

# 溶融還元製鉄法開発の現況

北川 融\*

Present Status of the Development of Smelting Reduction Technologies

Toru KITAGAWA

**Synopsis :** Summary of DIOS collaboration study with the background of the future status of Japanese steel industry is described. The feasibility study of the DIOS process indicates that it can be better applied as an alternative to the blast furnace system with capital, operational and environmental benefits. The features of smelting reduction furnace allow to be combined with other direct reduction process in the Duplex-DIOS system to expand the applicability of the technologies. The feature of the Duplex-DIOS, the combination of DIOS-SRF and Rotary Hearth Furnace, is briefly described. Several other emerging smelting technologies, Hismelt, AusIron, ROMELT, AISI process and CCF or CleanSMelt, are briefly introduced. The comparison of DIOS technology with those processes even emphasizes the strength of the scope of the DIOS development and technology. The present status of COREX process is also described as an example of further development of the original process.

**Key words :** ironmaking; smelting reduction; DIOS; Hismelt; AusIron; ROMELT; AISI process; CCF; CleanSMelt; COREX; FINEX.

## 1. はじめに

現在世界の粗鋼生産量の60%強に相当する銑鉄は高炉法により製造されている。この高炉法は数100年の歴史があり、長年の技術革新の結果、最近では高炉1基で日産1万t以上もの銑鉄を長期にわたり安定的に大量生産する完成度の高いプロセスとなった。

しかし、高炉に装入する諸原料は原理的に塊状である必要があり、山元で主として生産される粉状の鉄鉱石はそのままでは使用できず、あらかじめ前処理段階で焼結鉱、ないしは焼成ペレットにした上で装入される。また、石炭はコークス炉で乾留しいわゆる冶金用コークスにする必要があり、そのため世界の埋蔵量の10%程度しかない粘結炭が数十銘柄調合して使用される。このように、高炉法は高炉本体のほかに、原料の前処理工程として焼結機ないしはペレット製造設備、コークス炉、およびこれらの附帯設備のほか、高炉に供給する空気を予熱する熱風炉が必要である。さらにこれらの前処理設備では鉄鉱石ないしは石炭がいったん、1200~1400°C程度に加熱された後、粒度をそろえるために室温まで冷却されることになり、種々の省エネルギー対策は図られているものの、高炉法全体としては必ずしもエネルギー効率が高いとはいえない。

1基で年間300万t以上の銑鉄を生産する高炉は高さが約100m、内容積が5,000m<sup>3</sup>程もある大型設備である。したがって、設備の更新には膨大な費用(日産1万tクラスの

高炉で数百億円、これに付随するコークス炉の更新にも同程度の費用)を必要とする。また、全世界的には高炉法に不可欠なコークス炉および焼結機、ペレット焼成設備の操業に関する環境対策に厳しい取組みが要求され、その上将来、コークス用原料炭の資源不足が懸念される折り、高炉法を取り巻く環境は厳しくなりつつある。一方、代替鉄源としての直接還元鉄(DRI)や鉄屑には地域性が強いことから、高炉によらない石炭ベースの新製鉄技術開発のニーズは高い。

日本では、1965年からわずか10年間に7箇所もの大型臨海製鉄所が相次いで新設された。同時に建設されたコークス炉は、補修技術の開発、高炉への微粉炭吹込み(PCI)によるコークス炉への負荷軽減(コークス比の低下)等の延命策にかかわらず21世紀初頭には相次いで寿命を迎える。Fig. 1には将来のPCI量の拡大によるコークス比の低減、コークス炉寿命を40年とした場合の高炉向け塊コークス供給能力の推移、ならびにこれらから推定した高炉溶銑生産可能量、および粗鋼生産可能量を算出した結果を示す。図示した石炭原単位は過去10年間の低減推移を回帰して推定したものである。また、高炉に装入可能な塊コークスの全コークス生産量に対する比率は同様に実績から約83%で一定とした。粗鋼生産可能量は粗鋼生産量に占める電気炉鋼比率は30%として算出した。この図から2010年には国内で生産可能なコークス量でまかなうことのできる高炉溶銑年産量は、62,500千tであり、電気炉鋼を含めた

平成14年3月26日受付 平成14年5月9日受理 (Received on Mar. 26, 2002; Accepted on May 9, 2002)

\* NKKプラントエンジニアリング本部 (Plant Engineering Division, NKK Corp., 2-1 Suehiro-cho Tsurumi-ku Yokohama 230-8611)

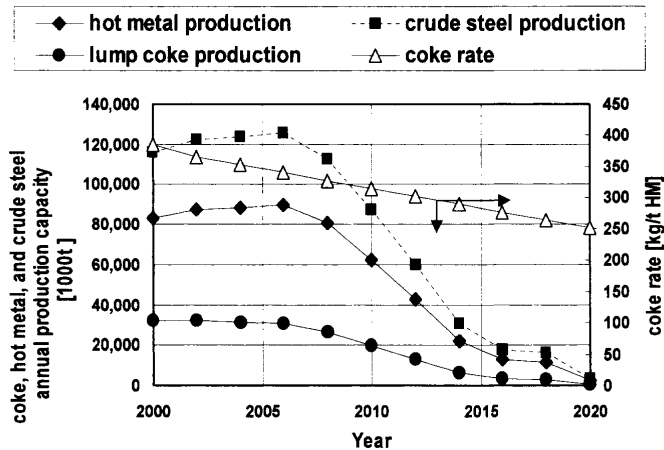


Fig. 1. Estimated domestic production capacities of lump coke for blast furnace, hot metal and crude steel in early 21st century.

粗鋼年産可能量は87,400千tと推定されるものの、その後5年以内にPCI量が225から256kg/tへの増量が達成され、その結果コークス比が315kg/tから289kg/tに軽減したとしても高炉溶銑生産可能量は年間22,000千t、粗鋼生産可能量は31,000千t弱のレベルに急減することが推定される。この間の粗鋼製造可能量の減少をコークスの過大な輸入に依存することなく食い止めるため現在新コークス製造法としてSCOPE-21の開発が行われてはいるが、既存コークス炉の改修を前提とすると業界全体で2,500~3,500億円もの工事費用が必要になるものと考えられる。

このような状況を背景にコークス炉によらず、生産量の調整が容易で、原燃料選択の自由度が高い高炉代替製鉄法に関する検討が大手鉄鋼会社により1987年に行われ、DIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process) の開発が1988年から8年間の国家プロジェクトとして行われた<sup>2)</sup>。このプロジェクトは石炭利用総合センターと日本鉄鋼連盟の共同研究の形で行われ、日本鉄鋼連盟傘下の製鉄八社(川崎製鉄、神戸製鋼所、合同製鉄、新日本製鐵、住友金属工業、中山製鋼所、日新製鋼、NKK)が参画した。DIOSプロジェクトはすでに中間報告<sup>3)</sup>されているので、ここでは1997年に実施された実証試験を含め、プロジェクト全体の総括を中心として紹介し、あわせて他の鉄浴型溶融還元法開発の概要を紹介する。

## 2. 溶融還元法の特徴

高炉では鉄鉱石とコークスを炉の上部から交互に層状に装入する。炉下部からは1200°C程度の高温空気を吹き込んでコークスを燃やし、その結果発生した還元ガスを層状の原料の間を通すことで鉄鉱石を還元し約6~8時間かけて銑鉄を製造している。

これに対し、鉄浴型溶融還元法は1,500°C程度の溶銑ないし溶融スラグに鉄鉱石を添加することで、鉄鉱石を溶融

状態で溶銑中の溶解炭素によって瞬時に還元し、溶銑を製造するプロセスである。還元に必要な炭素は石炭で補い、また必要な熱量(具体的には鉱石、副原料のスラグへの溶解熱や溶解したウスタイト(FeO)のFeへの還元反応熱など)は、石炭ないしは還元反応の結果として発生する一酸化炭素を燃料とし、酸素で燃やすことでまかなっている。したがって、一酸化炭素を酸素で炭酸ガスまで完全燃焼させる割合(二次燃焼率)と、二次燃焼の結果発生したエネルギーの溶融還元反応への利用効率(着熱効率)が高い程、必要な石炭量を低減することが可能である。また、溶融還元炉(smelting reduction furnace, SRF)からの発生ガスを利用して予備還元炉(pre-reduction furnace, PRF)で鉄鉱石を予熱、予備還元した上で溶融還元炉に鉄鉱石を装入することで、全体の熱効率を向上させている。

溶融状態で鉄鉱石を還元するという溶融還元法の原理から、

- 鉄鉱石は銘柄を問わず、また石炭も燃料として使用されている安価で埋蔵量の多い一般炭を使用でき、
- 焼結機、コークス炉といった原料の塊成化工程(コークス炉、焼結機)が不要で、
- 巨大な装置を必要とせず、
- 設備の運転開始および停止が容易で生産弾力性が拡大し、
- エネルギー発生量の制御も容易である。

という様々な魅力ある特徴が出てくる。このように高炉法の弱点を補う溶融還元法の開発が1980年以降、諸外国においても活発に展開されてきた。

## 3. DIOS開発の概要

### 3.1 共同研究プロジェクト

DIOSは1988年度から最初の3年間は要素研究として、予備還元炉、溶融還元炉およびこれらの直結上の主要諸課題につき試験研究<sup>2)</sup>を実施し、開発すべきプロセスの骨子およびスケールアップ特性を明らかにし、高炉法を凌駕する諸目標達成の見通しを得た。要素研究の成果に基づき、NKK京浜製鉄所にパイロットプラントを建設し、1993年10月から1996年1月まで合計10キャンペーンの実証的試験操業を実施した。試験と並行し原燃料の備蓄・搬送、溶銑予備処理、スラグ処理、並びに発生ガスの製鉄所内での燃料としての利用など、DIOS実用化に必要な諸条件について検討を行い、DIOSを高炉代替プロセスとして導入するための条件を明確にした。

試験結果をベースに、国内の大型高炉の代替を前提とした商用設備の概念設計と経済性評価を行い、1996年3月にすべての研究を終了した。共同研究の終了後、日本鉄鋼連盟内にDIOS推進委員会が設置され、研究成果の維持・管理と商用化をめざした活動が展開されている。その一環と

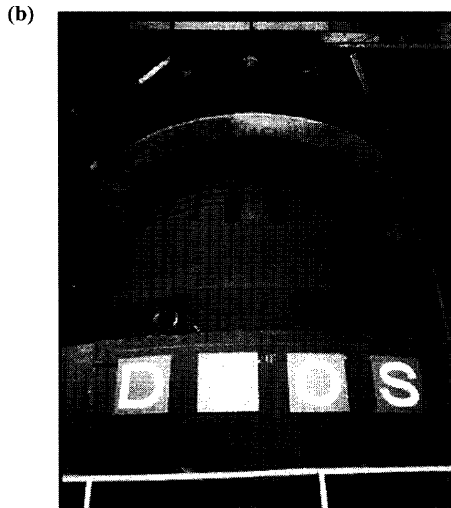
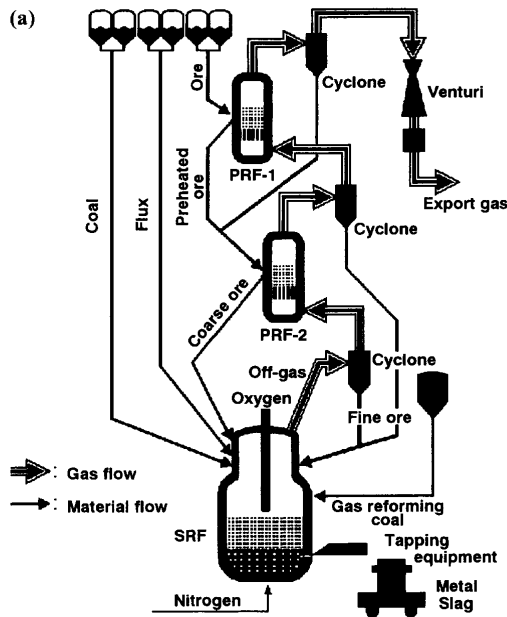


Fig. 2. DIOS pilot plant.  
 (a) Process flow of DIOS pilot plant.  
 (b) Smelting reduction furnace of DIOS pilot plant.

して、1997年商用設備の耐用性の実証試験がNKKにより実施され、商用設備の諸元が実証された。

### 3・2 DIOSパイロットプラント試験

#### 3・2・1 設備概要<sup>4)</sup>

DIOSパイロットプラントのプロセスフローおよび溶融還元炉の写真をFig. 2に示す。パイロットプラントは鉄鉱石の予熱炉 (PRF-1)、予備還元炉 (PRF-2) および溶融還元炉の基本3設備と原料搬送設備、出銑滓設備、ガス改質装置および全系圧力調整装置を含むガス処理設備で構成され、設備能力は日産500tである。試験操業によって生産された溶銑は京浜製鉄所の転炉にて鋼に精錬し、発生ガスは発電所に発電用燃料として供給した。

溶融還元炉は、上吹き酸素ランスおよび攪拌用の窒素底

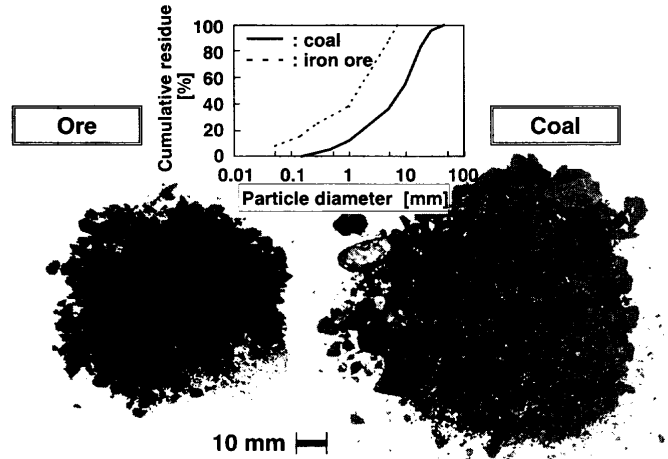


Fig. 3. Typical size distributions and appearances of iron ore and coal for DIOS process.

吹込み羽口を有している。溶融還元炉の炉底近傍には出銑滓孔を設け、生産された溶銑とスラグを定常操業中に排出する。またスラグ浴から上部ガス空間にかけて水冷銅パネルの設置が可能である。発生ガス中のダストはホットサイクロンによって捕集し、全量を熱間で溶融還元炉に鉄鉱石とともに再装入した。炉体は300 kPa未満の加圧条件下で操業され、この圧力により予備還元炉系に溶融還元炉からの発生ガスを導入する。

PRF-1およびPRF-2はともに、粒度分布の広い鉄鉱石を直接使用可能なバブリング型流動層炉であり、代表的操業温度はそれぞれ、600°Cおよび800°Cである。PRF-2で鉄石は粒径約0.3 mmを境に粗粒と微粒とに分級され、それぞれ、溶融還元炉の炉頂から重力装入ないしは投射によって装入される。PRF-2炉内から短時間で飛散する微粒鉄石を炉内に戻し、還元時間を延長するためにPRF-2には循環機能を有している。PRF-1およびPRF-2には各々サイクロンおよび鉄石搬送設備が付帯しており、高温鉄石をPRF-1からPRF-2さらにはSRFへ自動的に搬送、装入される。

#### 3・2・2 使用原燃料

パイロットプラントで使用した鉄鉱石と石炭を粒度分布とともに、Fig. 3に一例として示す。鉄鉱石はシンターフィードと呼称される最大粒径8 mmの粉鉄石で、高炉法では焼結鉄に処理されるものを直接使用した。一方、石炭は一般に燃料として使用される、非微粘結炭であり、揮発分 (VM) 量の異なった銘柄を試験し、最高値は43%である。Fig. 4にDIOSに使用可能な石炭種を高炉用石炭種と比較して示す。亜炭 (lignite)、褐炭 (brown coal) を除き、ほとんどの炭種が使用可能である。ただし、固定炭素量が相対的に低い石炭は、酸素、石炭の原単位が増大するため、経済的に成り立つかどうかはこれらの価格並びに発生エネルギーの評価に依存することになる。したがって、亜炭および褐炭は特段の事前処理ないしは経済的事情がない限り、

経済的なプロセス構築は難しく、Fig. 4ではDIOSでの対象銘柄からははずしている。

3.2.3 パイロットプラント試験操業の概要

試験操業はTable 1に示すごとく、耐火物で構築した溶融還元炉炉体を用いて5キャンペーン<sup>5)</sup>を実施した後、炉体の二次燃焼部位に水冷パネルを取り付けた水冷炉体で5キャンペーンの合計10キャンペーン、総計71ヒート実施した。

耐火物炉体での試験では高生産・長期間安定操業の基本操業技術を確認した。また、各種鉱石、石炭銘柄を使用した場合の操業特性の把握などが行われた。炉体水冷試験においては、水冷関連設備技術の確認と、炉体放散熱に及ぼす操業諸因子の影響評価、および炉体水冷条件でのプロセス全体のエネルギーバランス評価を行った。

3.2.4 溶融還元炉の開発成果

鉄鉱石の還元には膨大な反応熱を必要とする。したがって、溶融還元炉の銑鉄生産速度は、熱供給速度に支配されることになる。熱供給速度の向上のため、上吹き酸素ランスの構造の最適化<sup>6)</sup>と原燃料装入量の的確な制御による炉内現象の制御により二次燃焼率を向上させた。またスラグ内に酸素ジェットを構成することで二次燃焼熱を効率よく

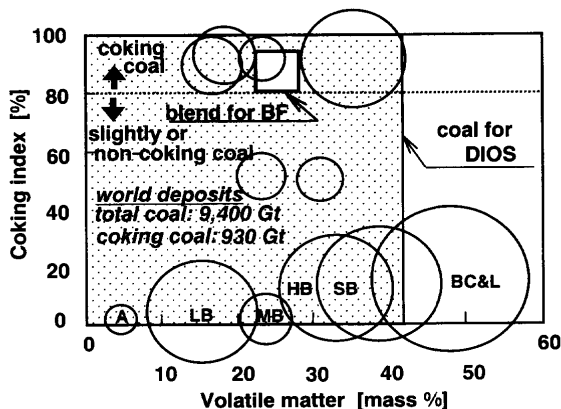


Fig. 4. Applicable coal grade for DIOS process. A: anthracite, LB: low volatile matter bituminous coal, MB: medium volatile matter bituminous coal, HB: high volatile matter bituminous coal, SB: sub-bituminous coal, BC: brown coal, L: lignite

スラグ相に伝熱させ、スラグ浴を酸素ジェットおよび炉底からの吹込み窒素の攪拌作用<sup>7)</sup>により酸化鉄の還元反応部位に熱を供給することを具現化した。すなわち、酸化鉄の還元領域と還元の結果発生する一酸化炭素を酸素で二次燃焼する酸化領域とを区分しつつ伝熱の上では両者を緊密な関係に維持することを両立させている。DIOSの溶融還元炉を特徴付ける炉内現象をFig. 5に、定常操業状況にある溶融還元炉炉内の温度分布、およびサンプリングの結果をFig. 6に示す。

Fig. 6から炉内のスラグは上下二層に分かれており、下部スラグ層は鉄浴とほぼ同温度であり、二次燃焼を行っている上部スラグ層はそれよりも150~200°C高く、二次燃焼熱は上部スラグ層から下部スラグ層に向けて伝熱している事が明らかである。サンプリングの結果からは、下部スラグ層は底吹き攪拌ガスの作用で発生した多量の粒鉄を含んでおり密度が高いこと、また上部スラグ層は泡立った状況にあることが示されている。

一方、下部スラグ層と上部スラグ層の密度を推定するとそれぞれ、1 g/cm<sup>3</sup>および0.3 g/cm<sup>3</sup>程度であり、チャー粒子の見かけ密度を0.8 g/cm<sup>3</sup>と考えるとチャー粒子は上部スラグ層に沈んだ状況、すなわち下部スラグ層内に分布することが想定可能である。このように下部スラグ層には、多量の粒鉄および石炭から生じたチャーが含まれており、温度分布からみてもこの部分で酸化鉄の還元反応が主体的に進行していることを示唆している。

酸素ジェットがこの下部スラグ層に到達すると粒鉄中の溶解炭素ないしはチャー粒子と反応するほか、二次燃焼の結果発生した炭酸ガスとの反応によって一酸化炭素が発生(二次燃焼の逆反応)する。したがって、二次燃焼率を向上させるためには、酸素ジェットの軌跡を制御し、下部スラグ層との干渉を抑制することが重要である。一方、着熱効率は底吹き攪拌強度の増大にしたがって向上するが、ある限界を超えた攪拌は二次燃焼率を低下させるため熱効率の観点では最適値が存在する。この現象は、過大な底吹き攪拌によって粒鉄の発生量が増大し、二次燃焼によって生成した炭酸ガスが高炭素粒鉄によって一酸化炭素に還元さ

Table 1. Major technical subjects for each operational campaign of DIOS pilot plant.

Campaign	Major Technical Subjects	No. of Heat	Comments
R 1	Tuning of equipments. Establishment of SRF operational sequence.	15	
R 2	Establishment of linked (SRF+PRF) operational sequence.	6	One week continuous operation.
R 3	Improvement of productivity & thermal efficiency. Effect of grades of iron ore and coal on the above.	8	Production rate of 21 ton/h was achieved.
R 4	Continuous high performance operation SRF off-gas reforming by pulverized coal.	9	500 ton/day operation rate was achieved on a daily basis.
R 5	Long term operation and process evaluation	5	Continuous operation of over 15 days was achieved.
W 1	Tuning of water-cooling system.	10	
W 2,3	Low PC operation & low metallized DRI smelting. High pre-reduction operation.	9	Effect of pre-reduction degree of ore up to 75% on the productivity was determined.
W 4,5	High productivity operation. Evaluation of the effect of water-cooling	9	Productivity of higher than 500 ton/d was achieved.

Campaign numbers headed by R or W denote those carried out with lining structure of refractory or of water-cooled, respectively.

れた結果であると理解される。溶融還元炉の密閉・加圧操作は微細な装入原燃料の飛散量を最小限に抑えることを可能とし、炉内で反応、消費した炭素、酸素などのバランスを精度よく把握し、制御することを可能とした。この結果、炭材の炉内存在量、スラグのFoaming高さなどの炉内現象を適切に制御することが可能となり、熱効率と操業安定性の向上に寄与している。

効率が驚異的に高い方法としてよく知られている浸漬燃焼技術<sup>8)</sup>を具現化したDIOS溶融還元炉の二次燃焼・着熱機構では高温の二次燃焼領域がスラグ層内に限定されていることから放熱面積が小さく、この部分に設置されている水冷パネルへの放熱量も少ない。結果として溶融還元炉内の燃焼および還元反応が起きているスラグ表面以下の部分で熱バランスを取ることで算出される燃焼着熱効率は85%以上に達している。

Fig. 7に溶融還元炉の直結操業で得られた酸素の供給速度（送酸速度）と生産速度の関係を代表的炭種ごとに示す。還元反応に必要な熱量は上吹き酸素による燃焼により供給されるため、溶銑の生産速度は、鉄鉱石の予熱温度と予備還元率、二次燃焼率、および着熱効率が一定の条件では、上吹き送酸の供給速度に依存することになる。

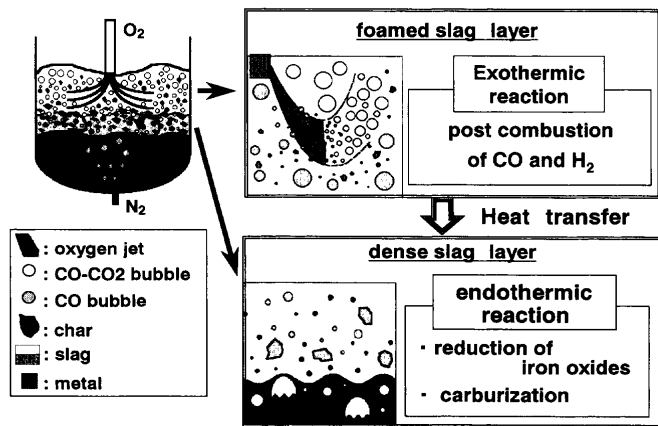


Fig. 5. Schematic configuration of DIOS SRF.

### 3.2.5 予備還元炉の開発成果

予熱・予備還元炉には最大径8mmのシンターフィードが装入される。通常、流動層炉で処理される粉体としては粒度範囲が広く、かつ比重が大きいため、分散盤のノズル径、開孔比、炉内の鉱石滞留量に対応したガス流量など安定流動化の条件を決めることが重要な課題であった<sup>9)</sup>。これらに関する事前の研究成果に基づきパイロットプラントの設備仕様と運転方案が決定され、所定の溶融還元炉からの発生ガス量において安定した還元率が得られるとともに、還元鉱石の系内における安定化した物流が達成された。予備還元炉で分級された微粒と粗粒の平均還元率は、Fig. 8に示すように温度依存性が顕著に認められ、780°Cで約27%に達している。

還元に伴って鉱石粒子は微細化<sup>10)</sup>し、還元率27%程度では約85%が粒子径0.3mm未満となるが、この微細な鉱石の溶融還元炉への移送と装入も十分な精度で自動運転が可能であった。

### 3.2.6 石炭原単位

Fig. 9にパイロットプラントで得られた溶銑生産速度と石炭原単位の実績値を示す。

この図から溶銑生産速度が増大すると生産される単位溶銑量あたりの炉体の放散熱が相対的に小さくなるため、石炭原単位が減少することになる。石炭の種類による差異も明瞭であり、揮発分が低い石炭を使用した場合は二次燃焼率が高く、したがって石炭原単位が低くなる。

### 3.3 試験結果総括

DIOSパイロットプラント全試験操業の総括を、Table 2に示す。この間、15日間連続操業および炉体水冷のもとでの設備能力の上限である日産500tを上回る生産速度での3日間の操業の実施等、操業安定性の実証並びに商用設備の設計並びにプロセスの経済性評価のためのベースデータが採取された。

### 3.4 商用設備概念設計と経済性評価

パイロットプラント試験データに基づき、高炉代替プロセスとしてのDIOS商用設備の概念設計と経済性評価を実

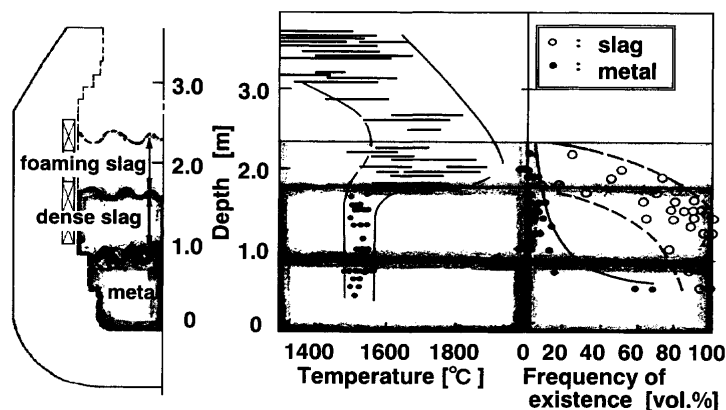


Fig. 6. Temperature distribution and result of sampling during steady state operation of DIOS SRF.

施し、高炉法と比較した。DIOS商用設備1基あたりの生産規模は日産3,000tと設定した。したがって、日産6,000tおよび9,000t規模の場合にはそれぞれ、2基および3基の設備が必要になる。

3.4.1 検討の前提条件

- ① 立地：国内臨海グリーンフィールド
- ② 設備構成：溶融還元炉、予熱炉および予備還元炉の組み合わせ

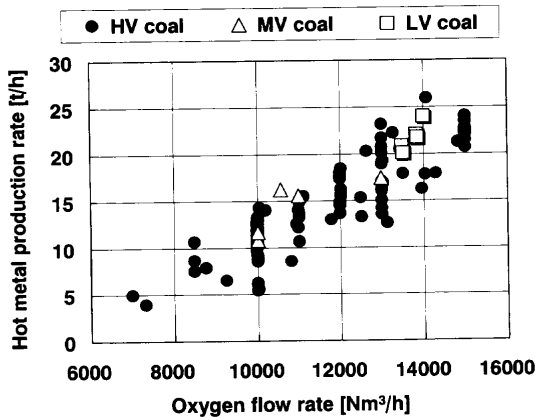


Fig. 7. Change in hot metal production rate with oxygen blowing rate in DIOS SRF.

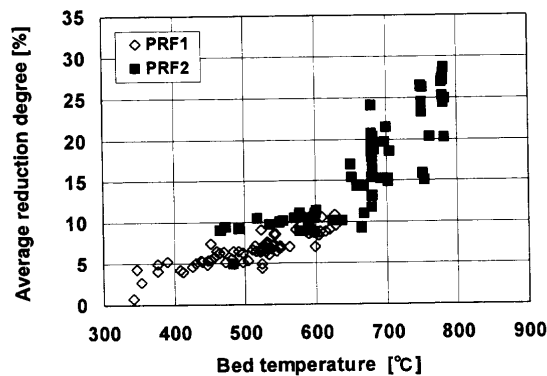


Fig. 8. Change in average pre-reduction degree of iron ore in DIOS pre-reduction furnace.

- ③ 設備規模：日産3,000t, 6,000t, および9,000t
- ④ 原燃料
  - 鉬石：全鉄分63%のシンターフィード（国内での平均品位）
  - 石炭：揮発分31.2%, 固定炭素59.4%の非微粘結炭（国内での一般炭の平均品位）
  - 副原料：石灰石, 生ドロマイト
- ⑤ プロセス評価の範囲：原料岸壁から溶銑の転炉装入まで
- ⑥ 高炉法の条件：将来の技術の進展を考慮した先進的高炉を想定

3.4.2 検討結果

(1) 設備レイアウト

概念設計された日産9,000t規模のDIOSのレイアウトを高炉法と比較してFig.10に示す。DIOSは設備が3基必要であるが、高炉法に比較して原燃料銘柄が削減可能であるために原料ヤードの縮小が可能であるほか、コークス工場、コークス炉副産物回収工場並びに焼結工場の省略により、必要な敷地面積は高炉法の約1/3程度となる。

(2) コスト比較

DIOS商用設備の石炭原単位は730~750kg/tと推定され、

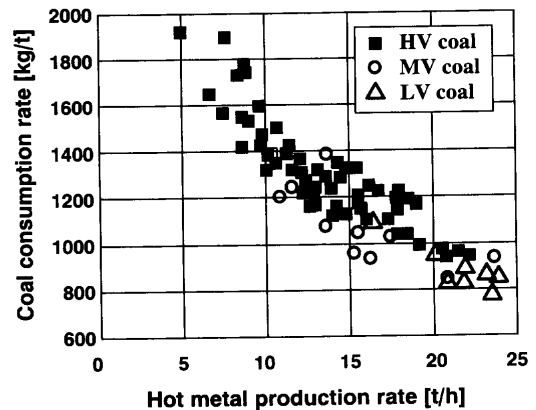


Fig. 9. Observed coal consumption rate as a function of hot metal productivity in DIOS pilot plant.

Table 2. Summary of DIOS technologies and features.

Items	Developed technologies and features
Direct use of ore and coal of wider sizes and grades	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Both iron ore and coal as received sizes of the order of 10mm down to several ten microns can directly be used in the process.</li> <li>• Non-coking coal of up to 43% of volatile matter contents can be used.</li> </ul>
Linked operation of SRF, PRF 1 and PRF 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatic handling system of the pre-reduced hot ore in the pressurized units has been successfully developed and shows a satisfied level of accuracy.</li> <li>• Optimized charging system of coarse and fine material into SRF has been developed.</li> <li>• Dust build up in gas introduction system has been successfully avoided.</li> </ul>
Energy efficiency	<p><b>Pre-reduction in PRF:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximum 28% of reduction degree at bed temp. of 800°C has been attained.</li> </ul> <p><b>Intensive smelting in SRF:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PCR of range of 40 to 60% with HTE of higher than 85% has been achieved for coal of higher than 15% of VM.</li> <li>• Amount of heat losses through the water cooling system of the smelter has been reduced due to the realization of the submerged combustion in the post combustion technology.</li> </ul> <p><b>Total system</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DIOS has been classified as one of the most energy efficient processes among the emerging new ironmaking processes.</li> </ul>
Environmental impact	SOx and NOx emissions from the process has been proven to be much less than the conventional and emerging processes.
SRF lining	Water-cooling system has been proven to be applicable to the critical part of SRF to extend the campaign life to the satisfied length.

PCR : post combustion rate, HTE : heat transfer efficiency

日産6,000t規模では高炉法と比較して、設備コストで35%、製造コストで19%の削減が可能である。

(3) エネルギー収支

日産6,000t規模における高炉法とDISOの製鉄部門のエネルギー収支を比較してFig.11に示す。DIOSは回収エネルギーの自己消費が少なく、全消費と下工程供給エネルギーの差である純消費も高炉法より3~4%節減可能な省エネ型製鉄法である。Fig.11は石炭の揮発分が31.2%の場合であり、低揮発分炭をベースとすれば揮発分の低下に応じて石炭原単位並びに余剰エネルギー量の削減が可能である。IISIの技術委員会での整理<sup>11)</sup>ではDIOSの熱効率が開発を終えたプロセスの中で最も高い評価が与えられている。

(4) 環境適合性

DIOSは石炭の揮発分が有効に利用でき、また原燃料の前処理段階を大幅に省略可能であることから高炉法より炭酸ガス排出量を4~5%削減可能である。また、窒素ないしは硫黄酸化物が発生ガスから検出されず、環境改善にも有効なプロセスである。DIOSからの硫黄(SO<sub>x</sub>)ないしは窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の排出量を高炉法および他の高炉代替製鉄プロセス<sup>12-14)</sup>と比較してFig.12に示す。(Fig.12は対数グラフのためDIOSの排出量には有限値を与えた。)

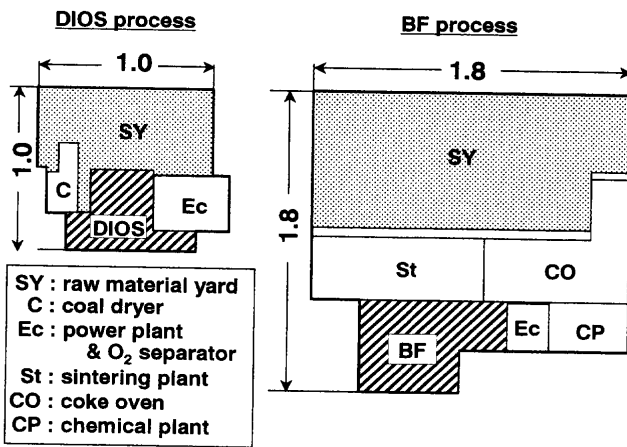


Fig. 10. Comparison of layout of DIOS commercial plant of three million tons annum with those of blast furnace process.

3.5 DIOSの実用化

以上に述べたようにDIOSは、経済性、環境適合性において長年にわたり改善、開発が加えられた高炉法を凌駕する製鉄法である。日本国内においては粗鋼生産量の伸びは近年飽和してきており、すでに償却の済んだ設備が生産余力を持っている状況にある。一方、全世界的にみると鉄鋼需要の伸びは今後も見込まれており、少額の投資で鉄鋼生産の可能なDIOSへの期待は大きい。国内において実用化の期が熟するまで技術を継承、温存してゆくためには、海外への技術移転をも含めた商用化の努力が必要である。

ミニミルを含めた国内外の多様なニーズと立地条件に対応するためNKKはDIOSの共同研究成果に基づき、Fig.13に示す商用設備諸型式のエンジニアリングを実施し実用化

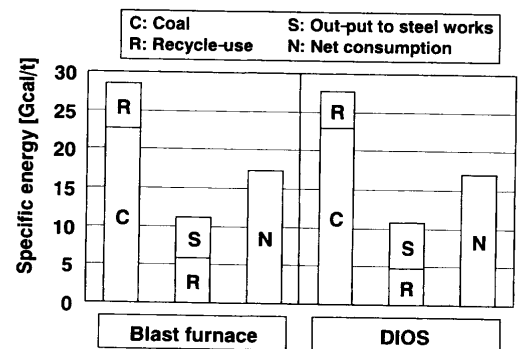


Fig. 11. Comparison of energy balance of DIOS commercial plant with that of blast furnace process.

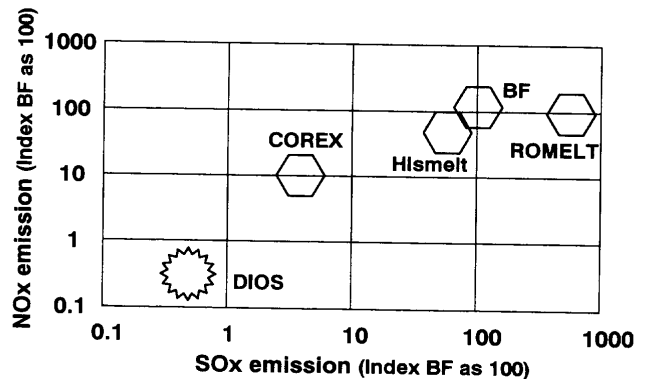


Fig. 12. Comparison of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions of DIOS with those of several ironmaking technologies.

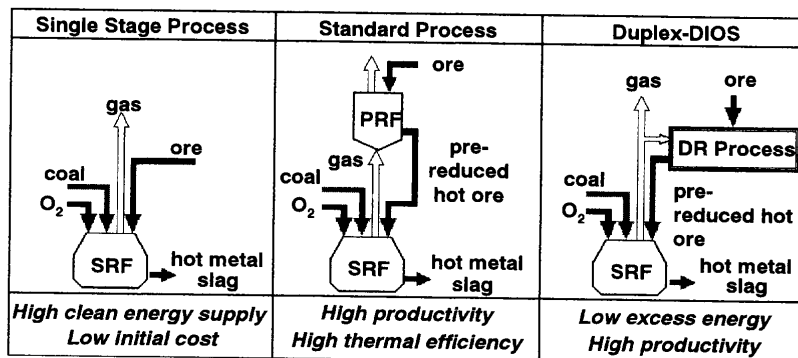


Fig. 13. Commercial versions of DIOS engineered by NKK and their features.

活動を行っている。Single Stage Processは一段法でエネルギー併産型プロセス、Standard Processはいわゆる二段法で、予備還元炉1基に溶融還元炉を組合わせたプロセスであり、生産規模並びに特性はすでに3・4節までに紹介したものに準じ、一貫製鉄所の下工程を含めたエネルギーバランスの取ることのできる型式のプロセスである。Duplex-DIOS<sup>15)</sup>は鉱石の予備還元率を向上させることを目的に回転炉床炉<sup>16-18)</sup> (rotary hearth furnace, RHF) 等の既存の固体還元技術を予備還元段階として溶融還元炉と組合わせた型式で、溶融還元炉1基あたりの生産能力を大幅に拡大させることができる。

RHFと組合わせたDuplex-DIOSのプロセスフローをFig. 14に示す。Standard processが粒径約8mm未満のシンターフィードを主原料にするのに対してDuplex-DIOSでは粒径がおおよそ0.2mm未満の粉鉱石、いわゆるペレットフィードを粉石炭および少量のバインダーとともに混合、造粒して炭材内装粒 (green ball) とし、これをRHFで焼成し、予備還元率50~70%程度的高温予備還元ペレットにし

た上で溶融還元炉に装入し、溶銑を得るものである。Standard processと比較し、予備還元率が高いため、溶融還元炉の生産性が向上し、石炭、酸素などの消費原単位を低く抑えることが可能である上、溶融還元炉の発生ガスはRHFに燃料として供給されるため、余剰エネルギー量も低く抑えることが可能である。生産プロセスが単純で、下工程エネルギー消費の少ないミニミルに最適なプロセスといえる。

Fig.15にDuplex-DIOSの生産性を鉄鉱石の予備還元率に対して示す。この図で、DIOS-2,000, DIOS-3,000と表記しているものは夫々、Standard DIOSで低揮発分炭を用いた場合、日産2,000tおよび3,000tの得られる規模の溶融還元炉の生産性と予備還元率の関係を示している。RHFの生産性はIron Dynamics社に設置された設備に相当するものを破線で表示し、Submerged Arc炉 (SAF) との組合わせに

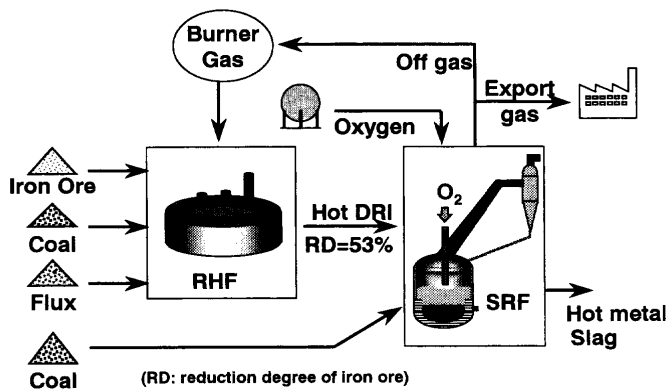


Fig. 14. Flow of Duplex-DIOS process.

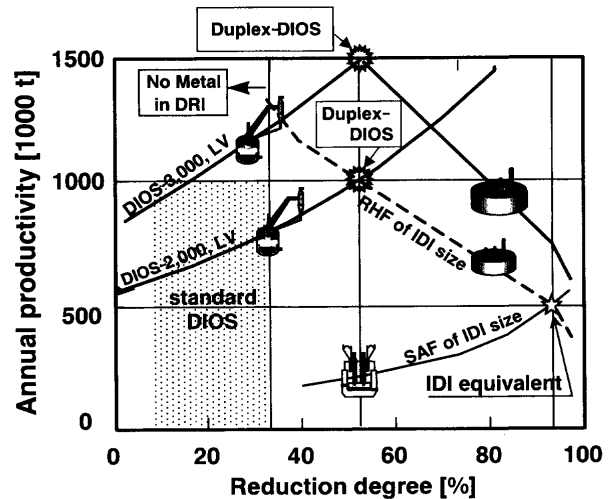


Fig. 15. Productivity of Duplex-DIOS.

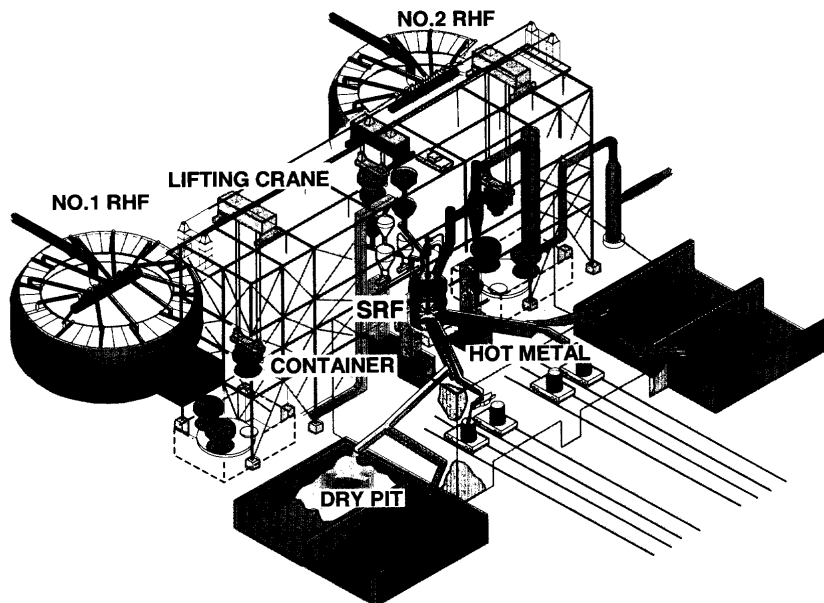


Fig. 16. Commercial Duplex-DIOS plant of 1.5 million tons annum.



よる年産50万tのプロセス<sup>19)</sup>と比較している。RHFの生産性は製品ペレットの還元率の低下とともに向上し、溶融還元炉との交点がDuplex-DIOSの生産性である。溶銑の生産性はStandard型の約50%増であり、溶融還元炉1基との組合わせで、年産100万tないしは150万tとなり、設備投資に伴う固定費を含めた溶銑製造原価は大幅に低下する<sup>15)</sup>。Fig.16にIron Dynamics社のものより小型のRHFを2基溶融還元炉に組合わせた、年産150万tの商用設備の概念を示す。

#### 4. 溶融還元プロセスの諸外国での開発動向

溶融還元法の研究は、1970年代から世界各国で本格的に開始され、1980年代後半には、複数企業の協力あるいは国家プロジェクトによる大型のパイロットプラントを用いた研究開発プロジェクトが相次いで開始された。米国のAISIプロセス、豪州のHIsmelt, AusIron, 欧州のROMELT, CCFがそれである。

シャフト炉型予備還元炉を構想したAISIプロセスが塊原料ベースのプロセスである以外はいずれも「一般炭と粉鉄鉱石を直接使用する」共通点を有している。これらの内で予備還元炉と溶融還元炉を定常的に直結して操業し、全系プロセスの開発を実施したのはDIOSのみであり、他のプロジェクトでは、溶融還元炉ないしは予備還元炉の単独の要素試験が行われている段階である。

##### 4.1 HIsmelt

HIsmeltはドイツのKloeknerが開発した製鋼転炉の熱付加技術(K-OBMプロセス)をベースに考案されたプロセスで、1980年初頭からCRA(現、Rio Tinto)とKloeknerとの共同開発として開始された。21世紀までに500,000 T/Yearの商用設備を西オーストラリア州に建設し、商用価値の低い高燐鉱石を製錬して冷銑にし、付加価値を上げることを目標に開発が推進されてきた<sup>13)</sup>。

当初、水平円筒型の溶融還元炉とこれに直結した流動層型予備還元炉の全系試験設備による開発が行われていたが、1997年からは、内径2.7mの豎型炉の単体に変更し、溶融還元炉単体の開発が行われた<sup>20)</sup>。二次燃焼は炉の上部空間において熱風炉で発生させた1200°C程度の加熱酸素富化空気(酸素富化率は30%未満)により行い、二次燃焼率は60~80%を目標としている。粉状の鉱石と石炭をあらかじめ混合しておき、スラグ浴に浸漬した水冷ノズルにより鉄浴に向けて投射することにより鉄浴内で鉄鉱石を還元、浸炭させるとしている。水冷ノズルによる材料の投射は炉の上部空間に多量のスラグスプラッシュを発生させ、これを伝熱媒体として炉上部の二次燃焼帯から燃焼熱を浴に伝熱する作用ももたらす。生産した溶銑は炉底近傍に接続された前炉を経由し、サイフォン式で出銑され、スラグは別途設けた出滓孔から間歇的に排出される。炉は200

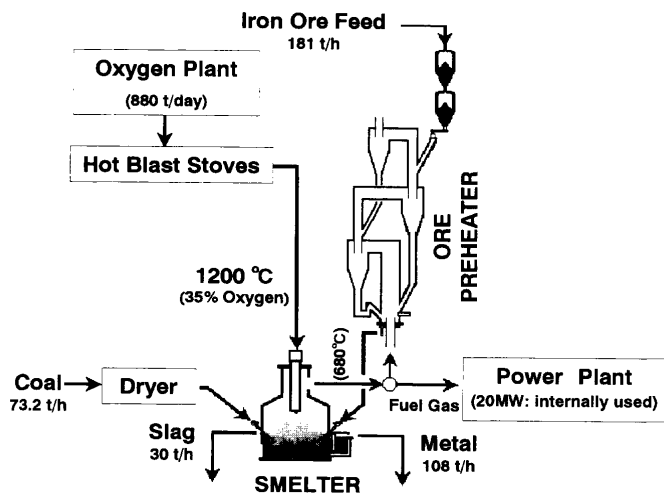


Fig. 17. HIsmelt commercial plant planned to install at Kwinana.

kPaの加圧下で運転されている。開発は溶融還元炉技術に特化されており、商用設備ではサスペンションプレヒーターあるいはLurgiの開発したCircoferを鉱石の予熱あるいは予備還元設備として組合わせる構想<sup>21)</sup>であるが、炉内二次燃焼率が高いために発生ガスの還元力が低く、予備還元炉を連結するか、発生ガスを熱風炉の燃料として利用する場合には天然ガスを添加するか脱炭酸設備が附加される<sup>20)</sup>。

2000年、Nucorで年産60万t規模の実証プラント建設に向けて経済性評価の実施契約が行われたが、結果として、西オーストラリア州のKwinanaに年産80万t規模のプラントを2004年央に建設することを目標に現在、環境影響評価などの準備が進められている<sup>22)</sup>。生産された冷銑は国内外に販売される予定とのことである。Fig.17に商用1号機として計画されている設備のフロー図<sup>22)</sup>を示す。

##### 4.2 AusIron

AusIronは1970年代にDr. J. FloydがCSIRO在籍中に発明した鋼製上吹二重管ランス(Sirosmelt Lance)を用いた非鉄製錬プロセスの鉄への応用プロセスである<sup>23)</sup>。元々の方式であるAusmeltではランス外管に空気を流して冷却することでランスをスラグ固着層で保護することにより、スラグ中に浸漬することを可能としており、用途により内管からは固体ないし気体燃料あるいは粉原料を装入している。すでに中国、インド、ドイツ、ペルー、日本、韓国等において銅、ニッケル、亜鉛、鉛など非鉄金属の製錬に应用されている。

AusIronの開発は1990年代のパイロットプラント試験から始まり、南オーストラリアに産出する一般炭と鉱石を原料にした年産250万tの冷銑の生産と発電事業を行う、South Australian Steel and Energy (SASE) Project<sup>24)</sup>の中核プロセスとしてSASE Pty. 社が推進している。南オーストラリア州政府およびオーストラリア連邦政府の補助金を得て

2000年末から南オーストラリアのWhyallaにおいて2t/h規模の実証試験炉を稼働させている<sup>25)</sup>。ちなみにこの試験研究には、後述のCCFの開発を行ったCORUSが技術支援している<sup>25)</sup>。

実証設備には空冷ランスにかえて水冷二重管ランスを2本使用し、外管からは酸素富化空気を炉の上部空間に二次燃焼用として供給し炉内発生ガスを完全燃焼させている。内管からは燃料用粉石炭を酸素富化空気とともにスラグ内に投射して燃焼するとともに多量のスラグプラッシュを炉上部二次燃焼帯に生成させ、燃焼熱を浴に伝える伝熱媒体としている。石炭はあらかじめ篩い分けし、篩下を燃料用に、篩上を還元用として鉄鉱石とともに炉頂から重力装入している。溶融還元反応は炉周辺部のスラグ浴表面に浮遊している炭材表面において進行するとしている。基本的に溶融還元炉単独プロセスであり、炉内を吸引ファン (IDF) で排気し炉内を微減圧にして操業している。商用設備では廃熱ボイラーにより発生ガス顕熱を回収する方式である。

2003年末までに南オーストラリアにおいて商用設備を稼働させる予定とのことである。商用設備の概要をFig.18に示す。商用設備は実証設備と同様に2本ランスを採用しており、炉床は耐火物、炉の中～上部は水冷構造となっている<sup>26)</sup>。

### 4.3 ROMELT

ROMELTはCuおよびNi硫化物の製錬用に考案されたVanyukovプロセスをベースに1979年Moscow Inst. of Steel and Alloy (MISA)のDr. V. A. Romenetsにより考案されたプロセスで、1985年、Novolipeski冶金コンビナートの転炉工場に炉床面積20m<sup>2</sup>、連続操業ベースで最大18t/h規模の半商用設備が建設され、1997年までに47キャンペーンの試験を行った<sup>27)</sup>。プロセスはFig.19に示すように溶融還元炉単段であり、水平箱型の溶融還元炉に多量のスラグを貯留し、上下二段に配置した複数羽口から酸素富化空気をスラグ浴内に、酸素を炉の空間部に吹込み完全に二次燃焼させている。下段ノズルからの吹込みガスを酸素のみとした

場合に比べて空気を混合することでスラグ浴の攪拌が強化されるために石炭原単位が改善され、酸素濃度50~60%が最適であるとしている。発生ガスはIDFで排気し、溶融還元炉は微減圧下で運転される。装入物はすべて炉上部から重力投入される。炉内で生成した溶銑とスラグはそれぞれ別にサイフォン式で連続的に排出する構造となっている<sup>28)</sup>。発生ガス顕熱は廃熱回収ボイラーにて回収、発電に用いられる。これまでに、ICF Kaiser International、新日本製鐵に技術供与された。

1997年インドの国営鉱山開発会社 (National Mineral Development Corp.) がBailadila鉱山の尾鉱 (red mud) を製錬するため、ライセンスを取得、同時にROMELTの開発母体である、MISAとSteel Authority of India Ltd. (SAIL) との間で、ROMELT-SAIL Ltd.を設立し、商用設備建設の検討が開始された。2001年、Dantewara地区Goodemに年産30万t規模の設備建設に着手し2003年初頭に完成の予定と報じられているが<sup>29)</sup>、建設地を変更し、計画が1年遅延との情報もある<sup>30)</sup>。

### 4.4 AISIプロセス

米国鉄鋼協会 (AISI) はエネルギー省 (DOE) の補助金を得て、“AISI-DOE Direct Steelmaking Program” の名称の直接製鋼プロセス開発プロジェクトを1988年から開始した。この構想では鉄鉱石ペレットをシャフト型予備還元炉にてウスタイト (FeO) まで還元した後、鉄浴型溶融還元炉に装入して溶銑を製造し、この溶銑を連続製鋼炉で脱硫、脱炭して溶鋼とすることを目標とした。予備還元炉でウスタイトペレットを得る研究はメキシコのHYLSAにて日産30t規模のシャフト型直接還元鉄試験設備を用いて実施された。この試験で生産されたウスタイトペレットを原料にして1990年からは15t容量の転炉型溶融還元炉単独のパイロットプラントを用い、4.2t/h程度の溶銑製造試験<sup>31)</sup>が、1993年には日産10tのプロトタイプ設備による試験が行われた<sup>32)</sup>。一方、1991年に中間に堰を設けた横型精錬炉による向流式精錬方式の脱硫・脱炭試験も行われたが、1994

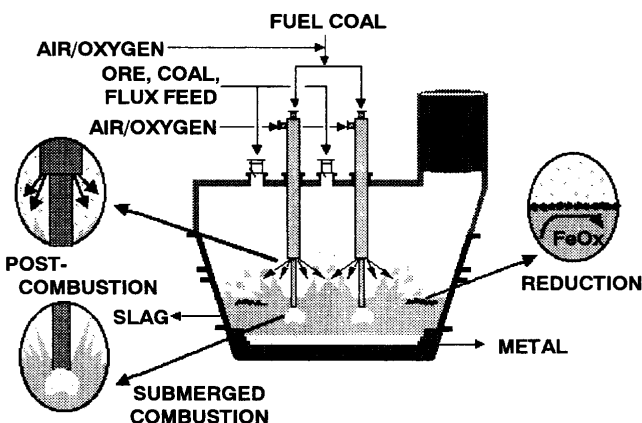


Fig. 18. Configuration of commercial AusIron smelter.

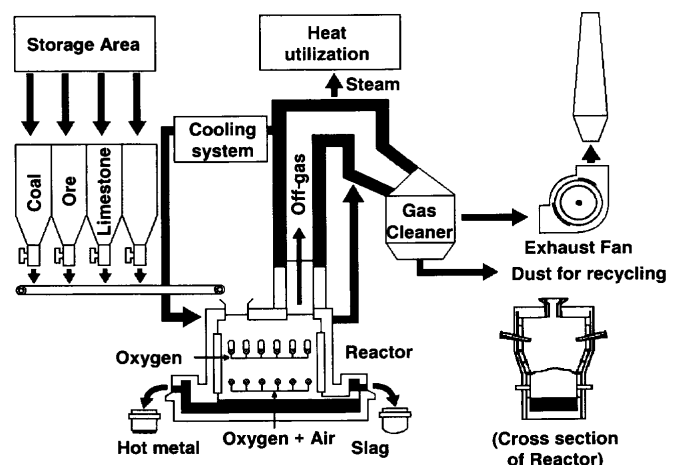


Fig. 19. Configuration of ROMELT process.

年、開発を溶融還元に絞り、製鉄所からの酸化鉄廃棄物の溶融還元炉による処理に変更し、1995年DOEからの補助が得られず開発が中断された。

#### 4.5 CCF および CleanSMelt

CCF (Cyclone Converter Furnace) および CleanSMeltは粉鉱石を溶融還元炉の炉口に直結したMelting Cycloneと称する特殊な円筒型炉を介して装入する方式である。Melting Cycloneにサイドランスから酸素を接線方向に吹き込むことによって溶融還元炉の発生ガスを燃焼させるとともに旋回ガス流を発生させ、同様に吹き込んだ粉鉱石 (<2mm)を20から25%程度に予備還元するとともに溶解する<sup>33)</sup>。したがって、溶融還元炉本体に鉄鉱石は溶融状態で装入されることになる。このプロセスは元々Hoogovensの発案に端を発するものであり、開発の初期段階の1989年から1992年まではBritish Steel Corp., Hoogovens (ともに現Corus), Centro Sviluppo Materiali (CSM) が欧州鉄鋼委員会 (ECSC) の補助金を得て共同開発していたが、それ以降Hoogovens/BSCとCSMはそれぞれCCF, ClenSMeltの名称で別個にECSCの補助を得て開発した。

HoogovensとBSCはMelting Cyclone単体 (内径2m, 20t/h規模) の開発を、Ijmuiden製鉄所で実施し、溶融還元炉本体に関してはAISIより技術供与を受けて年産50~70万tの実証プラントの商用化活動を行ったが結果せず、開発が中断されている<sup>34)</sup>。

一方、CSMは1995年、Ilva (現Riva) Taranto製鉄所に5t/hのパイロットプラントを稼働させ、CleanSMeltの名称で開発<sup>35)</sup>が行われた。CleanSMeltのパイロットプラントのフロー図をFig.20に示す。この図には操業に関する諸数値が付記されているが、石炭ないし鉱石品位などは開示されていない。CCFとは異なり、CleanSMeltでは、鉱石と酸素が別個にMelting Cycloneに装入され、また溶融還元炉本体には上下二段の横吹きランスが設置されており、下段ランスからは石炭と酸素が、上段ランスからは酸素のみが供給される。この部分での目標二次燃焼率は30~40%であり、Melting Cycloneで最終的に決まる二次燃焼率は80%としている。溶融還元炉本体は400kPaで操業されている。

#### 4.6 COREX

COREXは現在、唯一商用化 (南ア, ISCOR社: 日産1000t, 韓国, POSCO社, インド, Jindal社など: 日産2000t) されている一般炭を用いた高炉以外の製鉄法である。溶解・ガス化炉に装入された一般炭は酸素により燃焼・分解され、還元ガスとしてシャフト炉に導入される。シャフト炉内では塊鉱石ないしは鉱石ペレットを金属化率約95%まで還元し、これを溶解・ガス化炉で溶解するプロセスである。POSCOでの日産1,000tから2,000tへのスケールアップの段階で、溶解・ガス化炉を安定に操業するためには、粉炭が使用できない上、10%程度のコークスを要すること、また還元ガス量確保のため石炭は揮発分の最

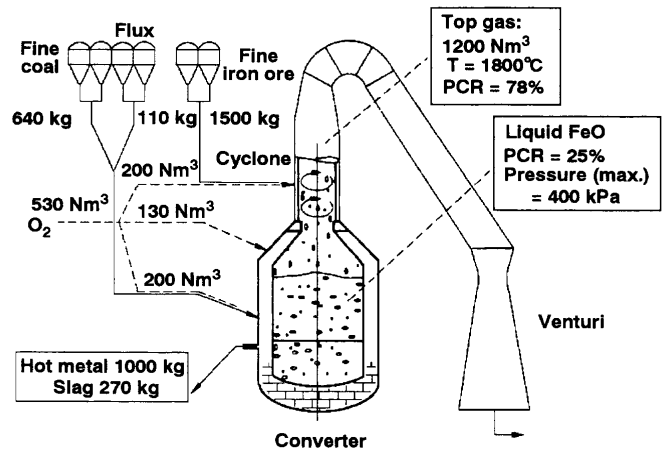


Fig. 20. CleanSMelt pilot plant at Taranto.

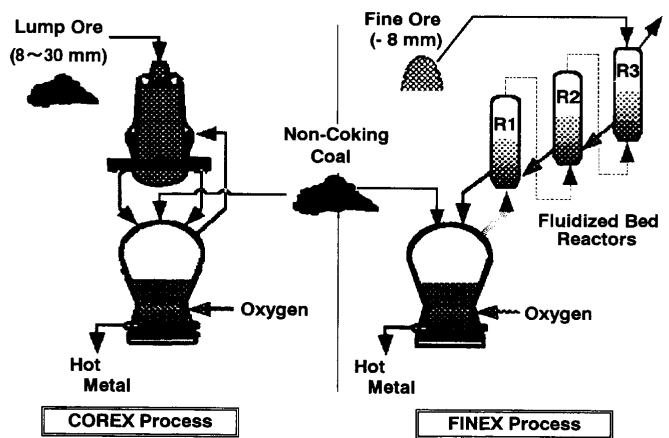
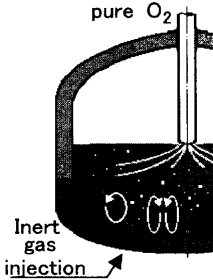
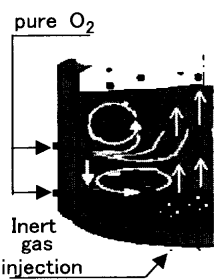
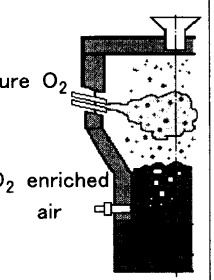
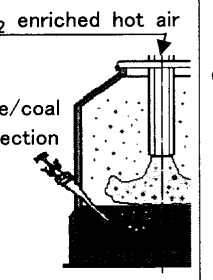
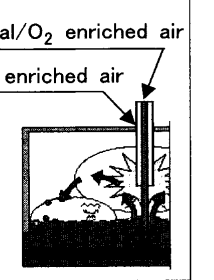


Fig. 21. Comparison of FINEX process with COREX process.

適値が存在することなどが判明し、石炭の品位に関する制約が露呈した<sup>36)</sup>。現在は石炭種の選択とシャフト炉での金属化率の安定化などの対策により、3~5%程度にコークス所要量を低減している由報告されている<sup>37)</sup>。鉱石の還元はシャフト炉でほとんど完了させることから還元に必要なガス量が多く、溶解・ガス化炉の石炭原単位も高い。したがって、系外への発生エネルギー量も必然的に高くなり、Jindal Vijayanagar Steel社では日産2,000t容量のCOREX 2基からの発生ガスから130MWの発電設備2基を稼働させている<sup>38)</sup>。また、南アフリカのSaldanha Steel社においては直接還元鉄製造プロセス (MIDREX) を併設し、日産2,500t程度のDRIを生産している<sup>39)</sup>。

POSCOにおいては鉱石粒度の制約を解消するためシャフト炉の代わりに3段の気泡流動層を用いるFINEXの開発<sup>36)</sup>が行われており、現在日産2,000tのCOREXからの発生ガスを分流させる形で日産150t規模のパイロット流動層炉の試験を実施している。2003年までにCOREX本体と直結し、年産60万規模にする計画であり、その後2010年に改修時期を迎えるポハンの第1, 2高炉をFINEXに置き換えるほか海外への技術移転を推進する予定であるとして

Table 3. Comparison of emerging in-bath smelting technologies.

process	DIOS	CleanSMelt	ROMELT	Hismelt	AusIron
Schematic drawing of smelter					
PC location	in foamed slag bath	in foamed slag bath	in slag and top space	in top space	in top space
PC	by pure oxygen	by pure oxygen	by oxygen enriched air & oxygen	by oxygen enriched pre-heated air	by oxygen enriched air
Heat transfer medium	slag	slag	slag & slag splash	slag splash	slag splash
Typical PC range*	45% (for high VM coal)	40% at smelter 80% at cyclone	higher than 70%	70% (for low VM coal)	N.A.
Hot metal production capacity of pilot plant	21 t/h (100% iron ore basis)	5 t/h (100% iron ore basis)	20 t/h (100% iron ore basis)	8.4 t/h (100% iron ore basis)	2 t/h (100% iron ore basis)
Specific smelting rate** observed with 100% ore	~2.3 t/m <sup>2</sup> h	N.A.	~0.9 t/m <sup>2</sup> h	~0.7 t/m <sup>2</sup> h	N.A.
Operation pressure	300 kPa	400 kPa	slightly negative pressure	200 kPa	slightly negative pressure
Material size	ore	8 mm under	fine	6 mm under	not limited
	coal	30 mm under	fine	6 mm under	not limited

\*: PC: post combustion, VM: volatile matter

\*\* : Smelting rate in the pilot plant published is normalized for a unit average cross sectional areas of slag and metal bath to characterize both heat providing and smelting capability.

いる<sup>40)</sup>。Fig.21にCOREXとFINEXを対比して示す。

COREXは溶解・ガス化炉の熱余裕の制約から装入される原料の予備還元率は90%以上とする必要があり溶融還元される割合はわずかである。一般に溶融還元法として整理されてはいるが、原理的には溶融還元法とは異なり、むしろ直接還元-溶解の連結プロセスと分類することが妥当である。

### 5. 各種溶融還元プロセスの比較

各種溶融還元プロセスで中心的役割を果たす溶融還元炉の技術的特長を二次燃焼・着熱技術、原燃料装入技術と必要な原燃料性状などを中心に比較し、Table 3に示す。

#### 5.1 二次燃焼および着熱技術

DIOSでは2・3・4に示したように上部の泡立ちスラグ層内に純酸素を導入し、スラグ内で二次燃焼することで二次燃焼熱をいったんスラグに伝熱させ、炉底から吹込みガスおよび酸素ジェットの攪拌作用によって還元反応場所である下部の鎮静スラグ層への伝熱を促進している。CleanSMeltもDIOSと同様に上段ノズルから泡立ちスラグ層内に酸素を導入して二次燃焼させているが、下段ノズルからは高鎮静スラグ内に酸素とともに粉炭を装入して石炭のガス化を行い、AusIronと類似した状況を作っている。還元反応領域は鎮静スラグ層、泡立ちスラグ層の両方であるとしている。

一方、ROMELT, Hismelt, およびAusIronでは炉の上部空間に酸素 (ROMELT) ないし空気を吹込み、二次燃焼を行っている。これらのプロセスにおいて二次燃焼熱のスラグ浴への伝熱は二次燃焼空間部にスラグスプラッシュを巻き上げてこれを伝熱媒体とすることを特徴としている。多量の空気を吹き込むため、炉の熱バランス改善の観点からいずれも酸素富化を行っている。Hismeltではさらに空気を熱風炉で1200°C程度に予熱しており、このため、Hismeltの熱風中の酸素レベルは30%程度が上限となる。これらのプロセスでの二次燃焼率は70%以上と高く、Hismeltを除き廃熱ボイラーにより発生ガスの顕熱回収を行っている。

公表されている鉱石100%における操業データをもとに単位浴面積あたりの生産性 (DIOSとHismeltの場合には鉄浴とスラグ浴で断面積が異なっているためこれらの平均値を浴面積とした。)を推定すると、DIOSが2.3 t/m<sup>2</sup> hであるのに対してROMELTでは0.9 t/m<sup>2</sup> h、Hismeltでは0.7 t/m<sup>2</sup> hと計算される。DIOSの場合には鉱石の予熱・予備還元の効果、約29%を反映した数値であり、この影響を除くと冷鉱石基準では約1.6 t/m<sup>2</sup> hである。生産規模のほぼ等しいROMELTと比較すると、約1.8倍DIOSの生産性は高いことになる。DIOSのこの数値は熱効率上不利な高揮発分炭をベースとした二次燃焼率45%での値あり、ROMELTの二次燃焼率が70%以上での数値であることを勘案するとDIOSの溶融還元炉における二次燃焼、着熱技術の優位性

を理解することができる。すなわち、ROMELT, HIsmeltおよびAusIronのように炉の上部空間において二次燃焼させる方法では水冷構造の炉体への放散熱が大きく、スラグ内の限定した領域で二次燃焼しているDIOSに比較して熱効率上は不利であると考えられる。

## 5.2 原燃料の装入技術と原燃料性状対応性

炉の操業圧力が常圧よりも低いROMELTおよびAusIronでは炉頂に開口部を設けることが可能なために原燃料装入装置が簡便となり、粒度並びに水分含有量に関する制約は少ない。ただし、炉内圧が低いことに加えて発生ガス量が多いため炉内ガス流速が相対的に高くなり、装入物の炉外への飛散の観点から粒度の下限値に制約を生ずるものと考えられる。さらに、HIsmeltを含め二次燃焼の伝熱媒体としてスラグスプラッシュを炉の上部空間に発生させており、スラグの一部が飛散し発生ガスダクトなどに付着する問題も懸念される。

HIsmeltおよびCleanSMeltでは原燃料はすべて炉腹から吹き込まれるために粒度制約があるが、HIsmeltでは-6mmと小粒状原燃料まで吹き込むことを可能としている。DIOSでは鉬石、石炭共に受け入れままの粒度（粒径が石炭は50mm未満、鉬石は8mm未満）での使用を可能としている。石炭は30mm以下の粒度のものを乾燥の上、重力装入している。鉬石は予備還元の段階で約0.3mm未満の粉状が主体となるため、サイクロンダストとともに炉頂から投射される。鉬石、石炭共に炉内ガス流速を加圧操業によって低下させており、歩留りよく装入する技術が確立されている。

## 5.3 商用設備へのスケールアップ

上吹きランスが1本の方式である、DIOS, HIsmelt, CleanSMeltの溶融還元炉は径の拡大、すなわち二次元的にスケールアップされる。サイドランスで操業するROMELTと複数の上吹きランスを採用しているAusIronの炉は長手方向、すなわち一次的にスケールアップされる。「二次元的にスケールアップする型式は1本ランスから供給されるガス流の到達距離の観点から一次的スケールアップの型式に比較して、限界がある。」との指摘がある。前者は程度の差はあるものの加圧型の溶融還元炉であり、後者は微減圧で操業される型式であるため、炉壁にかかる内圧を考えた場合には妥当な方向といえる。しかし、耐火物で構成される炉下部の熱膨張・収縮に伴う構造安定性の観点からは必ずしも一次的スケールアップに利があるとはいえない。高炉が数十年かけて大型化されてきたように、商用化された後の開発課題であろう。

## 6. まとめ

(1) DIOSはコークス炉並びに焼結機を必要としない製鉄法として、1988年から8年間の共同研究により、溶融

還元炉と予熱・予備還元炉との組み合わせによる全系プロセスの開発に世界で初めて成功するほか、実用上の諸課題が解決された。

(2) 高炉代替プロセスとして新規に建設することを想定した場合を想定した検討の結果は経済的に高炉法を凌駕し、かつ地球環境にも優しいプロセスであると評価することができる。

(3) DIOSの中核をなす、溶融還元炉を他の還元プロセス、例えば回転炉床炉を予備還元設備として組み合わせることにより著しく生産性が向上し、溶銑製造原価が低下する上、適用の可能性が拡大する。

(4) 国内においては2010年までに溶銑の一部はDIOSによって生産されるとの予測はあるものの、現在はずでに償却の済んだ設備が生産余力を持っている状況である。したがって、DIOS推進委員会の活動は海外における実用化に焦点を置き、各国からの活発な引き合いに対応している。

(5) HIsmeltおよびROMELTはそれぞれ西オーストラリア州とインドにおいてここ数年以内に実用化すべく環境影響評価など、建設準備段階に入っている。

(6) AusIronは同様にここ数年以内に南オーストラリア州において電力併産プロジェクトとして実用化すべく小型ではあるが実証試験ベースでの開発が行われている。

(7) COREXは韓国、南アフリカおよびインドにおいて年産60万トン規模の商用設備、計4基が稼働している。

(8) 韓国のPOSCOにおいては鉬石の還元流動層炉を採用することで粉鉬石の使用を可能としたFINEXがCOREXの商用設備を用いて開発中であり、2003年までに年産60万t規模で実用化される予定であり、2010年までに改修時期を迎えるポハンの高炉を代替する計画である。

## 文 献

- 1) 鉄鋼統計要覧, 2001年版, 日本鉄鋼連盟, 東京, (2001), 122.
- 2) 金森 健: 第146・147回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1993), 255.
- 3) K.Fukui: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 1.
- 4) K.Kawakami, M.Baba, H.Yamada, T.Tsubone, A.Kawashima and T.Hasegawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 173.
- 5) M.Kawakami, K.Saito, A.Ishizaka, H.Ito and T.Hasegawa: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 174.
- 6) K.Iwasaki, H.Fukushima, M.Kawakami, T.Hasegawa, S.Sugiyama and A.Yada: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1169.
- 7) S.Nishioka, H.Nakamura, K.Takahashi, Y.Kawai and S.Sugiyama: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 2019.
- 8) D.N.Rao: *Can. J. Chem. Eng.*, **62** (1984), 319.
- 9) T.Ariyama, S.Isozaki, T.Iwasaki and A.Kumasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1650.
- 10) T.Ariyama, S.Isozaki, S.Matsubara, H.Kawata and I.Kobayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 1317.
- 11) C.J.Cairns and G.Hoffmann: Proc. of Encosteel—Steel for Sustainable Development Conf., IISI, Brussels, (1997), 63.
- 12) S.Dieter: Proc. SEAIISI 37 Conf. on Environmental Control and Energy-Saving Practices within the Iron and Steel Industry, SEAIISI, Malaysia, (1993).
- 13) P.Bates: The Australian Academy of Technological Sciences and En-

- gineering 1998 Symp., ATSE, Melbourne, (1998).
- 14) K.Horikawa, M.Takeuchi, S.Hora, H.Ichikawa and S.Shima: SEAIISI 25th Anniversary 40 Conf. on Compact Integrated Steel Technology, Vol. 2, SEAIISI, Malaysia, (1996).
  - 15) T.Kitagawa, K.Iwasaki, O.Kojima and T.Sekiguchi: Proc. of the APEC 7th Technical Seminar on Clean Fossil Energy, East-West Center Research Program, APEC, Singapore, (2000), 153.
  - 16) H.Mizuki, S.Kamikawa, N.Rokop and K.Seto: Proc. of SEAIISI 1999 Philippines Seminar on Technologies for Alternative Ironmaking and Scrap/Substitutes Utilization Processes, SEAIISI, Malaysia, (1999).
  - 17) J.K.Pargeter and H.J.Lehmkühler: Proc. of 44th Electric Furnace Conf., ISS, Warrendale, PA, (1986), 403.
  - 18) F.N.Griscom and D.R.Lyles: *Steel Times*, **222** (1994), 491.
  - 19) L.Lehtinen, J.Hansen and N.Rokop: *AISE Steel Technol.*, **76** (1999) Dec., 37.
  - 20) R.J.Dry, C.P.Bates and D.P.Price: Proc. of Int. Conf. on New Developments in Metall. Process Technology, ed. by VDEh, Düsseldorf, (1999), 58.
  - 21) A.P.Campbell, R.J.Dry and P.A.Perazzelli: Proc. of Advanced Clean Coal Technology Int. Symp., ed. by NEDO & CCUJ, Tokyo, (1999), 143.
  - 22) Private communication, Mr. C.P.Bates, General Manager, Research, HIs melt Corp. Pty. Ltd.
  - 23) J.M.Floyd: Proc. Savard/Lee Int. Symp. on Bath Smelting, ed. by J.K.Brimacombe *et al.*, TMS, Warrendale, PA, (1992), 103.
  - 24) B.McCammon: 4th Annual Australian Iron Ore & Steel Forum, AIC Conf., Sydney, (1998).
  - 25) D.Sherrington, G.Hawkins and P.Freund: *AusIMM Bull.*, (2001), 16.
  - 26) Private communication, Mr. D.Sherrington, Manager, AusIron Technologies, Ausmelt Ltd., (Feb., 2002).
  - 27) V.Romenets: *Iron Steelmaker*, **22** (1995) Jan., 37.
  - 28) M.W.Thompson and T.R.Weston: Proc. of the 56th Ironmaking Conf., ISS, Warrendale, PA, (1997), 541.
  - 29) AMET Ltd. Home Page, News, <http://www.ametltd.ru>, (accessed 2001-10-16).
  - 30) Private communication, Mr. S.Dewan, Chief Technical Executive, Economy Research Unit, India.
  - 31) E.Aukrust and K.B.Downing: Proc. of the 50th Ironmaking Conf., ISS, Warrendale, PA, (1991), 659.
  - 32) E.Aukrust: Proc. of the 52nd Ironmaking Conf., ISS, Warrendale, PA, (1993), 341.
  - 33) H.K.A.Meijer: *Steel Times*, **224** (1996), 396.
  - 34) J.Rengerson: IISI TECHCO-31, IISI, Brussels, (1999).
  - 35) G.Malgarini, A.DeCesare, A.DiDonato, P.Granati and G.Federico: *Iron Steel Eng.*, **74** (1997) Jan., 30.
  - 36) H.-K.Lee, S.Joo, C.-O.Kang: Proc. of Int. Conf. on New Developments in Metall. Process Technology, VDEh, Düsseldorf, (1999), 36.
  - 37) S.K.Gupta: Int. Workshop on ROMELT Process, JPC-ERU, New Delhi, (2000).
  - 38) J.K.Tandon, M.K.Mirta, R.Singh and D.Gupta: Asia Steel, CSM, Beijing, (2000), 140.
  - 39) W.Schiffer, D.Siuka and H.Freydorfer: Proc. of Iron and Steel Making Seminar, Ministry of Industry and Trade, Indonesia, and PT. Krakatau Steel, Jakarta, (2001).
  - 40) POSCO Home Page, News, <http://www.posco.co.kr/en/>, (accessed 2001-11-08).