

© 1992 ISIJ

展 望

## 溶融還元製鉄法開発の現状

宮 崎 富 夫\*

## Current State of Iron Ore Smelting Reduction Technology

Tomio MIYAZAKI

## 1. 緒 言

21世紀の製鉄法としてなぜ溶融還元法が世界的に注目されているのか、いくつかの断面から観察してみる。鉄鋼業界の問題意識調査<sup>1)</sup>にもはっきりと表れており、社会環境問題として第1点は地球温暖化に係わるCO<sub>2</sub>排出量低減の要求が全世界的に拡がってきたことである。第2点目は労働問題であり、コークス炉建造職人の不足及び不定期雇用などへの対応である。他方21世紀の鉄鋼業を取り巻く技術環境としては、情報分野の発達はもちろんのこと知能センサー、知能ロボットなどの先端技術の発達とともに耐火物の長寿命化など基礎的な発達も予測されている。また需要構造は多様化の方向に向かい生産体制もこれに追従しよう。このような社会環境に対応する製鉄プロセス像として、溶融還元法の進出、スクラップ原料の増加及び連続鑄造の多様化などが上げられている。

現状の高炉法は数百年の歴史を有し、先人達の知恵の結集であり、極めて高度に発達したプロセスであることは誰しも異論のないところであろう。この高度に発達した高炉法の中身を分解してみると、高炉本体の高度化はもちろんのこと、周辺技術である焼結鉱およびコークスの品質向上に大きく依存している。すなわち現在の高炉は発達した焼結機とコークス炉とに支えられて巨体を維持しているわけである<sup>2)</sup>。しかしながらコークス炉の寿命が補修技術の向上およびPCI技術の普及で負荷が軽減され、大幅に延長されているとは言うものの、10年先にはコークス不足が予想されている<sup>3)</sup>。今この問題を放置することはできない。このような高炉の問題点および社会環境から、これらの問題に対して解決の可能性を持った溶融還元の技術開発は歴史的必然と考えることができる。

## 2. 溶融還元法および非高炉法の開発の歴史

はじめに溶融還元法の定義について考えてみたい。鉄鉱石を溶融状態で直接還元反応によって金属鉄を得る方法を溶融還元法と言うが、高炉製鉄法が普及しすぎたあまり、高炉によらざる製鉄法を全て溶融還元法と言う傾向が強い。固体の鉄鉱石をCOおよびH<sub>2</sub>などの還元ガスで大半を還元し、これを溶解するとともに最終還元する(この部分は溶融還元と言える)COREX法<sup>4)5)</sup>やSC法<sup>6)</sup>などは厳密には溶融還元法ではなく非高炉法と言うべきである。しかしながら非高炉法の代表として溶融還元法が着目されている現在、慣例に従い非高炉法をも含めて溶融還元法として取り扱うこととする。

溶融還元法の歴史は古くシーメンス(平炉の発明者として有名)にまで遡る。先人達は直接溶鋼を製造する試みを多々繰返してきたが、溶銑を経由する間接製鋼法を凌駕できず、今日に至っている。しかしこれらの試みの着想と技術的破局の原因を列挙してみると、きわめて明確な技術の流れが浮き上がってくる。

Linde法によって安価に大量の酸素が得られるようになること、ロータリーキルンを使ったBasset法<sup>7)8)</sup>やDored法などが出現し、溶融還元法(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(l) + 3C(s) = 2Fe(l) + 3CO(g)↑)によって生じたCOをCO<sub>2</sub>にまで炉内で燃焼させ良好な熱伝達を達成した。しかし耐火物温度は1400°Cから1800°Cを炉の回転とともに繰返すため損耗が激しく、大きな発展はできなかった。しかしこの時点で二次燃焼の考え方は既に芽ばえている。耐火物損耗対策として取られた手段が高速回転法(CIP法)<sup>7)</sup>であるが、炉体振動という新しい問題に遭遇した。次にCyclo-Steel法<sup>7)</sup>にみられるように、炉は固定して内容物を回転させ高温への滞留時間を延ばすフラッシュメルティングが考えられた。ここでは多量の天然ガスと酸素を必要としたことと粉状物質の付着が関

平成3年10月31日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Oct. 31, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)(依頼展望)

\* (社)日本鉄鋼連盟溶融還元研究開発委員会技術室長 工博(R & D Task Force, JISF DIOS Process, The Japan Iron & Steel Federation, 8F Kudan Plaza Building 2-2-3 Kudanminami Chiyoda-ku, Tokyo 102)

Key words: smelting reduction technology; DIOS process; COREX process; HI-Smelt; AISI direct steelmaking program; DIOS pilot plant; iron bath smelter; circulating fluidized bed; bubbling fluidized bed.

題となった。すなわち高温ガスから鉱石への伝熱不良およびこれを補うため多量のガスを使用することによって生じる粉化現象が新しい問題点として顕在化してきた。Eketorp & Vallack 法<sup>8)</sup>においては、直接還元反応（溶融還元反応とも言う）に伴う吸熱量を補う技術に問題があった。転炉の側壁から石炭・鉱石およびフラックスを酸素とともに吹込む RIT-Injection 法およびこの時の吸熱補給に電磁誘導を使う Udakon 法などを鉄浴法の発想と熱供給法に浴攪拌の工夫がみられる。これら初期の溶融還元法の多くは予備還元工程なしの一段階で反応を完了しようとする方法であるが、反応吸熱の熱補給および FeO による耐火物の損傷などの問題をクリアできなかった。その後還元反応によって生じた CO ガスを利用して予備還元し、これらの問題点を軽減しようとする二段階還元法が主役となってくる。

Elred<sup>9)</sup>, Plasma Smelt<sup>10)</sup>, COREX<sup>4)</sup>などがその代表である。我が国においても SC 法<sup>5)</sup>, XR 法<sup>11)</sup>などが実験された。これらのうち一部のものは非鉄製錬に適用されているものもあるし、鉄製錬法として工業規模にまでスケールアップされた COREX の例もある。しかしその多くは鉱石および石炭の事前処理なしには使用できないという欠点(?)を持っているため、次の段階の鉄浴法へと進んでいった。日本の DIOS 法<sup>12)</sup> (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process), 米国の AISI による Direct Steelmaking 法<sup>13)</sup>, ドイツではクレックナーの HI-Smelt 法<sup>14)15)</sup>などが鉄浴法の主なものである。これらはいずれも溶鉄中 C による溶融還元反応は桁はずれに速い<sup>16)</sup>ことに着目したプロセスであり、溶融還元反応によって発生する CO ガスを炉内で燃焼させて、その時発生する熱を鉱石の溶解と還元反応に利用した後シャフト炉または流動層に導入して、その顕熱と残された還元ポテンシャルを活用しようとするものである。

溶融還元技術開発の現状は一言で言えば、COREX 法

をはじめとした炭材充填層溶融還元炉とシャフト炉予備還元炉とを組合せた方法が実用化段階に入りつつあり、鉄浴溶融還元炉と流動層予備還元炉とを組合せた方法が開発段階にあるといえる。

### 3. 溶融還元法研究開発の現状

現在世界各国で行われている溶融還元法研究開発の現状を概観してみる。詳細については多くの紹介論文があるのでこれに委ねるとして、ここでは各プロセスの開発経緯と特徴を明確にすることに主眼を置いた。

#### 3.1 COREX 法<sup>4)5)</sup> (旧KR法)<sup>17)</sup>: (独・南ア)

##### 3.1.1 開発経緯

1981~1987 年の間 Korf Engineering は Kehl に 6 万 t/年規模のパイロットプラントを建設し、開発試験を行った。最長 1340 H の運転実績を得て開発を完成した。米国エネルギー省 (DOE) と鉄鋼協会 (AISI) は 1984 年にミネソタ鉱石の使用試験を 14 日間行い、石炭比 1060 kg/thm を記録した。その後本技術の権利は Voest Alpine に引継がれた。1985 年 4 月南アフリカ連邦の ISCOR の Pretoria 工場では良質の原料炭の不足およびコークス炉老朽化対策として 30 万 t/年のプラント建設を契約した<sup>4)5)</sup>。このプラントは世界初の実用化規模溶融還元法で、1987 年 12 月に立上げたが、1 週間で鉄皮溶損、1988 年 8 月再立上げしたが生産性が悪く、Sponge Iron 600 t を使って操業を回復させた。10 月には再び鉱石に切替えたが 20~35 t/H に留まった。1989 年 2 月まで継続運転したが、ダストリサイクル系設備のトラブルにより操業を停止した。1989 年 11 月まで改造が行われ、再稼働し 4 週間で公称能力を達成した。以後 90% の稼働率で順調な操業を行っている。1989 年 12 月には ISCOR への設備移管が行われた。1991 年 7 月時点での情報では、生産性 46 t/H で設計値に対して 15% 増、燃料比 10% 減、累計生産量 50 万 t を達成し

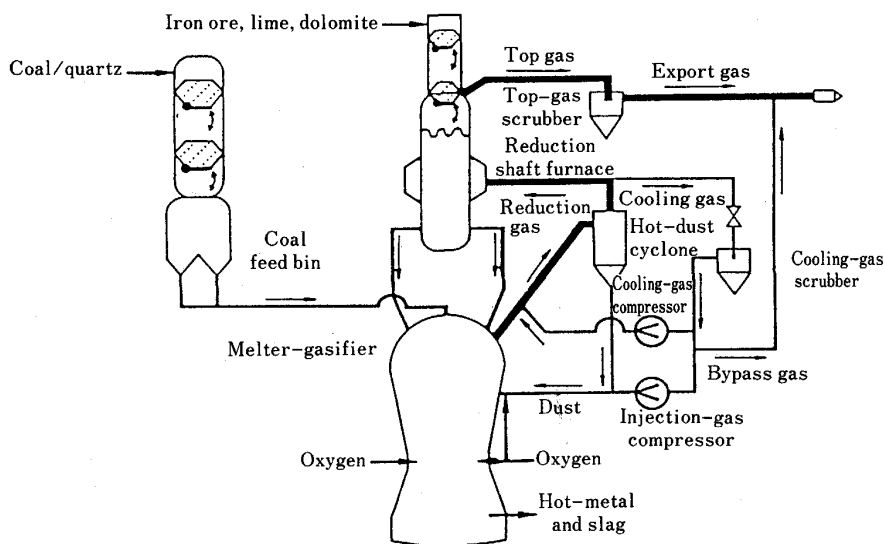


Fig. 1. Flowsheet of the COREX process.

た。この成功により多くのプラント商談が新聞紙上にをにぎわしている。例えば POSCO (韓) の 60 万 t/年 (1992 ~ 1994 年建設予定), Geneva Steel (米) の 77 万 t/年, LTV (米), BHP (豪) および ILVA (伊) などであり, 今後の動向が注目される。

### 3.1.2 プロセス構成と特徴

プロセス構成は Fig. 1<sup>17)</sup> に示す通り, シャフト予備還元炉と溶解ガス化炉とから成っている。したがって鉄鉱石は塊鉄石とペレットまたは焼結鉄などの塊成鉄を必要とするが, 石炭はコークス化を要せずコークス炉は省略できる。鉄石の還元反応の主体は予備還元炉で 90 ~ 95% まで負担し, 溶解ガス化炉は溶解と残された仕上還元を負担するのみで, 還元ガスの製造を主な機能としている。予備還元用シャフト炉は Midrex 炉の下部に鉄石排出用スクリーフィーダーを設置している。溶解ガス化炉は初期の特許では流動層となっているが, その後のものをみると羽口上下にわたって固定層を有する特許を申請している。実際に炉内がどのようなになっているかは不明であるが, 羽口付近には固定層を形成し冶金反応を促進しているものと考えられる。

スケールアップの様子をみると, 6 万 t/年 (Kehl のパイロットプラント) と 30 万 t/年 (ISCOR) との試験を終了し, 60 万 t/年の設計をすでに完了している。次は標準的な高炉と同一規模の 100 万 t/年の設計を考えている。

最近の ISCOR における操業成績の例を Table 1<sup>5)</sup> に示す。ISCOR では COREX 法による溶銑コストは高炉法より 25% 安いとし, 米国立地では 30% 安と予測している。

## 3.2 CBF (Converted Blast Furnace)<sup>18)</sup> : (英・蘭)

### 3.2.1 開発経緯

英国 BSC (現: BSPLC) の Teeside Labo. では, 1982 年に Twin-Chambered Melting Unit による溶融還元基礎研究を開始した。一方オランダの Hoogovens では 100 t 転炉を使ったスクラップの石炭による溶解試験を行っていたが 1986 年 7 月から両者が高炉法代替プロセスの共同研究に入った。本プロジェクトは ECSC お

よび EEC に支援されていたもので 1988 から 5 年間, 約 100 億円で Ijmuiden の No. 3 高炉 (1000 t/日) をデモンストレーションプラントに転換することを目標としている。BSC が主に理論計算を, Hoogovens が Engineering と経済分析を担当した。しかしその後の報告がなく詳細不明であるが, 現在高 PCI によるコークス炉負荷軽減を追求しており, CBF はその後の課題と位置付けている模様である。

### 3.2.2 プロセス構成と特徴

プロセス構成は Fig. 2<sup>18)</sup> に示す通りで, シャフト炉と双子の鉄浴とから成っている。鉄石の塊成化設備は現物のものが使用できることおよび技術的に確立しているシャフト炉を予備還元法として採用しているのが特徴であり, 還元と溶解の機能を明確に分離している。また休止中の高炉を改造して活用する点がユニークである。

## 3.3 HI-Smelt 法<sup>14)15)19)</sup> : (独・豪)

### 3.3.1 開発経緯

ドイツの Kloeckner 社とオーストラリアの CRA 社

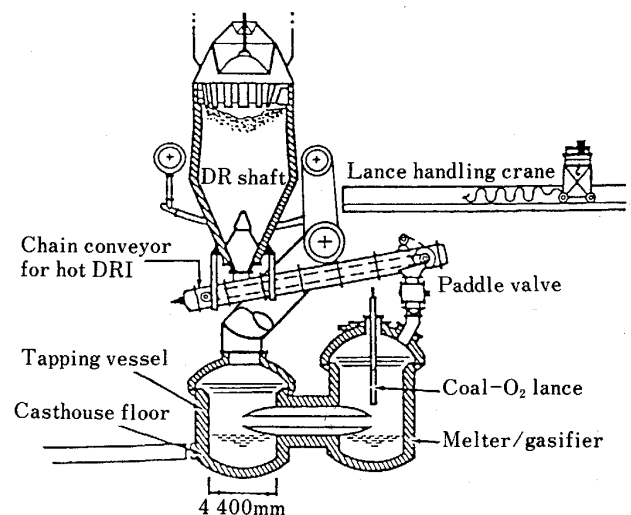


Fig. 2. Hoogovens No. 3 blast furnace conversion to CBF.

Table 1. Operation results of the Corex Plant at Iscor Pretoria Works.

Item		Design	Jan. 91	Feb. 91	Mar. 91	Apr. 91	May 91	June 91
Hot metal produced	t/month	25 000	26 345	24 847	23 189	29 417.8	29 354	29 261
Hot metal production rate	t/day	963	869.2	887.4	828.2	729.2	914.6	975.4
Hot metal analyses : C%		4.3	4	4.36	4.3	4.17	4.41	4.48
Si%		0.8	0.7	0.33	0.269	0.334	0.155	0.295
S%		0.07	0.13	0.046	0.062	0.059	0.071	0.053
P%		0.1	0.13	0.156	0.146	0.148	0.153	0.156
Hot metal temperature	°C	1470	1417	1461	1456	1449	1454	1477
Slag rate	t/thm	0.42	0.5	0.504	0.554	0.466	0.516	0.536
Consumption rates : Ore	kg/thm	1500	1401	1457.8	1496.3	1505.5	1517.3	1559.6
Coal	kg/thm	1200	1067.4	1133.2	1245.4	1262.8	1206.6	1242.3
Add's	kg/thm	340	417.6	483.7	498.4	498.3	471	501.8
Oxygen	Nm <sup>3</sup> /thm	670	754	616	752	694	653	696
Plant availability		85	89.68	90.63	89.72	83.90	94.31	94.29

Lumpy ore : Sishen, Thabazimbi  
High VM. coal : Delmas, Wolwekrans

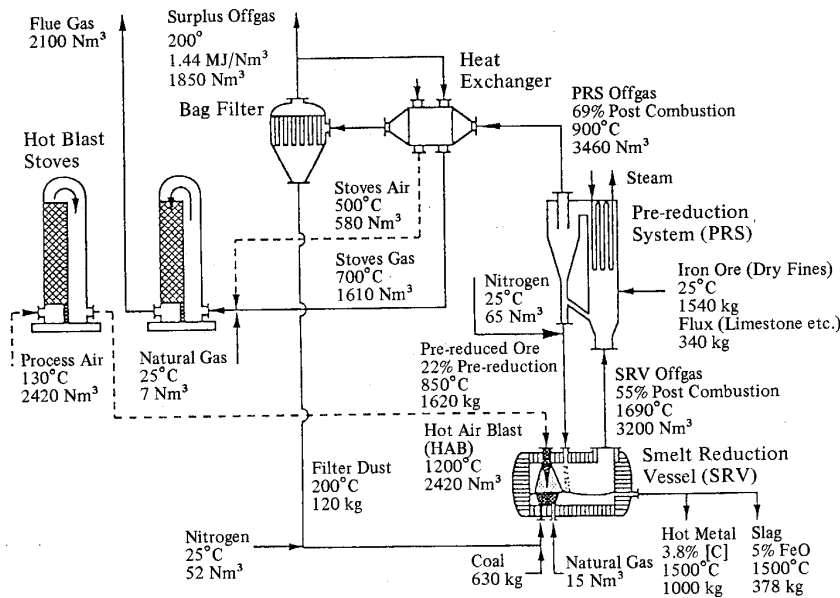


Fig. 3. Simplified HI-Smelt process flowsheet.

とが 1981 年から共同研究を始めた。Kloeckner 社の Maxhuetten 工場の 60 t 転炉を使用して、そのコンセプトを完成させた後、10 t 浴の SSPP (Small Scale Pilot Plant) を建設し実験した。1989 年には CRA 社と Midrex との対等出資の Joint Venture の HI-Smelt Corporation Pty. Limited を設立、次のステップの開発を推進した。また Davy McKee (Stokton) Limited はエンジニアリング参加に合意し、ライセンシーとなった。HI-Smelt Corporation はその後の 2 年間で 50 万 t/年の実用炉の開発を目標にした中間規模 (14 t/H ≒ 10 万 t/年) の研究開発設備 (HI-Smelt Research and Development Facility: HRDF) の建設と操業の案画を行ってきた。1989 年にはパースの南 40 km にある Kwinana に、約 1 億豪ドルを投じて、HRDF を建設する計画を発表している。これによると 1991 年に着工し 1993 年初めに完成予定となっている。

### 3.3.2 プロセス構成と特徴

プロセス構成は Fig. 3<sup>15)</sup> に示す通りで、鉄浴溶融還元炉と循環流動層予備還元炉との組合せによる。SSPP の能力は 10 t 浴、3 t/H であり、鉄浴炉形状は水平円筒状で水平軸中心に回転もできるし、軸を傾斜することもできる。シール性が良く加圧操業も可能である。二重管ノズルにより石炭・鉱石およびフラックスを底吹きできることを特徴としている。上吹きランスからは純酸素ではなく熱風を吹く点他の鉄浴法と異なっている。この理由は反応に関与しない N<sub>2</sub> を熱のキャリアーとして役立つとともに二次燃焼温度を極端に上昇させず、耐火物の損傷を防止できるとしている。予備還元炉は循環流動層で粉鉱石を Wustite までの低率還元し、サイクロンで回収後熱間で鉄浴中に吹込む。予備還元炉からの排ガスは空気の前熱用に使用される。

SSPP の操業結果を Fig. 4<sup>14)</sup> に示す。二次燃焼率

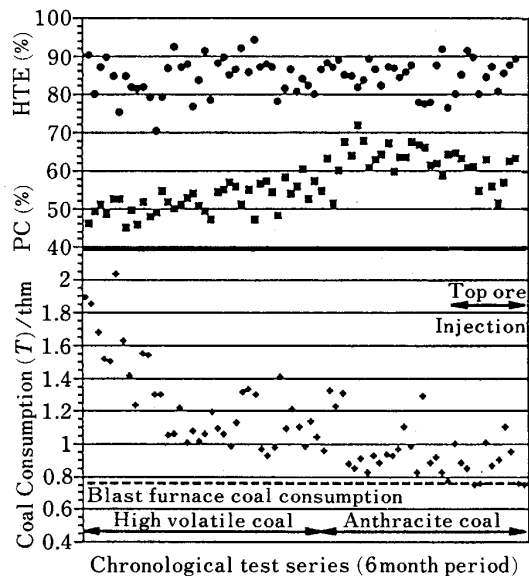


Fig. 4. HI-Smelt SSPP performance.

60%, 着熱効率 85% を達成した時の石炭原単位は高炉並に減少している。このことは小形試験炉で熱損失割合の大きいことおよび未還元鉱石を予熱なしで使用したことを考慮すると、極めて良好な成績と言える。この成績をベースとした実用機の諸元を Fig. 3 中に記入している。石炭原単位 630 kg/thm は驚異的である。

### 3.4 AISI Direct Steelmaking Program : (米)

#### 3.4.1 開発経緯

米国鉄鋼協会 (AISI) は、1987 年に日本・欧州およびカナダなどの溶融還元技術の調査を行った後、エネルギー省 (DOE) に対してパイロットプラント計画を提出し、3 年間、3100 万ドル (約 40 億円、政府補助率 77%) の認可を得た。その後 1991 年に予備還元炉建設用として 1500 万ドルの追加と 1 年間延期の認可を得

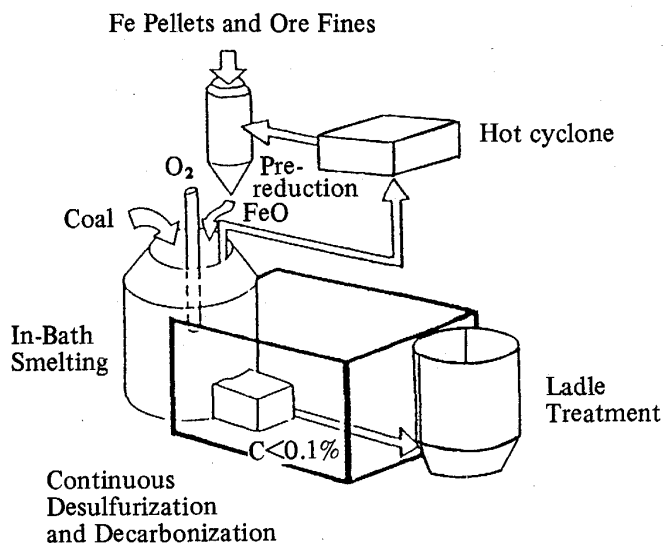


Fig. 5. The AISI Direct steelmaking.

た。パイロットプラントはピッツバーグ市 USS 社ユニバーサル地区に 1990 年 5 月に完成、最初は予備還元炉なしの縦型鉄浴炉のみで試験をした。その後横型の Two-zone Countercurrent Smelter に改造し、能力を 5 t/H (15 t 浴炉) から倍増するとともに、予備還元用シャフト炉をメキシコの Hylsa の技術支援で増設する計画である。Two-zone Countercurrent Smelter は 1991 年 9 月に完成の予定となっており、直接溶鋼を 1 つの炉で製造する様である。この試験は 1993 年 3 月に完了の予定で、その後年産 35 万 t のデモンストレーションプラント兼実用炉を建設予定<sup>20)</sup>とのことである。

#### 3.4.2 プロセス構成と特徴

プロセス構成は Fig. 5<sup>13)</sup>の通りである。鉄浴溶融還元炉から出る銑鉄中 C は 0.1% 以下とし、取鍋処理のみで直接鋼を造ることを最終目標としている。原料は当面既存設備が使用可能なペレットであり、長期的には粉鉱石の直接使用を目標としている。また米国ではスクラップのリサイクル使用が重要な課題であり、種々の形状・タイプの異なるスクラップの使用を可能にするような炉形状を考慮している。予備還元率は Wustite までの約 30% 以下としている。鉄浴溶融還元炉の目標操業諸元は二次燃焼率 50%、着熱効率 85%、生産性 15 thm/D/m<sup>3</sup>などをターゲットにしている。目標達成時のメリットとしてランニングコスト 10~25 ドル/thm の削減、建設費 25% (最大) の削減および改修費 3 分の 1 を上げていく。当然コークス炉が省略できるので環境改善にも役立つ。

縦型パイロットプラント (5 t/H) での試験は 1991 年 4 月 1 日現在で、2~12 H/Run を 26 回行っている。4.2 thm/H の主産性の実績をえている。この試験と平行して Dofasco (加) の 300 t 上底吹き転炉で熱移動の試験が行われた。予備還元鉱石 (ウスタイトペレット) は

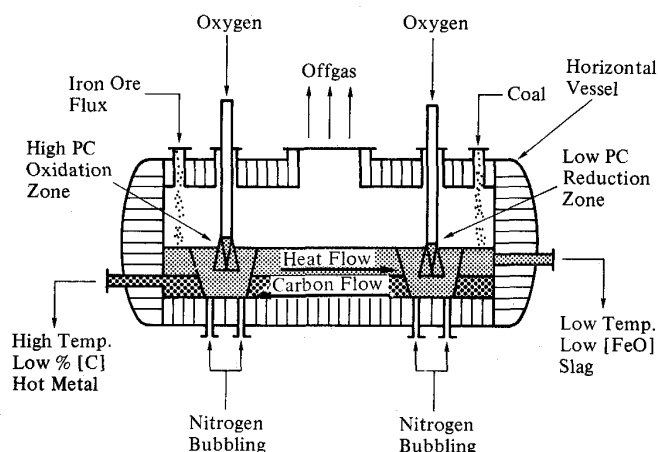


Fig. 6. Conceptual two stage countercurrent process of AISI.

Hylsa, Monterrey 工場で約 500 t 作り、パイロット試験に供した。これら一連の試験結果から次の操業諸元を予測し、北米においてはコスト的に有望であるとしている。

石炭原単位 (kg/thm)	706
酸素 (Nm <sup>3</sup> /thm)	477
二次燃焼率 (%)	40
副生ガス (BTU/SCF)	155 (1 407 kcal/Nm <sup>3</sup> )
(MMBTU/NTHM)	6.47 (1 630 Mcal/thm)

最近 HI-Smelt から発表された Two-zone Countercurrent Smelter の概念図を Fig. 6<sup>5)</sup>に示す。溶銑目標成分は 0.5~1.0% C, 0.1~0.3% S で特殊取鍋処理で鋼にする予定である。この % C 値は所期の値 0.1% と異なる。このことは何を意味しているのか。いずれにしても人類の長年の夢であった直接製鋼が可能になるのか今後の動向が注目される。

#### 3.5 その他の溶融還元法

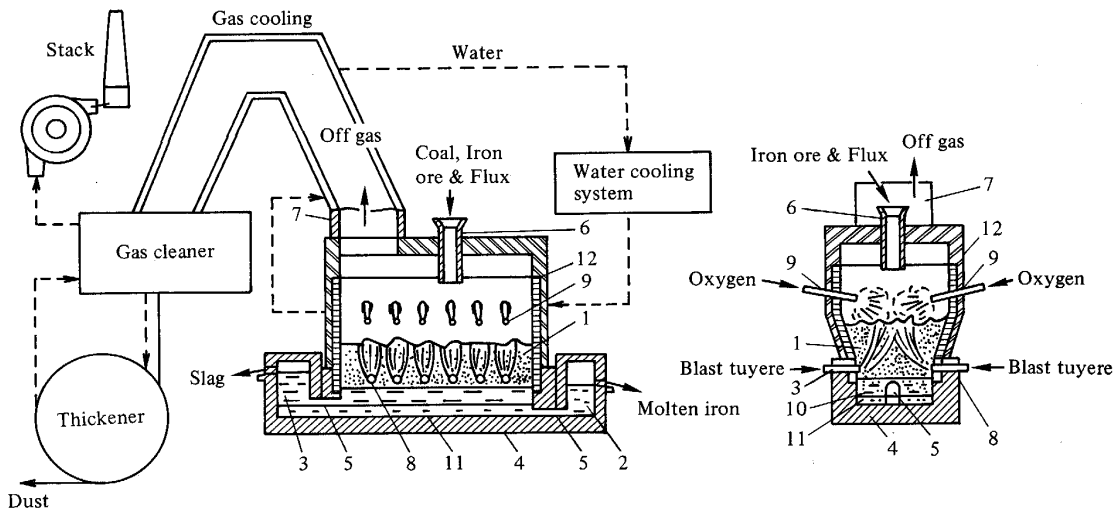
##### 3.5.1 ソ連の溶融還元法<sup>21)</sup> (ノボリペック製鉄所)

1985 年ノボリペック製鉄所でパイロットプラント試験を行い、24 ヒート、15 000 t の溶銑を精錬し、技術的に完成したと判断し 1990 年から西側諸国に積極的に紹介された。しかしその後の政変により状況は不明となっている。

プロセスの構成は Fig. 7 に示す通り、予備還元炉がなく、矩形断面の溶融還元炉のみである。送風用羽口はスラグ中に、二次燃焼用酸素ランスはスラグ上の空間部へ吹き込めるよう炉の長手方向に複数個配置されている。炉体は水冷ジャケットを設置している。銑・滓は別方向に連続的に排出される。

パイロットプラントの操業諸元例と実機設計諸元例を下記に示す。

パイロットプラントの操業諸元例			
[転炉スライム (Fe 52%) 使用時]			
二次燃焼率 (%)	55	71	93



1: Foamed slag 2: Hot metal siphon 3: Hot slag siphon  
 4: Furnace bottom 5: Over flow 6: Charging hopper  
 7: Off gas duct 8: Lower tuyeres for bubbling  
 9: Upper tuyeres for post combustion  
 10: Stable slag layer 11: Metal layer 12: Outlet of cooling water  
 Fig. 7. Smelting reduction furnace in U.S.S.R..

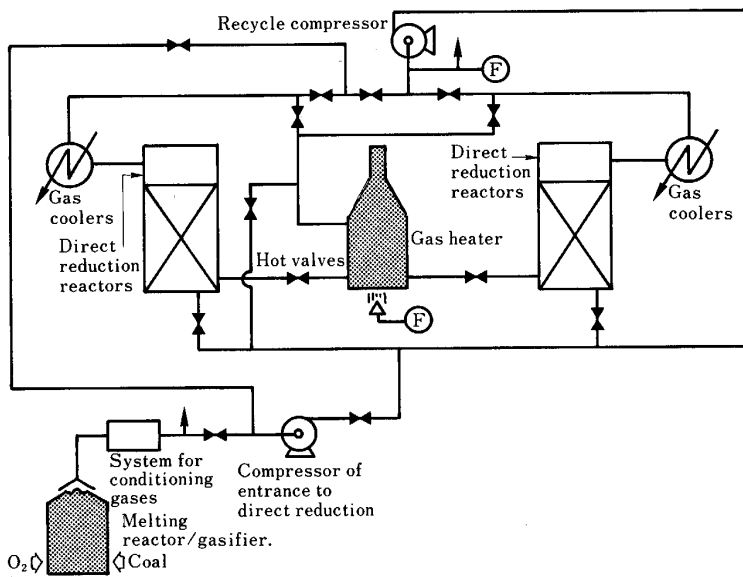


Fig. 8. Flow diagram of IMIS process.

生産性 (thm/H)	15.0	30.0	45.0
(thm/m <sup>3</sup> ・日)	2.6	5.1	7.7
転炉スライム (kg/thm)	1970	1960	1940
石炭 (kg/thm)	1050	710	600
酸素 (Nm <sup>3</sup> /thm)	933	765	708
空気 (Nm <sup>3</sup> /thm)	314	153	99
スラグ (kg/thm)	490	460	440
ダスト (kg/thm)	110	100	90

溶銑成分: 4.0~4.8% C, 0.01~0.10% Si  
 0.05~0.15% Mn, 0.025~0.060% S  
 0.05~0.12% P

実機溶融還元炉設計諸元例 (二次燃焼率 2~96%)

生産速度: 4~40 thm/H

炉の寸法: 炉の全長 8 m

溶解部.....幅 2.5 m, 高 2.0 m

シャフト.....幅 4.0 m, 高 4.0 m

冷却部抜熱量: 50~300 Mcal/m<sup>2</sup>・H

(3ヶ月間連続運転可能)

3・5・2 メキシコの溶融還元法<sup>22)</sup> (IMIS 法)

1986年11月から転炉型の6t溶融還元炉単独のパイロット試験を開始した。メキシコでは粘結炭を産しないこと、直接還元は天然ガスを大量に必要とすること、発電は燃料の直接利用と比較すると利用効率が低いことおよび高炉法は膨大な設備費を要することなどの理由から石炭直接利用による鋼製造プロセスの開発を行っている

Table 2. Futures of coal based smelting reduction processes.

Process	DIOS	COREX	CBF	HI-Smelt	AISI	U. S. S. R.	IMIS
Pre-reduction furnace type (Temp./PRD)	Circulating fluidized bed/ bubbling F. B. (800°C/20~40%)	Midrex type shaft (>750°C/ 85~95% Met.)	Shaft (Modified BF) (>750°C/ 85~95% Met.)	Circulating fluidized bed (>800°C/ <30% PRD)	HyL type shaft (>800°C/ <30% PRD)	—	Two fixed bed shaft (—/84% PRD)
Smelting reduction furnace type (Post combustion)	Iron bath smelter (40~60%) Gas reforming with addition of coal	Char fixed bed or fluidized bed (<10%)	Twin bath smelter (<10%)	Iron bath smelter (>45%) Hot air blast	Counter current iron bath smelter (>40%)	Iron bath smelter (2~96%)	Converter
Iron ore (Coal)	Fines and granular Non-coking coal, Lumpy/fine coals	Lumpy ore, sinter ore, Pellets Anthracite, Bituminous coal, Lumpy/not fine coal	Lumpy, Sinter, Pellets Non-coking coal, Lumpy/fine coals	Fines Non-coking coal Fine coal	Pellets, Scrap Non-coking coal	Fines Non-coking coal	Lumpy, Sinter, Pellets Non-coking coal

る。

プロセスの構成は Fig. 8 の通りで、1基の多目的転炉と交互にバッチ使用できる2基の固定層式予備還元炉とから成っている。操業の方法は特異で、溶銑を種湯として装入した後スポンジ鉄を10~15%相当量一括投入して酸素のみを吹き溶解と脱炭を行う。その後は溶銑の炭素濃度に応じて、C2~4%の時は酸化操業を、C2%以下の時は還元操業を行い、これを10~15分サイクルで数回繰返して所定量の溶銑を作り溜めしたら、出銑滓孔を別々に開けレードルに移す。還元操業時は酸素と同時に石炭を吹込み、浸炭を促進するとともにCO、H<sub>2</sub>の高い還元ガスを製造して予備還元炉へ送る。

パイロットプラントの操業結果の一例を下記に示す。

	Test A	Test B	Most recent IMIS modified process trial
Final carbon (%)	2.12	1.27	0.024
Final temp. (°C)	1456	1523	1592
Initial charge (t)	7.0	6.3	6.2

最近の操業結果では直接鋼ができた模様である。全体的に不祥な点が多いが地域条件に適合した特異なプロセスとして注目される。

3.5.3 スウェーデン、韓国、中国などの溶融還元法

スウェーデンにおいてはすでに ELRED<sup>9)</sup>、INRED<sup>8)</sup> および Plasma Smelt<sup>10)</sup>法などが開発され、多くの報告が出ているが、鉄への応用で実用化はしていない。韓国では POSCO 法を国家プロジェクトとして1990年から引継いだ模様である。循環流動層予備還元炉と炭材流動層溶融還元炉との組合せであり、予備還元鉱石は羽口吹込み、規模は50t/Dとのことである。中国でも基礎研究段階ではあるが鉄浴式溶融還元と違った形式のものを計画しているとのことである。

以上各国の開発状況を述べてきたが、特徴の比較を Table 2 に、開発時期と計画を Fig. 9 に示す。

#### 4. DIOS 法の基礎研究成果とパイロットプラント<sup>12)</sup>計画

日本鉄鋼連盟では、1988年4月から「石炭直接利用製鉄法(DIOS)」の研究を通産省の石炭利用技術振興補助金を受け、高炉メーカー8社の参加のもとに石炭技術研究所(現:石炭利用総合センターに一部組織変更)との共同研究を行っている。このプロセスは高炉法におけるコークス炉の老朽化対策として、石炭を直接使用することを前提としている。鉄鉱石は塊成化した原料の使用を前提条件としたシャフト炉(充填層)が効率の面からは流動層より優れることは明白であるが、この技術はすでに確立しているとの判断から、敢えて予備還元炉(PRFと略記)は粉鉱石を加工なしで使用可能な流動層とした。溶融還元炉(SRFと略記)は粉状の予備還元鉱石および石炭を直接使用することの出来る鉄浴法とした。またSRFから発生する排ガス温度は約1600°CとPRFの適正温度と考えられる800~900°Cより高いので、この差に相当するガス顕熱を利用して石炭中のV.M.でガスの改質を行う部分(GRFと略記)を組込むこととした。

##### 4.1 システム検討

システム検討は、物質および熱バランスを計算する数式モデルで行った。結果を Fig. 10 に示す。低燃料比(800kg-coal/thm)で操業可能な範囲を1段法(SRFのみ)、2段法(SRF+PRF)および3段法(SRF+PRF+GRF)について示した。1段法では二次燃焼率[Post Combustion Ratio: PCと略記、PC=(CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O)/(CO<sub>2</sub>+CO+H<sub>2</sub>O+H<sub>2</sub>)]を55%以上にした時のみ成立するが、発熱を効率よく還元反応に利用できる方策が見つからない限り、いたずらに耐火物を溶損するのみの結果となる。2.3段法においてはPCで5~

Process name (Nation)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
① DIOS (Japan)	Element study (5~100t)			Pilot plant study 500 t/D			
② AISI (U.S.A)	'88/Dec.		'90/June 5t/H-PP study start			350,000 t/y Demonstration plant	
③ CBF (UK, Netherland)	'88 ~ '93: Modified Ijmuiden No. 3BF (100 t/D)						
④ HI-Smelt (Australia)	'84 ~ '90 3t/H-SSPP			'91 ~ '92 100 kt/Y-PP		'93 ~ Test operation (Kwinana)	
⑤ POSCO (Korea)	POSCO's Project '90/1			National Project			
⑥ U.S.S.R.	'85 ~ PP study		'90				
⑦ COREX (Germany, South Africa)	'87 Start		'89 ISCOR (40 t/H, 300 Kt/Y)				

Fig. 9. Schedules of R & D on smelting reduction process.

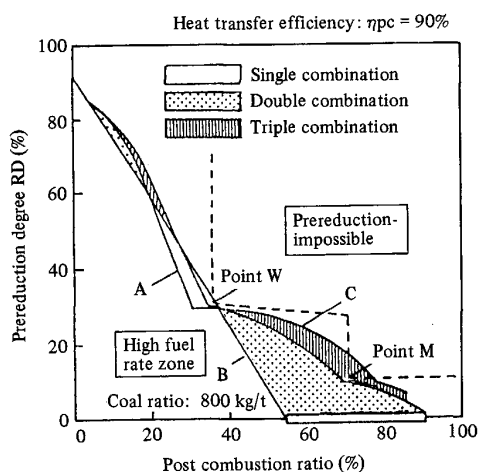


Fig. 10. Range for smelting reduction process to operate with low fuel rate (800 kg/ton or less).

25% の領域と 35% 以上の領域とで成立することになるが、前者においては非常に高い効率の予備還元が達成された時のみに成立する。後述する要素研究結果から判断すると PC 40~60% の領域が有望と言えそうである。

4.2 要素研究結果

要素研究成果を各技術課題ごとにまとめて以下に記す。

4.2.1 鉄浴溶融還元技術

(1) 高二次燃焼率と高着熱効率の同時達成技術

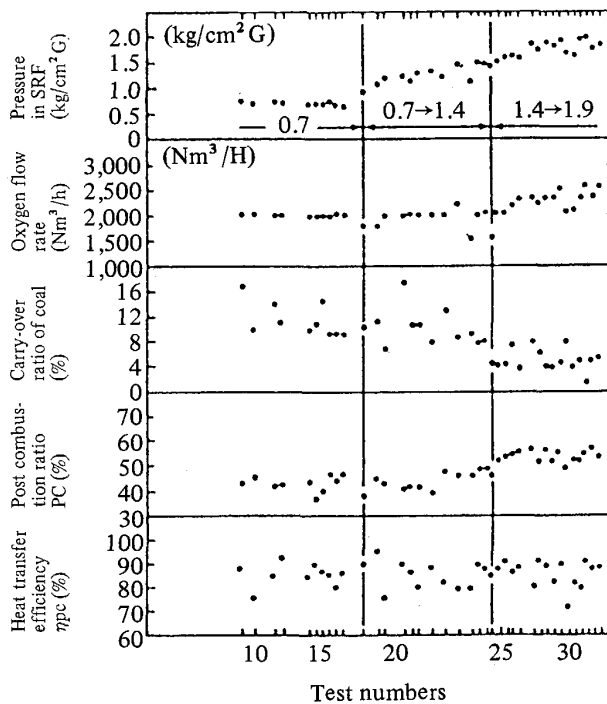


Fig. 11. Effect of pressurization on improved post combustion efficiency.

NKK, 福山では 5t 浴の SRF とバブリング流動層 PRF の上一貫装置を、圧力 2 kg/cm<sup>2</sup>・G 未満の加圧可能なものに改造し Fig. 11 の結果を得た。加圧するこ



とによりガス速度が低下し石炭歩留が向上するとともに二次燃焼率および着熱効率 [Heat transfer efficiency:  $\eta_{pc}$  と略記,  $\eta_{pc} = 1 - (\text{排ガス保有熱量のスーパーヒート量}) / (\text{二次燃焼によって発生した熱量})$  が向上することを確認した. 住友金属・鹿島では横吹き羽口によるスラグ浴の攪拌強化により PC と  $\eta_{pc}$  とが同時に向上する効果を Fig. 12 の通り確認している. 新日本製鉄・堺では SRF のスケールアップに伴う問題点の摘出と対策を主課題にして生鉱石による SRF 単独実験を行った. 大型化することにより PC の大幅な低下が懸念されたが, PC および  $\eta_{pc}$  ともに低下することなく操業可能な見通しを得た.

(2) 連続操業技術

鉄浴炉は転炉技術をベースにしているためバッチ操業が本来の姿である. 一方予備還元流動層は連続操業に適した装置である. この両者を直接連結するため, NKK・

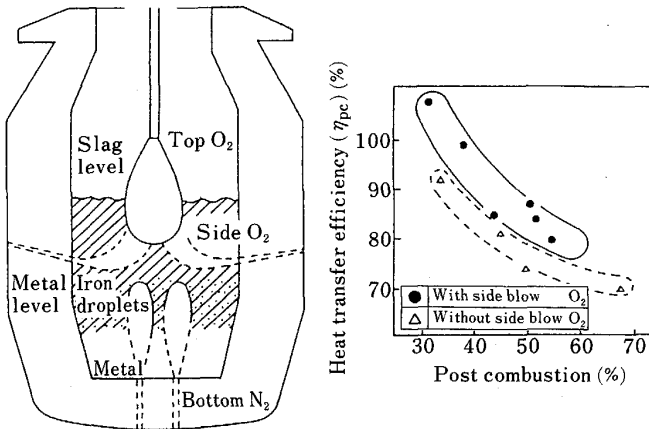


Fig. 12. Effect of side blow on improved post combustion and heat transfer efficiency.

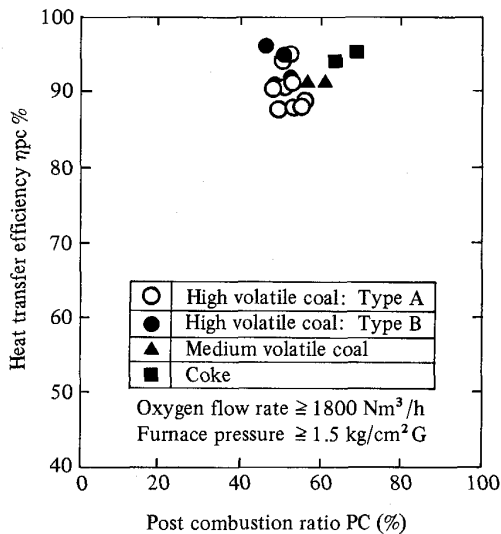


Fig. 13. Effect of coal-contained volatile matter on post combustion ratio and heat transfer efficiency.

福山ではマッドガンオープナー方式による出鉄・滓試験を加圧下の一貫操業中に実施した. 次回の操業に必要なスラグと溶銑を炉内に残して出鉄・滓を行う方法を確立し連続操業の目処を得た.

(3) 一般炭使用技術

Fig. 13 は炭材中の揮発分 (V. M.) の PC および  $\eta_{pc}$  への影響を示したものである. 高 V. M. 炭でも高 PC・高  $\eta_{pc}$  ( $\geq 86\%$ ) が確保できており, 現在使用対象と考えている程度の高 V. M. 炭は十分使用できる見通しを得た.

(4) 耐火物損耗と炉体冷却技術

二次燃焼による高温ガス (1600~1800°C) およびスラグ中 FeO (5~10%) のため耐火物の損耗が大きく実用上問題であることが次第に明白となってきた. この対策として, レンガの中を貫通した細いパイプに N<sub>2</sub> ガスを流しレンガ自身の温度を下げて, 損耗量を数分の 1 にまで減少させることができた. しかしながら全面に採用した場合, 大量の N<sub>2</sub> を必要とし, 部分使用に留めるべきであるとの結論に達した. 引続き水冷パネルを耐火物替わりに使用する試験を大型炉の一部に張ってテストした. 結果は極めて良好なものであったが, 当然のことながら熱損失の増大は避けられなかった. 今後の重要課題である.

4.2.2 流動層予備還元技術

川崎製鉄・千葉の炭材流動層溶融還元の上部に設置した循環流動層と NKK・福山の鉄浴溶融還元炉の上にある気泡流動層と並行試験した. ガス発生炉である下部炉の特性から前者では主に低酸化度域, 後者では高酸化度域の試験が行われた. 結果を Fig. 14 に示す. 還元率はシャフト炉には及ばないが, 流動層ラボテストの結果と近い値を示している. 低還元率のため懸念されていたスティッキング現象は見られなかった.

還元ガスには 50~100 g/Nm<sup>3</sup> 程度のダストが含まれ

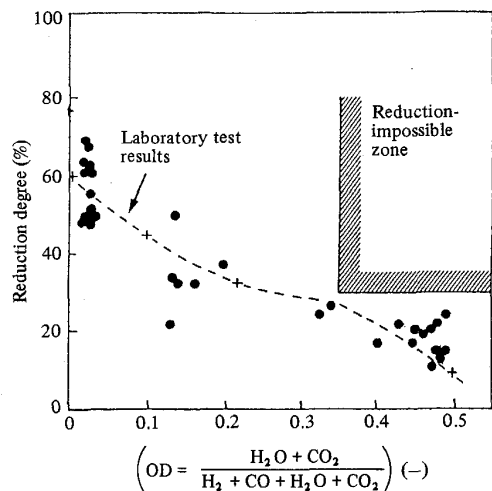


Fig. 14. Effect of degree of gas oxidation on pre-reduction degree.

ているので、ガス導入部にはダストによる詰まり対策が必要であった。千葉では操業中に清掃可能な可動ロスト方式を、福山では水冷プレート型分散板を試験し、有効なことを確認した。

一連の要素研究の中でラボテスト結果からの予想と最も異なった現象が見られたのは、鉱石の粉化挙動の差であった。Fig. 15 は粉化状況を示したものであるが、初期粒径の数分の1まで粉化していることがわかる。この

激しい粉化の原因は熱割れおよび還元粉化現象によるものであるが、流動化により鉱石相互に強い衝突力が付加したため、さらに助長されたものと思われる。流動層の微粒子回収装置は、一般にはサイクロンによるが、サイクロンの一般的性能として0.01 mm以下の粒子は捕集できないといわれているので、この分系外に飛散し、歩留まり低下につながる。また仮に捕集性能のよい集塵性能の良い集塵機を採用したとしても、SRFへの投入時

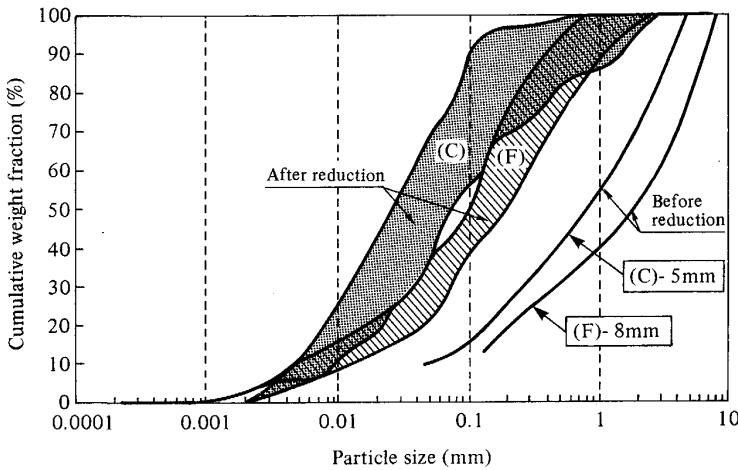


Fig. 15. Size distribution of iron ore before and after prereduction.

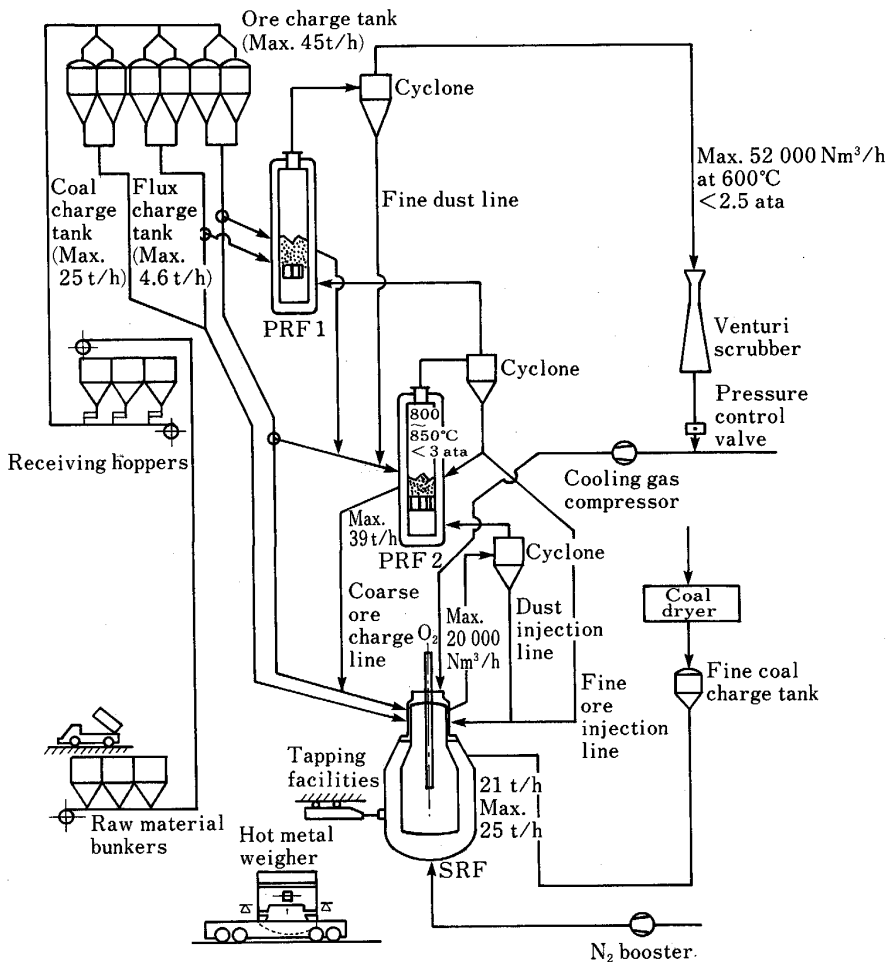


Fig. 16. Process flow of the DIOS pilot plant.

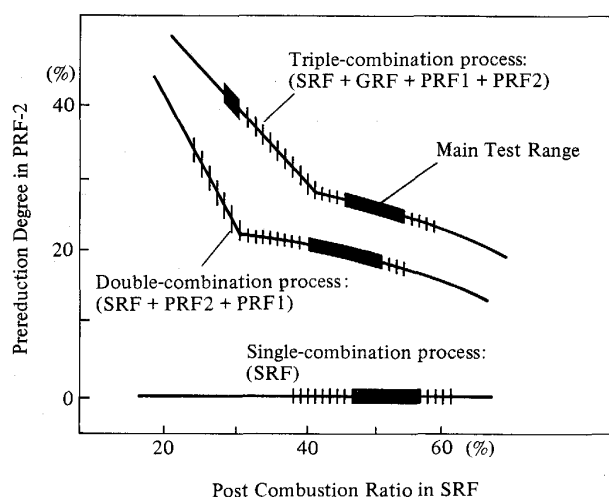


Fig. 17. Testing ranges to be performed by the DIOS pilot plant.

に再度飛散し還元ガスを汚し、PRF 分散板の目詰まりの原因となることも考えられる。

#### 4・2・3 石炭添加ガス改質技術

SRF 排ガス中に石炭粉を添加し、その V. M. と  $\text{CO}_2$  および  $\text{H}_2\text{O}$  とを反応させて、ガスの改質、石炭の乾留およびガス温度低下を図ろうとするものであり、DIOS 法特有の技術である。神戸製鋼・神戸ではプラズマヒーターでガスを加熱する方式で基礎試験を行った。短時間でガス改質反応が起こること、必要石炭粒度、生成チャーの性状および残留タールなどに対する多くの知見を得た。更にパイロットプラントに組み込み耐火物溶損対策としての効果を確認する予定である。

#### 4・2・4 要素研究のまとめと今後の課題

1988 年から 3 年間行われた要素研究は順調に推移し、得られた成果は全てパイロットプラント設計に反映させるべく準備中であるが、幾つかの課題も残している。その 1 つは、熱損失の大幅な増加なしに炉寿命を長期に保つことのできる炉体構造の開発である。2 つめの課題は SRF から排出される高温ガスの顕熱の回収利用に係る技術で、SRF と PRF を直結するダクト設計に関するものである。SRF 排ガス顕熱をガス改質熱として利用するか、水蒸気として回収し発電に供するかした後、PRF の適正な層内温度 ( $800\sim 850^\circ\text{C}$ ) を得るシステムをいかに無駄なく構築するかであり、本プロセスの中心課題と考えることもできる。

#### 4・3 パイロットプラント計画

1993 年 9 月完成目標に現在パイロットプラントの設計建設が進められているが、その設備フローを Fig. 16 に、試験範囲を Fig. 17 に示す。試験運転は 1995 年 3 月まで行われることになっており、その結果を待って実機のフィージビリティスタディーと概念設計を行う予定である。

## 5. 結 言

溶融還元技術の開発の歴史と現状および DIOS の将来計画を展望した。原料資源やエネルギーの制約から解放されるとともに地球環境の改善に寄与でき、生産弾力性を持った溶融還元法の技術開発は、21 世紀の製鉄業にとって何よりも重要な課題である。

DIOS 法においては、コークスの排除を主眼にしているものの、鉍石の事前処理工程をも同時になくそうとしているため、流動層により酸化度の高い不良還元ガスで良好な還元反応を達成しようとする困難な課題を抱えている。しかしシステム全体としてみた時、低還元率で良しとしている点、大いに期待できる。鉄浴溶融還元炉においては高 PC および高  $\eta_{pc}$  の同時安定達成の条件把握および石炭添加ガス改質のエンジニアリングになお課題を残すが、今後の進展に全世界が注目している。

AISI の Direct Steelmaking Program では、永年の夢である直接製鋼が達成できる日も近い様に思える。また各国が自国の周辺状況に応じて新しいプロセスに挑戦していることは、何よりも必強い。このような状況において DIOS 法が世界に貢献できる日の来ることを期待したい。

## 文 献

- 1) 中島一郎: 第 135 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1990), p. 13
- 2) 徳田昌則: 金属, 1 (1991), p. 8
- 3) 渋谷梯二: 鉄鋼界, 40 (1990) 11, p. 41
- 4) J. L. Nel, B. J. Van Der Merwe, Am Morrison, R. Hank and P. Nalepka: Ironmaking Conference Proceedings AIME (1991), p. 625
- 5) H. M. W. Delpont: II nd European Ironmaking Congress Proceedings by the Institute of Metals (1991), p. 289
- 6) M. Hatano, T. Miyazaki, H. Yamaoka and Y. Kamei: Proc. the 5th IISC at Washington DC (1986)
- 7) 中村正和, 徳永直樹: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 480
- 8) 浜田尚夫: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 1992
- 9) E. Bengtsson and B. Widell: Iron Steelmaker (1981) 10, p. 30
- 10) S. Santen, J. Skogberg, S. Eriksson and B. Johansson: AISE Annual Convention Pittsburgh, Sep. (1985)
- 11) 槌谷暢男, 浜田尚夫, 稲谷稔宏: 鉄鋼界, 33 (1983) 6, p. 46
- 12) (社)日本鉄鋼連盟溶融還元実施委員会: 鉄鋼界, 41 (1991), p. 56
- 13) E. Aukrust and K. B. Downing: Ironmaking Conference Proceedings AIME (1991), p. 659
- 14) J. V. Keogh, G. J. Hardie, D. K. Philp and P. D. Burke: Ironmaking Conference Proceedings AIME (1991), p. 635
- 15) B. L. Cusack, G. J. Handie and P. D. Burke: II nd European Ironmaking Congress Proceedings by the Institute of Metals (1991)
- 16) 不破 祐: 日本金属学会会報, 26 (1987), p. 365
- 17) H. M. W. Delpont and P. J. Holaschke: COREX Symposium, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Special Publication Series SP4 (1990)

- 
- 18) News from Industry: Ironmaking Steelmaking, **16** (1989)  
3, p. 149
- 19) J. A. Innes, J. P. Moodie, I. D. Webb and K. Brotzmann:  
The 7th Process Technology Division Conference of ISS,  
Tronto, April (1988)
- 20) Metal Producing, **11** (1991)
- 21) V. A. Romenets: Steel in the USSR, **20** (1990), p. 366
- 22) Arturo Lazcano N.: Ironmaking Conference Proceedings  
AIME-ISS, **46** (1987), p. 435
-