 (科学技術庁, 金属材料技術研究所)
- 37) S. Y. M. EZZ, and R. WILD: JISI, 194 (1960), p. 211
- 38) A. A. EL-GEASSY, K. A. SHEHATA, and S. Y. EZZ: Trans. ISIJ, 17 (1977), p. 629
- 39) 佐々木康, 相馬胤和: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 376
- 40) 須賀田正泰, 杉山 喬, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1363
- 41) C. W. LLOYD: Ironmaking and Steelmaking (1975) 1, p. 49
- 42) 梶原義雅, 佐野信雄, 松下幸雄: 鉄と鋼, 58

- (1972), p. 1193
- 43) K. S. GOTO and S. EKETORP: Scandinavian  
J. of Met. 3 (1974), p. 1
- 44) 片山英司, 田口整司, 植谷暢男, 岡部俠児: 鉄と  
鋼, 64 (1978), S466
- 45) 武田紘一: 金属 (1978) 3, p. 6
- 46) 梶山太郎, 小野清雄: 鉄と鋼, 63 (1977),  
p. 2010
- 47) 中村 泰, 井藤三千寿, 石川英毅: 鉄と鋼, 66  
(1980), p. 2100
- 48) 片田 中: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1827
- 49) 高城俊介: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1839
-