

溶融還元技術開発の現状と将来 解説

浜田 尚夫*

Present State and Prospects of Smelting Reduction Processes

Takao HAMADA

1. はじめに

高炉によらない製鉄法は古くから多数の研究開発が行われてきており、そのひとつとして溶融還元法があつたが、特殊な場合を除いて実用化にはいたらなかつた。現在、鉄鉄の大部分は高炉によつて生産されている。高炉の歴史は、コークスを用いるようになってからでさえ、すでに約 300 年を経ている。高炉は炉内高さ 20~30m の堅型炉であり、その中で燃焼、ガス化、伝熱、還元、溶融、分離などが行われる非常に効率の良い反応装置である。長い技術革新の歴史に耐え、大型化と生産性の向上を実現できた理由も、ここにあるといえよう。

しかし、1970 年代の 2 度にわたる石油危機をきっかけとする世界的な経済成長の鈍化、および資源の有限性に対する認識の深まりの中で、鉄鋼製造プロセスに関する見直しの動きが活発になつている。その中心は省エネルギー、省資源、環境保全であり、製鉄工程もその例外ではない。高炉はその機能を十分に果たすために、一定の粒径範囲で、しかも強度の強いコークスと鉄鉱石を必要としている。したがつて、高品質の粘結炭のコークス化設備と粉鉄の塊成化設備を必要とし、資源の有効利用、省エネルギーおよび環境保全の面でコストアップの原因となつている。さらに、これらの設備が老朽化すれば、そのリフレッシュに多大の費用がかかることから、製鉄プロセスの見直しや変革が必要である。

製鉄プロセスの変革により上記の問題を克服するためには、世界に豊富にある低品質の石炭と粉状の鉄鉱石をできる限りそのまま使用できる製鉄法を開発することであり、その期待から溶融還元法が最近注目されるようになった。溶融還元法については、すでにいくつかの報告や解説があるが^{1)~8)}、ここでは溶融還元技術開発の現状と将来を中心にして述べてみたい。

2. 溶融還元法の特徴

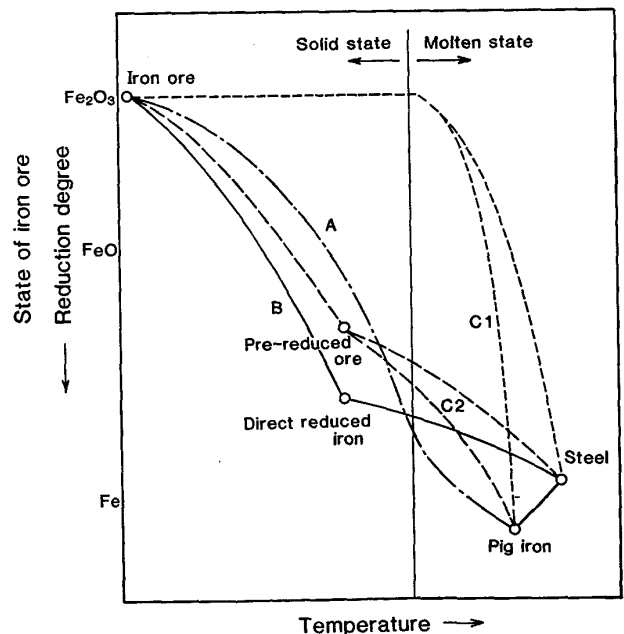
鉄鉱石を溶融状態で還元する方法を溶融還元法と呼び、広義には高炉法も含まれる。しかし、一般的には高炉法

に対抗すべき新製鉄法として、古くから開発が試みられてきた。溶融還元法と他の製鉄法の比較および溶融還元法の特徴を以下に述べる。

2.1 製鉄法の比較

製鉄法の工程は、Fig. 1 に示すような鉄鉱石の還元状態と温度の線図によつて特徴づけられる。また、原料鉄鉱石の形状と還元剤の種類による製鉄プロセスの比較を Fig. 2 に示す。高炉では鉄鉱石は大部分が還元ガスによつて還元されるが、未還元の酸化鉄は炉下部で赤熱したコークスにより溶融状態で還元される。

高炉によらない製鉄法として、還元鉄-電気炉法と溶融還元法がある。還元鉄-電気炉法は直接製鉄法とも呼ばれ、鉄鉱石を固体状態で還元して還元鉄を製造し、電



A Blast furnace
 B Direct reduction furnace + Electric furnace
 C1 Smelting reduction furnace without pre-reduction furnace
 C2 Smelting reduction furnace with pre-reduction furnace

Fig. 1. Relation between reduction state and temperature in various ironmaking processes.

昭和 61 年 2 月 7 日受付 (Received Feb. 7, 1986) (依頼解説)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所プロセス研究部主任研究員 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

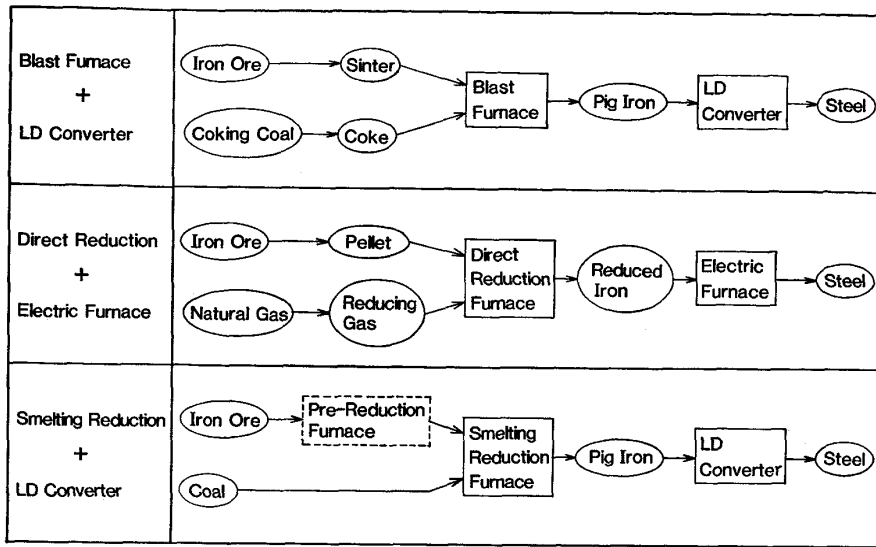


Fig. 2. Comparison of ironmaking processes.

気炉（アーク炉）で溶解する。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、天然ガス産出国を中心に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、鉄鉱石はペレットが主に使用される。石炭などの固体還元剤を使用する場合の還元炉はロータリーキルンが実用化している。

還元鉄-電気炉法では、鉄鉱石として塊成化鉱石を必要とするのは高炉法と同じであるが、還元剤として還元ガスや石炭を使用するので、高炉法のように高い強度のコークスをつくるための原料炭は不要である。しかし、還元ガス製造原料である天然ガス価格の高騰により、天然ガスから石炭へのエネルギー転換を迫られている。石炭ガス化技術を還元ガス製造に利用する考え方もあるが、むしろ石炭を還元剤として直接使用できる方法が望ましい。

溶融還元法は、Fig. 1に示すように溶融してから還元する方法と固体状態で予備還元してから溶融還元する方法がある。その原理は特に新しいものではないが、高炉法や還元鉄-電気炉法のような原料鉱石やエネルギーの制約から解放され、粉鉱石や石炭を直接使用できる可能性があることと将来予想されるミニミルの発展による良質のストラップの不足への対応の可能性とから、溶融還元法が注目されるようになった。

2.2 溶融還元法の特徴

プロセス開発のシーズとニーズがプロセスによつて異なることから、個々の溶融還元プロセスの特徴は同一ではないが、現在の高炉法に比較して次のような特徴が期待されている。

- 1) 焼結鉱やペレットの塊成鉱が不要であり、粉鉱石が直接使用できる。
- 2) 石炭や低い強度のコークスが使用できる。
- 3) 前工程を含めた全体のエネルギー消費量が小さい。

- 4) 前工程を含めた全体の設備コストが安い。
- 5) 小規模立地でも経済性がある。
- 6) 副生ガスの発生量が調節できる。
- 7) プロセスの制御性がよい。
- 8) プロセスの連続化、自動化、省力化が可能である。

これらのすべての特徴を備えた溶融還元プロセスは、むしろ開発されていない。立地条件に適合するいくつかの特徴を持ち、開発が容易なプロセスから実用化が進み、より高度な溶融還元プロセスの開発には、周辺技術の開発を含めてかなりの時間を要すると考えられる。

2.3 溶融還元プロセスの種類

溶融還元プロセスは、現在まで50年間以上も開発が試みられてきたので、プロセスは多種多様であり、単純な分類は不可能であるが、プロセスの構成要素は次のように分類される。

- 1) 鉱石形状……塊（塊鉱石、ペレット）、粉
- 2) 還元剤種類……コークス、石炭
- 3) 熱の発生……電力利用（アーク炉またはプラズマ利用）、化石燃料の燃焼（純酸素または加熱空気の使用）
- 4) 還元工程……1段階還元（溶融還元炉のみ）、2段階還元（予備還元炉と溶融還元炉）
- 5) 予備還元炉……ロータリーキルン、シャフト炉、流動層
- 6) 溶融還元炉……回転炉（低速型または高速型）、鉄浴炉（転炉型または円筒型）、堅型炉（コークス充填層型または流動層型）

各プロセスは、これらの構成要素の組合せで特徴づけられる。熱の発生法、還元炉段数および炉の形式により溶融還元プロセスを便宜的に分類してTable 1に示す。

3. 溶融還元法研究開発の歴史と現状

溶融還元プロセスとして、古くから多数のプロセスが開発され、現在も多くの新しいプロセスの研究開発が行

Table 1. Classification of smelting reduction processes.

Heat supply	Smelting reduction furnace		1-stage reduction without prereduction furnace	2-stage reduction with prereduction furnace
	Fuel combustion	Rotating reactor	Low speed	Basset Stürzelberg Dored
High speed			CIP Rotored	
Flame smelting		Jet Smelting	Flame-Smelting (Cyclo-Steel)	
Shaft furnace			KR Sumitomo Metals Kawasaki Steel	
Electric power	Powder injection		Eketorp-Vallak RIT-Injection	U.S. Steel COIN CIG Klöckner
	Arc furnace			Elkem Statigic-Udy Elred Inred
	Plasma reactor		Bethlehem Steel Tetronics-EPP Pirogas	Plasmasmelt

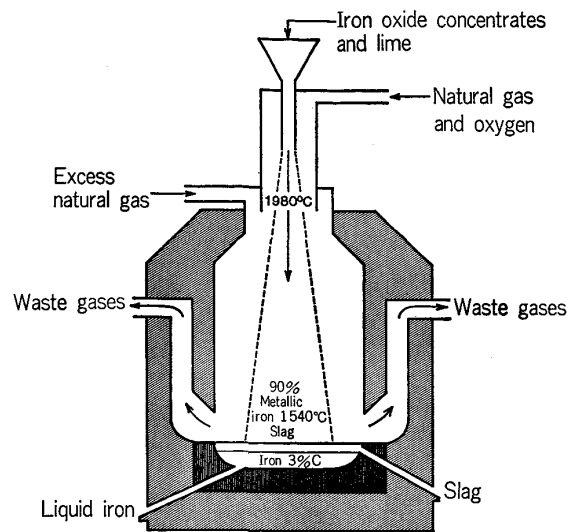


Fig. 4. Jet Smelting process.

われている。各プロセスは、その時代の社会的および経済的なニーズに応えるべく、おのおの異なる立地条件や技術基盤を背景として研究開発されてきたもので、一律に論ずることは難しいが、研究開発の歴史と現状を以下に概説する。

3.1 研究開発の歴史

溶融還元法の初期のプロセスとして、ロータリーキルンを応用した低速回転炉法がある。1930年代の後半にデンマークで Basset 法⁹⁾、西独で Stürzelberg 法¹⁰⁾ が開発され、前者はデンマークなど数か国で一時期企業化された。1960年代の後半にはスウェーデンで Dored 法¹¹⁾ が試験された。Dored 法の概念図を Fig. 3 に示す。回転炉法は炉内で発生するガスの燃焼熱を溶融浴に効率よく伝熱することを意図したが、回転により炉壁が急激な熱サイクルを受けることと炉壁に付着する FeO 含有スラグのために耐火物の損傷が大きい。

炉体を高速で回転することにより、スラグを耐火物に接触させないことをねらって、1970年頃からイギリス

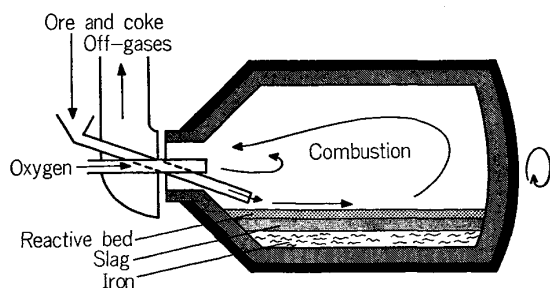


Fig. 3. Dored process.

で CIP 法¹²⁾、イタリアで Rotored 法¹³⁾ などの高速回転炉法の開発が試みられた。耐火物の損傷はかなり軽減されるが、高速回転にともなう設備上の問題やスケールアップの困難さがあるものと考えられる。

石炭と酸素とともに微粉鉱石を吹き込み、高温の燃焼フレーム中で溶融還元する方法として、1950年代にイギリスで Flame-Smelting 法¹⁴⁾ (別名 Cyclo-Steel 法)、カナダで Fig. 4 に示す Jet Smelting 法¹⁾ の開発が試みられた。伝達速度や生産性はすぐれているが、フレーム中だけでは溶融還元が不十分となるので、最終還元を行う炉との組合せが重要となる。

溶融浴への粉体吹き込みを利用する考えから、酸化鉄浴に還元剤を吹き込む方法として、アメリカで U.S. Steel 法、鉄浴中に鉱石および還元剤を吹き込む方法としてス

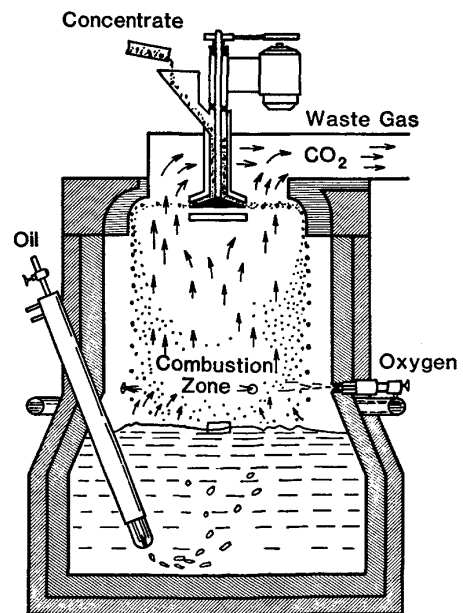


Fig. 5. Eketorp-Vallak process.

ウェーデンで Fig. 5 に示す Eketorp-Vallak 法が、おのおの 1960 年代に試験された。酸化鉄浴式は熱効率は良いが、耐火物の問題があり、鉄浴式では高温で発生する CO の利用が課題となる。

製鉄に電気を利用する方法として、電気製鉄法が 1920～30 年代に開発され、Elkem 法¹⁾ や Strategic-Udy 法¹⁾ は 1940～60 年代に世界各地で企業化された。ロータリーキルンやシャフト炉を予熱や予備還元を利用することにより各種原単位を減少しているが、現在では南アフリカなどの一部の地域で特殊に操業されているにすぎない。

1970 年代の後半から、資源およびエネルギー問題への柔軟な対応を目標として、新しい溶融還元プロセスの研究開発が活発に行われるようになった。新プロセスでは予備還元炉と溶融還元炉とからなる 2 段階還元法の採用が多い。溶融還元炉への高炉や転炉の技術の応用が目立つ。鉄浴炉を用いる方法として、RIT-Injection 法¹⁶⁾、

COIN 法¹⁷⁾、KS 法、CIG 法^{8) 18)} などが、堅型炉を用いる方法として、KR 法^{19) 20)}、住友金属法²¹⁾、川崎製鉄法²²⁾ などが、発表されている。プラズマ技術などを応用した電気エネルギーを用いる方法として、Elred 法²³⁾、Plasmasmelt 法^{24) 25)}、Inred 法²⁶⁾ などが研究開発されている。

3.2 研究開発の現状

溶融還元法が高炉法を補完する初めてのケースとして、KR 法の商業化計画が 1985 年に発表されてから、溶融還元法の研究開発も新しい段階を迎えようとしている。現在、研究開発中の主な溶融還元プロセスの中の 1 部のプロセスについての開発状況を簡単に紹介する。

1) COIN 法

西独の Krupp 社が開発中のプロセスで、3t の底吹き試験転炉による試験を実施している。底吹きの 2 重管羽口の内管から酸素、外管から微粉炭を吹き込む。溶融還元炉は加圧型で、予備還元鉱石は炉口から供給される。

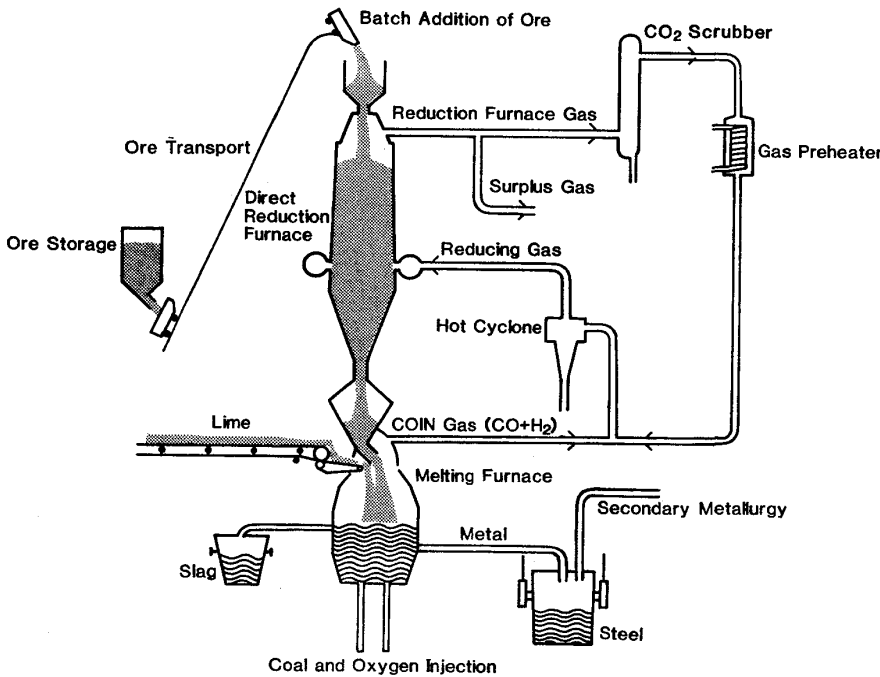


Fig. 6. COIN process.

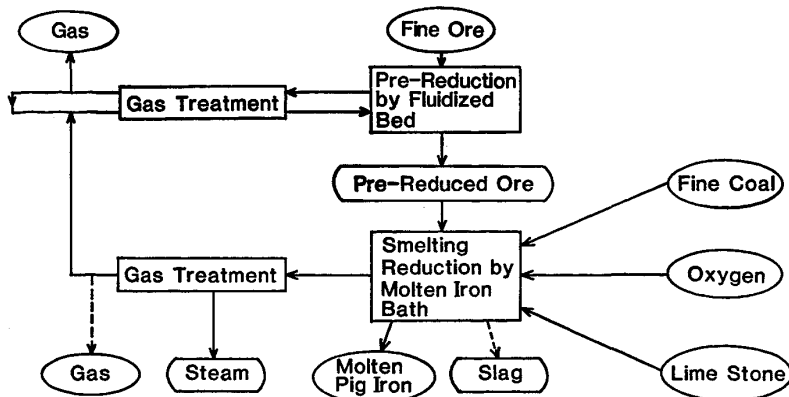


Fig. 7. CIG process.

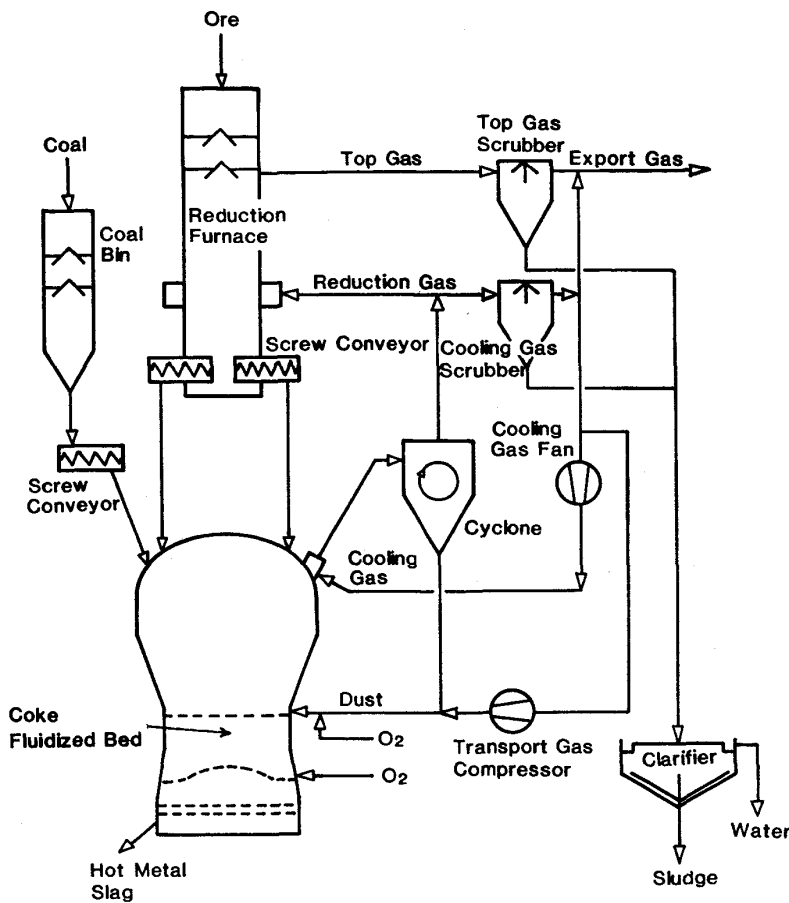


Fig. 8. KR process.

溶融還元炉と予備還元炉の構成例を Fig. 6 に示す¹⁷⁾.

2) CIG 法

鉄浴による石炭ガス化法 (Coal Iron Gasification) の技術が IEA (International Energy Agency) の研究テーマとして、スウェーデンと日本の検討グループの間で共同研究が行われた。日本側は日本鉄鋼連盟を窓口として新日本製鉄、日本鋼管、神戸製鋼が参加し、鉄浴による溶融還元製鉄法に関する技術的および経済的な評価作業を行つた⁸⁾。検討内容は公表されていないが、粉鉱石を直接使用する場合の CIG 法のプロセス概念を Fig. 7 に示す¹⁸⁾。

3) KR 法

オーストリアの Voest Alpine 社と西独の Korf Engineering 社との共同開発によるプロセスで、60 000 t/年のパイロットプラントが西独の Kehl 市で 1981 年から操業され、プロセス技術がほぼ確立された。基本的なフローシートを Fig. 8 に示す²⁰⁾。溶解ガス化炉に投入された石炭は高温の還元ガスと接触して、乾燥・乾留・細粒化され、炉下部から吹き込まれる酸素と反応しながら高温のコークス流動層を形成する。溶解ガス化炉発生ガスは温度調節用ガスと混合してから還元ガスとしてシャフト炉形式の予備還元炉に導入される。塊状の還元鉄は高温で予備還元炉から排出され、溶解ガス化炉に装入されて、銑鉄とスラグを生成する。銑鉄の品質は高炉の

場合とほぼ同様である。鉄鉱石は高炉に使用する原料と同様のものが適する。石炭は粒径 0~50 mm、水分 3~8% のものを使用できる。炉は最大 5 atm で操業され、操業原単位は使用する石炭の組成にもよるが、銑鉄 t あたり次の程度と予想される²⁰⁾。

石炭 (固定炭素分) 500~700 kg
 酸素 500~600 Nm³

KR 法の商業プラントが、南アフリカの Iscor 社に

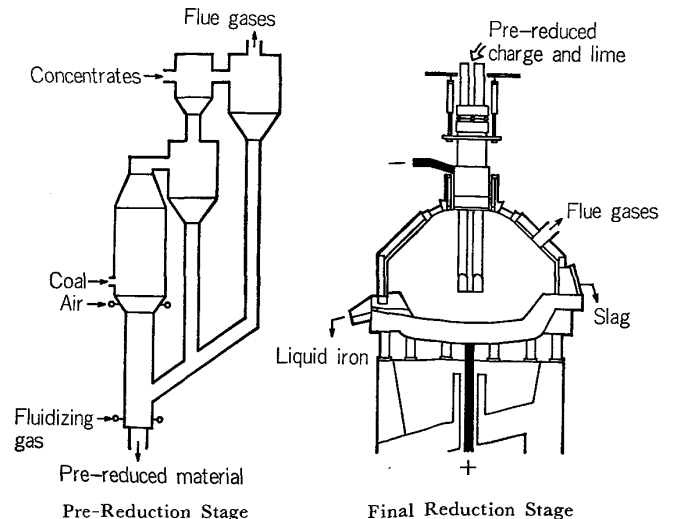


Fig. 9. Elred process.

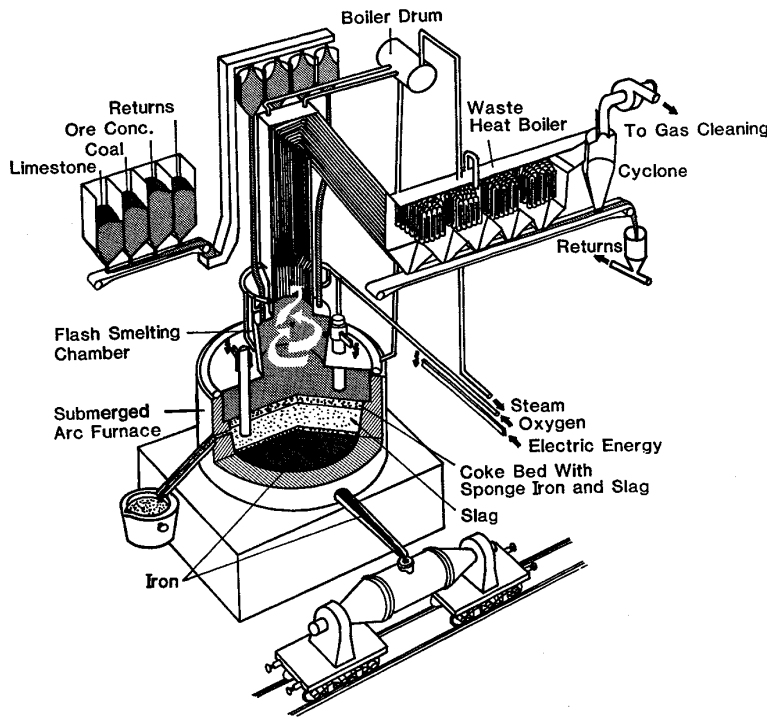


Fig. 10. Inred process.

建設される。1987 年末に操業開始の予定で、年産 30 万 t の銑鉄と多量の副生ガスが生産される計画である。

4) Elred 法

スウェーデンの Stora Kopparberg 社と Asea 社により研究開発が進められている。Fig. 9 に示すような流動層予備還元炉と直流電気炉からなる²³⁾。流動層技術は西独の Lurgi 社により提供され、流動層での石炭の使用による微粉鉱石の予備還元の特徴がある。予備還元鉱石は直流電気炉の中空電極から供給され、電極下部のプラズマにより急速に熔融還元が進行する。排ガス利用の発電により必要な電力を供給するシステムを想定している。予備還元炉は 10t/d のパイロットプラント、熔融還元炉は 8~9 MW の 25t 直流電気炉による試験が、1970 年代の後半に行われた。直流電気炉は南アフリカの MSA 社でクロム鉱石からのフェロクロム製錬への応用として商業化され、1984 年から稼動している。

5) Inred 法

スウェーデンの Boliden 社が開発中のプロセスである。Fig. 10 に示すように、石炭と酸素の吹込みにより微粉鉱石のフラッシュ・スメルティングを行う予備還元部とアーク炉の最終還元部よりなる熔融還元炉本体と排ガスの熱回収設備および発電設備から構成される²⁶⁾。1970 年代のパイロットプラント試験後、1982 年から 200t/d のデモンストラーションプラントによる試験を行っている。銑鉄 t 当たりの予想原単位は次のとおりである²⁶⁾。

石炭 (乾量)	620 kg
酸素 (95%O ₂)	660~680 Nm ³

電力 (電気炉, 酸素; 補助)	680 kWh
発電	680 kWh

酸素と電力はプラント内で自給できる、いわゆるエネルギー自己完結型のプロセスを特徴としている。

6) Plasmasmelt 法

スウェーデンの SKF Steel 社が開発中のプロセスで、Fig. 11 に示すように高炉型の熔融還元炉と流動層予備還元炉で構成される²⁵⁾。熔融還元炉の羽口部にプラズマトーチを設け、ここから粉体原料を還元ガスとともに吹き込む。1.5 MW のプラズマトーチを設けたパイロットプラント試験を 1978 年から実施している。Plasmasmelt 法をベースとした他分野への応用プロセスとして、Plasmared, Plasmadust, Plasmazing, Plasmachrome などのプロセスがある。

Plasmared 法は、Wiberg 法のガス発生炉をプラズ

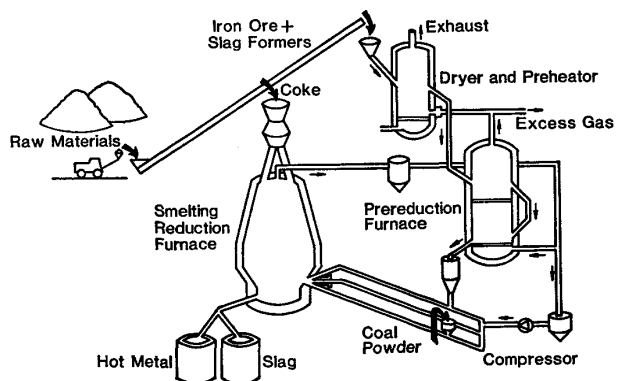


Fig. 11. Plasmasmelt process.

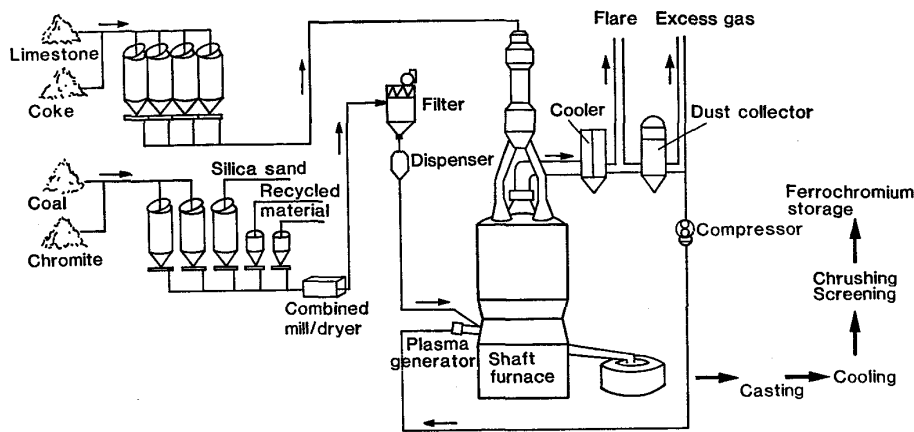


Fig. 12. Flowsheet of Plasmachrome process.

マ式に改良した還元鉄製造プロセスで 1981 年から操業されている。プラズマトーチは 3 MW×3 本で開始し、現在は 6 MW 1 本である。Plasmadust 法は製鉄所ダストから金属を回収するプロセスである。年間 7 万 t のダストから 3.5 万 t の金属を生産する商業プラントがスウェーデンの Landskrona 市に建設され、Scan Dust 社により 1984 年から操業されている。3 本の 6 MW プラズマトーチを使用している。Plasmachrome 法はクロム鉱石からフェロクロムを製造するプロセスで、フローシートを Fig. 12 に示す²⁵⁾。年間 7.8 万 t のフェロクロムを生産する商業プラントがスウェーデンの Malmö 市に建設され、Swede Chrome 社により 1986 年から操業されている。8 本の 6 MW プラズマトーチが用いられる。52~58%Cr のチャーシクロム 1 t あたりの操業原単位は、次のように予想されている²⁵⁾。

クロム鉱石	2.1~2.4 t
石炭	0.40~0.50 t
コークス	0.15~0.25 t
フラックス	0.20~0.30 t
電力 (プラズマ用)	3 800~4 500 kWh
エネルギー回収	4 500~5 500 kWh

3.3 フェロアロイ製造技術への応用

主要なフェロアロイは電気炉法によつて生産されているが、その電力原単位は、高炭素フェロマンガン製造では約 2 200 kWh/t、高炭素フェロクロム製造では約 3 800 kWh/t (予備還元法では約 2 300 kWh/t)、フェロシリコン製造では約 9 300 kWh/t である。わが国の電気料金は他のフェロアロイ生産国の数倍にもなり、フェロアロイ工業の国際競争力が弱まり、フェロアロイの輸入量が増加している。主要エネルギーを電力に依存するかぎり現行プロセスの改善には限界があるので、脱電力プロセスへの移行など生産プロセス転換の技術開発を進める必要がある。

わが国の金属製造業におけるエネルギー転換の観点から、溶融還元製錬技術が「共通基盤型石油代替エネルギ

ー技術開発費補助金制度」による補助対象技術のひとつとして取り上げられ、製錬新基盤技術研究組合により研究開発が推進されている。フェロクロム溶融還元製錬技術については、昭和 57 年度から 62 年度までの 6 か年計画の研究開発が、鉄鋼 6 社、フェロアロイ 3 社、特殊鋼 2 社の合計 11 社の共同研究により進められている⁷⁾。

フェロクロム製造への溶融還元法の応用としては、前述のように、Elred 法の直流電気炉が南アフリカの MSA 社で、Plasmachrome 法がスウェーデンの Swede Chrome 社で商業化されている。いずれの方法も主エネルギーとして電力を用いるので、今後は電力を使用しないプロセスの実用化が期待される。

4. 技術開発課題と将来の動向

溶融還元法は高炉法と比べて、安価な原料の使用、事前処理などの工程の省略、装置の小型化などを実現できる可能性がある方法として、古くから多数のプロセスの研究開発が行われてきた。溶融還元法が今まで本格的に実用化されなかつた技術上の理由、今後の技術開発課題および将来の動向について、種々の側面から考察する。

4.1 所要エネルギーと熱供給

鉄鉱石から鉄を製造する所要エネルギーは、熱効率が 100% の場合、原料と成品が同じであれば還元剤やエネルギーの種類および炉の形式によらず一定である²⁷⁾。実際のプロセスでは、炉の形式やプロセス構成の相異による熱損失および用役の大小によつて所要エネルギーは異なる。高炉法でのエネルギー消費は、高炉部分で 3.0×10^6 kcal/t、コークス炉と焼結炉を含めて 4.3×10^6 kcal/t 程度である²⁾。溶融還元法では所要エネルギーを比較できる段階まで開発が進んでいないが、高炉部分でのエネルギー消費に近づけることがひとつの目標となろう。所要エネルギーを減少するためには、炉内での熱およびガスの利用効率を高め、プロセスを簡素化し、熱損失を少なくする必要がある。

鉄鉱石の還元反応の吸熱量は大きいので、炉へ熱を有効に供給する方法が重要である。熱の供給方法がプロセスを特徴づけ、炉の生産性を律速することが多い。極端に言えば、熔融還元プロセスの開発は熱の供給方法の合理性の追求である。

熱の供給源として、化石燃料の燃焼熱または電気エネルギーの利用がある。化石燃料の燃焼媒体として、予熱空気、O₂ 富化空気および純酸素がある。エネルギー発生密度は純酸素が大きい、熱供給の有効性はプロセス構成や熔融還元炉排ガス温度により異なる²⁸⁾。電気エネルギーの利用は電力の高い地域では魅力がないが、還元に必要な温度と還元ポテンシャルを別々に制御できるし、エネルギー密度が高く、排ガスを減少できるなどの特徴がある。プラズマ反応では、高温で解離した還元ガスが反応や伝熱に対して特別な効果を持つことが知られている²⁾。将来、新技術により排ガス利用の発電効率が大幅に向上すれば、電力利用プロセスが見直される可能性があるだろう。

4.2 炉の効率

熔融還元プロセスの効率として、炉の生産効率、ガス反応率、熱効率がある。熔融還元法では鉄鉱石を熔融状態で還元するので、固体還元と比べて、大きな反応速度が期待できる²⁾⁶⁾。熔融還元が起こる反応帯として、熔融鉄浴、熔融スラグ層、コークス充填層、炭材流動層があり、炭材または溶解炭素と熔融酸化鉄の接触によつて主な反応が起こるので、反応界面積と界面への熱の供給が重要となり、プロセスの効率に大きな影響をおよぼす。

熔融還元炉の生産効率を高炉と比べると、単位容積あたりの生産量(出鉄比)は 2~10 t/m³・d、単位断面面積あたりの生産量は 20~100 t/m²・d であり、高炉のおおの 1.5~2.5 t/m³・d、50~70 t/m²・d よりも大きな値であり、反応容器の小型化は達成できる可能性を示している。

熔融還元法では、小さい反応帯で高温反応を行うので排ガス温度が高く、ガス反応率が低い。

熔融還元プロセスの熱・物質収支のシミュレーション計算結果の例²⁸⁾を Fig. 13~15 に引用しながら、技術開発課題について説明する。シミュレーション計算は、熔融還元炉や予備還元炉の主要機器で構成され、還元ガス One pass (後述)の最も簡略なシステムを対象として、Ash 14%, VM 33%, 水分 2% の石炭使用と熔融還元炉熱損失 250×10³ kcal/t を仮定している。熔融還元プロセスでの炭材の消費量は、Fig. 13 に示すように²⁸⁾、熔融還元炉または予備還元炉の排ガス温度とガス反応率 = (CO₂ + H₂O) / (CO + CO₂ + H₂ + H₂O) に左右される。図中の記号 B, C は熔融還元炉の形式、数字 1~4 は予備還元炉、2 次燃焼、ガスリホームの有無を示す。熔融還元炉の形式 B は Table 1 の堅型炉で、KR 法のように炭材の流動層中で熔融還元を行う場合で、流

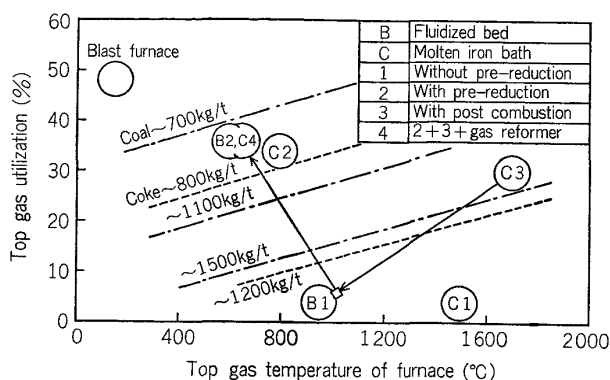


Fig. 13. Characterization of various smelting reduction process.

動層中の熱交換により排ガス温度は 1000°C 程度に下がるが、2 次燃焼の利用は困難である。形式 C は粉体吹込みを転炉のような鉄浴中に行う場合で、排ガス温度は高いが、2 次燃焼の利用が可能である。Fig. 13 の縦軸のガス反応率は、熔融還元炉の場合は 2 次燃焼を含めたガス組成、予備還元炉の場合は予備還元炉の排ガス組成を意味する。

高炉は気・固向流接触の連続型反応器であり、還元ガスは炉内で最大に利用されて炉から排出されるので、排ガス温度が低くガス反応率が高い。このため、炭材消費量は熔融還元プロセスの方が大きい。熔融還元プロセスのガス反応率を上げ、排ガス温度を下げるためには、熔融還元炉の操作条件や反応条件を改善するだけでは限界がある。熔融還元炉排ガスの有効利用と熔融還元炉の熱負荷の軽減が必要である。このための方法として、予備還元、原料の熱間装入、2 次燃焼などの技術開発が必要である。Fig. 13 の B1 と B2, C1 と C2, または C1 と C3 の比較から、予備還元と 2 次燃焼の効果が顕著であることが予想される。

4.3 予備還元技術

最近の熔融還元プロセスの動向として、予備還元炉と熔融還元炉から構成されるプロセスの提案が多い。熔融還元炉排ガスの熱(顕熱)と還元力(潜熱)を有効に利用して鉄石を予備還元する。予備還元鉄石を熔融還元炉に供給することによつて、熔融還元炉の熱負荷が軽減して炭材消費量と排ガス発生量が減少するとともに、スラグ中の FeO 量が減少することによる耐火物侵食の軽減の効果がある。2 次燃焼なしで予備還元率を変えた場合と予備還元なしで 2 次燃焼率を変えた場合の炭材消費量におよぼす影響の計算例を Fig. 14 に示す²⁸⁾。

予備還元技術として還元鉄製造技術が応用できる。還元鉄製造技術では、ペレットを使用するシャフト炉法やロータリーキルン法が主流であり、粉鉄石を直接使用する流動層法の工業化例は少ない。流動層技術は、化学工業の反応装置や非鉄金属工業での焙焼炉に広く利用されていて、粉体の大量連続処理に適している。熔融還元法

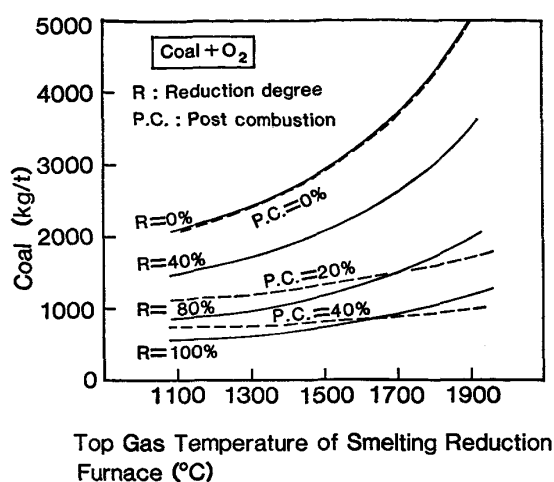


Fig. 14. Effect of prereduction and post combustion on coal consumption.

では、予備還元率として還元鉄製造ほどの高還元率は必要ではないので、流動層の多段化や焼結防止の技術は比較的容易なもので対応可能と考えられる。粉状鉱石の直接使用による塊成化工程の省略は溶融還元法の大きな目標であり、流動層予備還元技術は重要な要素技術となろう。

4.4 2次燃焼技術

2次燃焼 (Post combustion) 技術は溶融還元で発生するCOを炉内でCO₂にまで燃焼する技術である。CのCO₂までの燃焼熱はCOまでの燃焼熱の3.6倍もあり、2次燃焼により熱の供給能力を大幅に増加できる。

溶融還元法の初期に提案されたプロセスでは、高2次燃焼が多数試験されたが、排ガス温度上昇による熱効率の低下やスラグ中FeOの増加による耐火物の損傷などの問題があつた。したがって、高2次燃焼による発生熱を反応帯に有効に伝熱する方法 (着熱効率の上昇) やFeOの増加を防止する方法の開発が、今後の重要な課題となろう。

溶融還元法に予備還元と高2次燃焼の両方の効果を期待する考え方もある。予備還元での還元ガスの利用形式として、予備還元炉の排ガスからCO₂や水分を除去して予備還元炉へ戻す還元ガス循環方式と、排ガスは系外に排出し溶融還元炉からのガスだけで予備還元する還元ガス One pass 方式がある。設備および運転ともに One pass 方式が簡単であるが、排ガスを系外で利用できない場合は循環方式を考える必要がある。還元ガス One pass 方式の場合について、還元ガス利用率、平衡濃度、排ガス温度、溶融還元炉炭材量などから実用上妥当と考えられる還元可能範囲の例を Fig. 15 に示す²⁹⁾。One pass 方式では予備還元炉に必要な還元ガス量と溶融還元炉で発生する還元ガス量のバランスが必要となる。低2次燃焼率では低排ガス温度となり高予備還元率のプロセスが成立し、高2次燃焼率になるほど、高排ガス温度となるが、低還元率でプロセスが成立する。した

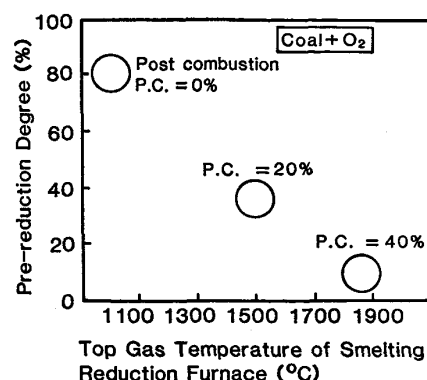


Fig. 15. Feasible operating condition for smelting reduction.

がつて高2次燃焼率で高予備還元率のプロセスを成立させるには、溶融還元炉排ガス中のCO₂を炭材や炭化水素で改質して、ガス組成と温度を予備還元に適するように調節する必要がある²⁹⁾。還元ガス One pass の場合では高2次燃焼排ガスを中間リホームでガス組成と温度を調節し予備還元する場合 (Fig. 13 の C4) と、溶融還元炉で中間リホームと同じ組成と温度のガスを発生し予備還元する場合 (Fig. 13 の B2) とでは、炭材の消費量は同等である。中間リホーム形式では、設備と操業が複雑となる。

4.5 炉の結合運転技術

炉の結合形態として、①溶融還元炉排ガスの予備還元炉への導入、②予備還元鉱石の溶融還元炉への装入、③溶融還元炉と予備還元炉の間に除塵用サイクロンやガス組成調節用リホームなどの中間炉の設置が必要な場合がある。予備還元炉と溶融還元炉を結合した新プロセスの提案が多いが、両者を結合したパイロットプラントでの運転例は意外と少ない。炉の結合運転が容易ではないことを示唆しており、今後の開発課題である。

溶融還元炉の排ガスは多量のダストを含む高温ガスであるので、予備還元炉へ導入する前に除塵や温度調節が必要である。予備還元炉は連続操業が普通であり、還元ガスの流量、温度、組成の変動が少ない方が適しているので、溶融還元炉はバッチ操業よりも連続操業の方が望ましい。

溶融還元炉への予備還元鉱石の輸送、吹込み技術として、熱間装入が望ましく、その場合に予備還元鉱石の温度降下、鉱石吹込み用ガス、吹込みノズルの摩耗、鉱石のダスト飛散などが少ないほど良い。

4.6 耐火物

溶融還元プロセスが実用化されにくい大きな原因のひとつとして耐火物の問題がある。溶融還元法では多量のFeOを含むスラグが生成する場合が多く、耐火物の侵食が大きい。高炉法での炉寿命は約10年にも達する。溶融還元用に耐FeOの新しい耐火物の開発が望まれるが、反応の起こる高温帯を炉壁から離し、炉壁を高温と

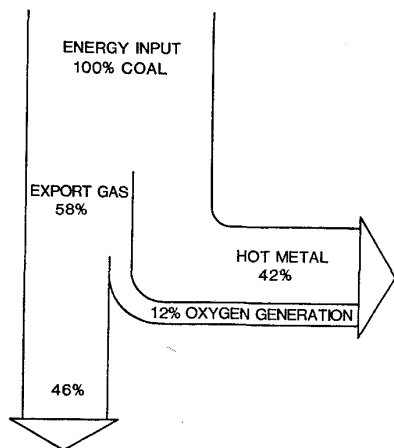


Fig. 16. Energy flow of KR process.

高 FeO スラッグに接触させないような炉形式の開発も重要である。

4.7 熱およびエネルギー回収

概略的には、Fig. 13 での高炉法と溶融還元法の炭材消費量の差に相当するエネルギーを、溶融還元プロセスの排ガスが顕熱および潜熱として保有する。したがって、溶融還元プロセスの経済性は、排ガスから回収できるエネルギーの評価に大きく影響される。溶融還元プロセスでは、一般に副生エネルギーの発生量が多く、KR 法の例 (Fig. 16) では約 46% にも達する。

立地条件によつては、副生エネルギーを自己のプラントで必要な量にまで減少できて余剰エネルギーを放散しない、いわゆるエネルギーの自己完結性が重要となる。したがって、エネルギー発生フレキシビリティが要求されるようにならう。

4.8 炉のスケールアップと技術の総合化

製鉄を目的とした溶融還元プロセスは実用化していない。最初の商業炉となる KR 法の生産規模は 1000 t/d 程度であり、大型高炉の 10000 t/d よりはるかに小さい。溶融還元プロセスは小規模でも立地可能な地域での商業化により実績を積み重ねて信頼性を向上させることにより、段階的にスケールアップしていくことにならう。

新しい原理にもとづく溶融還元プロセスに、高度に発展した高炉法と転炉法の設備技術および操業技術を導入し、還元鉄製造、石炭ガス化、O₂ 製造、熱交換、エネルギー回収、発電技術、制御技術、システム技術などの周辺技術を取り入れて、原燃料の多様性、操業の柔軟性、制御性の向上をはかり、溶融還元技術の総合的な完成度を高めていく必要がある。

5. おわりに

溶融還元技術の特徴、開発の必要性、開発の状況および将来の展望について述べた。資源およびエネルギー問題への将来の対応を考えると、原料資源やエネルギーの制約から解放される可能性がある溶融還元技術の開発は重要な課題である。

溶融還元法には、その目標を達成するために多くの開発課題があるが、新しい発想と先端的な周辺技術の導入による要素技術およびトータルシステム技術の開発によつて、溶融還元法の特徴を生かせる新製鉄法の研究開発が、積極的に進められることを期待したい。

文 献

- 1) Commission of the European Communities: Direct Reduction of Iron Ore, The Metals Society, London (1979)
- 2) 中村正和, 徳光直樹: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 480
- 3) R. THIELMANN and R. STEFFEN: Stahl Eisen, 101 (1981), p. 841
- 4) C. G. DAVIS, J. F. MCFARLIN and H. R. PRATT: Ironmaking Steelmaking 9 (1982) 3, p. 93
- 5) J. J. MOORE: J. Met. (1982) June, p. 39
- 6) 相馬胤和: 日本金属学会会報, 21 (1982), p. 620
- 7) 鶴岡一夫: 工業技術 (1983), p. 40
- 8) 林 洋一: 鉄鋼界 (1984) 6, p. 72
- 9) K. E. JENSEN: Stahl Eisen, 72 (1952), p. 1466
- 10) F. EULENSTEIN and A. KRUS: Stahl Eisen, 57 (1937), p. 6
- 11) A. N. WHITING and A. G. RAPER: Steel Times (1964) Oct., p. 492
- 12) M. FINNSTON: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 424
- 13) A. RAMACCIOTTI, B. IMBERTI, V. GIORDANO, A. MILANI and C. BORGIANNI: Stahl Eisen, 98 (1978), p. 329
- 14) T. W. JOHNSON and J. DAVISON: JISI, 202 (1964), p. 406
- 15) S. EKETORP: Steel Times (1967) May, p. 587
- 16) S. EKETORP: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 3156
- 17) J. HARTWIG, D. NEUSCHUTZ and D. RADKE: Seminar on the Economic Problems Related to the Creation of Steel Plants Using Direct Reduction, Noordwijkerhout, Netherlands (1983) May
- 18) ANON: Steel Times International (1984) June, p. 41
- 19) H.-G. BRAUN and W. MATHEWS: Iron Steel Eng. (1984) Aug., p. 41
- 20) E. OTTENSCHLAGER and W. L. KEPPLINGER: SEAISI Conference, Manila (1985) Sep.
- 21) 鉄鋼界 (1983) 4, p. 54
- 22) 樋谷暢男, 浜田尚夫, 稲谷稔宏: 鉄鋼界 (1983) 6, p. 46
- 23) E. BENGSSON and B. WIDELL: Iron Steelmaker (1981) Oct., p. 30
- 24) H. G. HERLITZ and S. O. SANTEN: Iron Steel Eng. (1985) Aug., p. 64
- 25) S. SANTEN, J. SKOGBERG, S. ERIKSSON and B. JOHANSSON: AISE Annual Convention Pittsburgh (1985) Sep.
- 26) G. OMBERG, C. G. NILSSON and H. I. ELVANDER: Japan-Sweden Iron and Steel Seminar, Tokyo (1985) Apr.
- 27) T. HAMADA, T. INATANI, T. KOITABASHI and K. OKABE: SEAISI Quarterly, 8 (1979) Jan., p. 31
- 28) 高田至康, 浜田尚夫: 鉄と鋼, 72 (1986), S 119
- 29) 公開特許公報昭 59-222508 号