

最近の直接製鉄法

原 善 四 郎

現代製鉄法の主流を占めている高炉は、各種の技術的改良によって大容量、高熱効率、低コークス消費量の方向へ進むことのない前進を続けているが、その前途にまったく問題がないわけではない。すなわち、高炉の大容量化とともに設備費の巨額化による所要資本の増加は現代の大企業にとっても調達に困難を感じしめている。また同じく大容量化ともなると、ますます強いコークスが必要になるにもかかわらず、そのようなコークスの製造に適する高粘結性炭は減少しはじめているし、一方石油化学の発達によってコークス炉の副産物の価値が低落してきたという事情もあって、高級コークスやあるいはコークスそのものを用いない新製鉄法の出現が期待されている。また鉄鉱石の事情からみて、高炉精錬に適した高品位塊鉱が次第に減少し、粉鉱が増加してきた問題もある。この問題は団鉱法や焼結法、特に自溶焼結の発達によってほとんど解決されたが、粉鉱を予備処理することなく直接に精錬できれば、その方がさらに有利であることはいうまでもない。

このように高炉による製鉄法の将来に横たわる問題点を解決する意味で、高級コークスを用いないで粉鉱からも鉄鋼を大量規模で経済的に生産しうる製鉄法に対する要望は近年とみに強くなり、特に鉄鉱石から鉄鉄という形態を経ないで鉄鋼を生産する直接製鉄法に再び大きな関心が寄せられている。

この直接製鉄法は、戦前から、鋼屑に代わる海綿鉄の製造や、低品位粉鉱の高炉装入物としての予備処理などを目的として、各種の方法が行なわれ、戦後はさらに各種の新技术を採用して数十種に上る方法が実施あるいは研究されている。ここにそれらの方法を概観し、高炉法に代わって将来の製鉄法となるために直接製鉄法の指向すべき方向を探ってみよう。

まず現在すでに相当規模の工業的生産を行なっている諸方法から考えてみよう^{1)~3)}。

Höganäs 法 これは 4~200 メッシンの精鉱を、4 メッシン程度のコークス粉および石灰粉とともに、耐火物製のサヤに装入し、このサヤを台車に乗せてトンネル炉に送り、最高温度 1,000~1,100°C、12~30 時間の加熱を含めて、約 70 時間を経て、鉄鉱石を還元して海綿鉄を得る方法である。この場合は固体 C と酸化鉄ないし残存空気との反応によって生ずる CO が酸化鉄を還元するのであるが、この CO は鉄鉱石周囲に停滞しているから、反応生成物である CO₂ の除去は遅れ、反応は緩慢である。また、鉱石中の脈石はそのまま海綿鉄中に残存する。ただこの方法の原理はきわめて簡単であり、還

元中に鉄鉱石が静止しており、またコークスによってサヤ壁と隔てられているから、生成海綿鉄のサヤへの付着は問題にならず、安定した操業を行なうことができ、現在、スウェーデンの Höganäs で年間 25,000 t、アメリカの Riberton で年間 29,000 t の海綿鉄を生産している。この海綿鉄はさらに粉碎磁選して、溶接やガス切断用鉄粉および粉末冶金用鉄粉として供給されている。この Höganäs 法が反応速度も遅く、脈石の分離もできないにもかかわらず、経済的に成立しているのは、原料としてスウェーデンの富鉱を用い、製品として鉄鉄よりも高価な粉末冶金用鉄粉および高級鋼製造用海綿鉄を出していることにあると考えられる。

Wiberg 法 これは立型炉の上部から塊鉱を装入し、下部から高温還元ガスを送って還元を行なうもので、還元帯を通過したガスの一部は高温送風機で炉外に導いて電熱式再生炉で H₂、CO を富化したのち炉の下部に戻し、他の一部は予備還元帯に導いて予備還元を使用するとともに、さらにその上部で空気を吹き込んで鉱石の予熱に使用する。

この方法は熱経済の面ではきわめて優れており、鉱石周囲を還元ガスが流通する点でも Höganäs 法より優れているが、ガスの流通をよくするためには塊鉱を用いるの必要があり、したがって大きい反応速度は期待できず、また還元率を高めると生成海綿鉄の炉壁への付着を生ずるおそれがある。さらに脈石や P の分離除去が不可能なことから鉱石の選鉱や予備処理が必要であり、還元ガス再生炉には大きな電力費を要する。電力の豊富なスウェーデンでは、鉱石の脱 P 処理や高温送風機の研究を積み、この方法を電気製鋼用の海綿鉄製造に活用して、年産 20,000 t 程度の炉が数基稼働している。

HyL 法⁴⁾ 塊鉱に高温還元ガスを流通して還元する方法の一つに Hojalata y Lamina 社の方法がある。これは塊鉱をレトルトに装入して、ここに変成天然ガスを加熱した H₂-CO 混合ガスを導いてバッチ式に還元を行なう。この方法は還元中、鉱石が静止している点では Höganäs 法に類似して、鉱石の付着が操業を妨げることはない。ただ塊鋼を使用し、還元温度が 1,000°C 止まりである点は、反応速度および脈石や P 分離の不能という欠点で Höganäs、Wiberg 法と共通している。この方法は、高炉建設の資本に不足し、高粘結性炭の資源を欠き、かつ鉄鉱石の富鉱と天然ガスに恵まれているメキシコにおいて、戦後屑鉄輸入防止をめざして開発されたもので、現在 HyL 社の Monterrey 工場が日産 200 t を生産し、さらに Fierro Esponja 社で日産 500 t の工

場が昨年完成した。

RN 法⁵⁾ 鉄鉱石を静置することなく積極的に攪拌して還元剤との接触をよくして、還元を行なう方法として各種の回転炉法があるが、それらの中でこの方法は、25 mm 以下の粒状鉄石を多量のコークスおよび少量の石灰とともに、長尺の回転炉に装入し、排出側からガスまたは重油によって 1,100°C 程度に加熱し、生成物の融点以下で還元を行なうもので、特に回転炉の全長にわたって取りつけた空気取入口の弁の調節による二次空気補給量の加減によって炉の全長にわたる炉内の温度および雰囲気制御を正確に行ないうる点が特長である。還元生成物は一種の海绵鉄であるが、これを徐冷したのち、残存コークスを篩分けし、湿式粉碎と磁選をくり返して得た鉄粉をブリケットに成形する。回転炉法は一般に炉温の制御が困難であって局部的温度異常による装入物のリング形成や耐火物の損傷があって、円滑な操業を期し難いという欠点があるが、この方法は非熔融還元であり、しかも過剰コークスを使用して還元鉄の粘着を防止しているほか、温度制御が容易という利点とあいまって、回転炉法としては最も実施容易と考えられる。さらに石灰その他の添加剤によって、P, S を除去しうることは注目すべきである。ただし、低温還元であるため、脈石の分離は磁選によらざるを得ない。この方法は戦後アメリカで Republic Steel 社と National Lead 社の協力によって開発され、現在 Birmingham で日産 60 t のパイロット・プラントが運転されている。

Krupp-Renn 法 この方法は第二次大戦前からドイツで高 SiO₂ 質貧鉄の処理を目的として開発されたもので、長尺の回転炉に鉄石（粒度 20 mm 以下）をコークス・ブリーズや無煙炭粉などの固体還元剤とともに装入し、排出端から微粉炭、コークス炉ガスなどで加熱して、炉内で予熱、還元、粒鉄生成を順次に行なう方法である。還元帯の温度は 600°~1,100°C、ルッペ生成帯の温度は 1,200~1,300°C である。この方法の最大の特長は、鉄石が還元後高温に加熱されて、脈石部が鉄滓となって半熔融状態となり生成された金属鉄が凝集して粒鉄を形成することである。これによって低温還元では不可能な脈石の分離が行なわれ、一種の熱選鉄が行なわれるわけであるが、高温で半熔融鉄滓を生成するため操業のいかんによっては炉内にリングを形成したり、耐火物の損傷がいちじるしい。現在、ドイツでは最大日産 650 t の炉を含む数十基が稼働あるいは建設中であり、わが国でも川崎製鉄久慈工場が稼働し、北鮮では清津で日産 60 t 炉 6 基が稼働している。

Basset 法, Sturzberg 法 回転炉法でも Krupp-Renn 法よりもさらに加熱温度を高め(1,300~1,400°C)、熔融還元を行なって鉄鉄をつくる方法で、前者はデンマークで日産 100 t の炉が稼働し、脱 S 率のよいことから

硫酸滓などの高 S 鉄石から鉄鉄の製造に利用され、後者はドイツで含 Zn, Sn, Pb, Ti 鉄石の処理に日産 240 t の炉が使用された。これらの方法は加熱温度が高く燃料消費が大きい、鉄石から鉄鉄をつくるものであり、さらに同じ炉内で製鋼も行なうことができる。わが国では東洋チタニウム工業の福田氏が燃料として重油を用い、酸素を利用することによって製鋼実験に成功している。炉材の選定や操業に注意を要する点など、問題は多く含まれているが、高級コークスによらず、粉鉄から鉄鉄ないし製鋼を行ないうる点で、この方式は一つの方向を指示しているものである。

H-iron 法^{6),7)} 回転炉法では炉体を回転することによって装入物と還元ガスとの接触をよくするのであるが、戦後、石油工業方面で発達した流動法を利用して、粉鉄を還元ガスによって浮遊状態にして還元を促進するいろいろの方法が出現し、その中でこの H-iron 法が現在 Allan Wood Steel 社で日産 50 t の工業的生産に入っている。この方法は Hydrocarbon Research 社が Bethlehem Steel 社と協力して開発したもので、20~200 メッシュの精鉄を予熱して還元塔に装入し、ここに約 540°C、30 kg/cm² の H₂ を送ってバッチ式に流動還元を行なうもので、排ガスは水分を水冷および強制冷却によって凝縮捕収したのち、加熱して循環使用する。この流動還元法は粒度の小さい鉄石を還元ガス中に浮遊させるから、還元ガスと鉄石の接触が良好で反応も早いはずであるが、常圧で反応速度が早い温度では、還元された鉄粉同士が凝集して全体が流動しなくなって操業を阻害する。H-iron 法では還元ガスを高压にすることによって、比較的低温で還元を行なうことを可能にし、かつガス中の反応生成物である水分の凝縮除去を容易にしている。それにしても還元ガスとして H₂ を用いる以上、その価格が問題であって、当初は天然ガスや LP ガスの廉価な地方でなければ工業化は困難と考えられていた。また低温還元である以上、脈石の分離は不可能であって、富鉄以外には利用できないのであるが、Allan Wood 社では原料鉄鉄石として同社の Scrub Oaks 鉄山の磁鉄鉄精鉄 (Fe 71%) を用い、粉末冶金用鉄粉を生産することによって工業的生産に入っているのである。

回転炉-アーク炉併用法 鉄鉄石を石灰石、コークスとともにアーク炉に装入して鉄鉄をうる電気製鉄法は電力の豊富なスカンジナビヤ諸国で実施され、わが国でも砂鉄についてこの方法を用い、すでに 10,000 kVA 以上の大型炉も出現している。この方法も一種の直接製鉄法と考えることができるが、さらにこの電気炉から出る高 CO の排ガスを利用して回転炉で鉄石を予備還元する方法は、明らかに直接還元法とみなされる。アーク炉による製鉄法では炉内から多量の CO を発生し、これはもちろん鉄石の還元にあずかるのであるが、鉄石が

粉粒のときは装入物層を攪拌して電力効率低下の原因になる。この CO を活用して鉍石を予備還元すれば電力消費の減少と炉況安定という二重の効果がある。ただこの方法では装入物の電気抵抗が低くなるため、原料装入の方式や電極の形状と使用法は従来のアーク炉と変える必要がある。

スカンジナビヤ諸国では豊富な電力を用いて Tysland Hole 炉で電気製鉄を行なっているが、その炉頂ガス (CO 72%) を鉍石の予備還元を利用しており、わが国の東北電化 K K 大間田工場でも砂鉄の電気製鉄において回転炉による予備還元を行なっている。カナダの **Strategic Udy 法**⁸⁾ もこの一種で、ナイアガラの電力を利用して含 Cu や含 Ti 鉍石から製鉄を行なっている。ノールウェーの **Elektrokemisk 法** もその一種であるが、アーク炉としては単相回転炉を採用して装入物の均等装入と、電極から炉底への通電による電流分布の均一化をはかっている。

以上で相当規模の工業的生産を行なっている直接製鉄法を概観したが、これらのうち、還元鉄の融点以下で還元を行なう方法はそれぞれの特長を生かし、原料と製品種目の選定を適切にすることによって工業的に成立しているものであって、このままでは一般鉍石を対象として高炉に代わる製鉄法になりうるとは考えられない。一方、溶鉄の得られる Sturzberg 法は、燃料を多く要することや炉の構造に問題はあるが、その原理は将来に発展する要素を含んでいると考えられる。回転炉—アーク炉法は電力の廉価な地方ですでに成立している電気製鉄法をさらに改良したもので、現状でも高炉製鉄に向かない含 Ti 鉍や含 Cr 鉍の製鉄には好適であり、将来原子力発電などで電力価格が低下するならば高炉に代わりうる可能性がある。

ついで現在小規模生産段階や試験研究の段階にある諸方法に目を向けてみよう。

固定床に還元ガスを流通する諸方法の中で注目すべきは、Ontario 研究財団が Republic Steel 社と協力して開発を進めている **O. R. F. 直接製鋼法** である。この方法は移動火格子の上に磁鉄鉍の粉精鉍を載せてトンネル炉に送り、CO-H₂ 混合の高温ガス (1,100°C) で還元と同時に還元鉄粉の焼結を行なわせ、この焼結体を直ちに熱間圧延して板ないし棒材を得るというもので、装入物は還元の前に還元廃ガスによって 1,200°C の酸化処理をうける。還元鉄中の C 量は、還元ガス中の CO 濃度の調節によって制御できるから、製品としては任意 C 量の鋼板が得られるわけである。この方法は直接製鉄法と粉末冶金法を組み合わせることによって直接製鋼にまで進むことを企図したものであるが、脈石の分離は不可能であるから、原料として精鉍を用いる必要があり、一般的な製鉄法とはなり得ない。しかし普通の製鋼過程にお

けるインゴットの分塊圧延のような大きな仕事を要しないから、Ni や Co も還元できる点を生かして特殊鋼板などの方向には発達の可能性があると考えられる。

回転炉法の中で還元鉄の融点以下で還元を行なう方法は、操業容易という長所はあるが脈石の分離は不能である。そこでこれと電気炉を組み合わせた回転炉—電気炉法が実現しているわけであるが、この方法はまた電力費が一つの制約になる。この還元鉄の熔融を電力によらず石灰などの燃料による方法として、イリノイ大学が鉍山局と協力して開発中の **Flash 直接製鋼法**⁹⁾ がある。これは回転炉で予備還元したペレットを、背の高い熔融炉上部から落下浮遊させつつ、下方から吹き上げる高温 (1,500°C) ガスで還元と熔融を行なうもので、ペレットの浮遊には粉鉍の場合よりも大きなガス流速を要するから、還元ガスの利用率の点で問題はあるが、溶鋼をうるという点では注目すべきものである。

流動層を用いた還元法は上述の H-iron 法のほかに各国で各種の方法が研究されている。

Nu-iron 法¹⁰⁾ これは U. S. Steel 社が開発を進めている方法で、還元ガスは H₂ を用いるが、還元温度を 650~700°C に選んで反応速度の増大および還元鉄の固結と自己発火の防止をはかり、かつ還元を Fe₃O₄→FeO→Fe という 2 段に行なうことによって、H₂ の利用率の増大をはかっている。すでに U. S. Steel 社ではパイロット・プラントによる試験を終えて、日産 2,000 t の装置も設計完了したが、アメリカ国内では H₂ の価格が主たる原因となって高炉よりも経済的に有利という見通しが得られず、建設には至っていない。

Esso-Little 法¹¹⁾ これは、アメリカの A. D. Little 社が開発中のもので、H-iron 法と Nu-iron 法が還元ガスに H₂ を用いるのに対して、2 段流動塔の下底から天然ガスと空気を吹き込み、天然ガスの変成反応と酸化鉄の還元反応を同時に行なわせることによって吸熱反応である還元に必要な反応熱を変成反応の発熱から補給する点がいちじるしい特長である (H-, Nu-iron 法はいずれもこの反応熱は鉍石および H₂ の予熱によって補給している)。この場合、還元されつつある鉄鉍石が変成反応の触媒として作用するものと考えられ、炉内温度の均一化および制御は相当困難と予想される。温度上昇による固結を防止するため、還元率を犠牲にして FeO を残存させる必要があるのも、このような事情によるものであろう。

Stelling 法¹²⁾ これはスウェーデンの Stelling 教授の創案によるもので、鉄鉍石の還元ガスとして CO を用いると、600°C においては CO が C と CO₂ に分解することなく FeO と反応して Fe₃C を生じ、この Fe₃C と FeO の混合物はその温度範囲では固結しないという現象を利用して、流動還元法の問題点である還元生成物

の固結を防止する方法である。還元生成物である Fe_3C と FeO の混合物は 750°C 以上に加熱すると、 CO を発生しつつ焼結して金属鉄が得られる。

流動還元法は以上のように、反応速度を早くするためには高温を用いる方がよいが、その場合は還元鉄の凝縮固着が生ずる点を解決しなければならない。この点で、わが国の資源技術研究所の実験によれば、流動層の下底を円錐形にすると、砂鉄を CO-H_2 混合ガスで還元する場合、 950°C でも固着がみとめられないという。またイギリスの Ezz, Wild¹³⁾ も、きわめて細長い円錐形の還元塔の下底から H_2 を吹き上げて、鉱石粒子を浮遊させつつ還元するという方法によれば、赤鉄鉱でも $1,100^\circ\text{C}$ まで固着することなく還元できると報告している。このように流動還元法における還元鉄の固着防止の問題は、還元塔の構造その他についてなお研究すべき点が多い。

流動還元法のもう一つの問題点、すなわち低温還元で脈石分離が不能という点を解決するには、溶融過程を組み合わせるほかはないが、わが国の NF 式直接製鋼法は流動還元を経た還元鉄粉を重油のガス化室兼溶解室で溶融して溶鋼を得ることを提唱している。このガス化室で生成する高温還元ガスを円錐炉底式流動還元炉に導くのである。重油を使用した Stürzberg 法が可能であることと考え合わせて、重油のガス化室における還元鉄の溶融というこの方法は十分研究に値するものである。

電気炉法も諸方法がいくつか研究されている。ベルギーの Albert de Sy 法¹⁴⁾ は電気炉として低周波誘導炉を用い、その湯溜りの一部で溶銑に鉱石を装入して脱炭製鉄を、他の一部で溶銑にコークスを添加して加炭反応を行ない、脱炭反応で生ずる CO を回転炉による鉱石の予備還元を利用するという方法である。この誘導炉は溶銑層自体に電流が流れて熱を発生するから熱効率が良く、アーク炉に比較して電力消費が少ないという。またイタリーで研究されている Lubatti 法は、平型炉で溶銑層の上に比較的厚い溶滓層をつくり、この層に電極を挿入して直接に $1,500\sim 1,600^\circ\text{C}$ に加熱しておき、その上に粉銑と粉コークスの混合物を $15\sim 20\text{ cm}$ の厚さに装入して、装入物層における鉱石の還元、還元鉄とスラグ層との接触による溶融を行なうという方法であって、溶滓層の通電加熱によって上述の回転炉—アーク炉法に伴う問題点を解決しているが、この高温溶滓層による炉材の浸食には問題がある。

さきに述べたように、流動法でも回転炉法でも、還元鉄の溶融過程を組み合わせて直接製鋼にいたる方向が研究されはじめているが、この方向をさらに進めて粉銑と低質燃料を用いて、鉱石の融点以上の高温における細粒鉱石の溶融還元を行なう方法も提唱され、研究が開始されている。

その一つはイギリス鉄鋼研究連盟 (BISRA) で研究中

の Cyclosteel 法である。これはサイクロンの形状の炉内に、接線方向から粉銑石と微粉炭および空気を吹き込み、微粉炭の燃焼によって生ずる CO によって気流に乗って旋回する粉銑石を溶融還元し、密度の高くなった溶銑粒子をガス旋回運動によってサイクロン壁で捕収し、その壁を伝って下方の溶滓—溶銑層に落下させ、ここで溶銑を得るという方法である。これは微粉炭のガス化と同時に還元を行なわせる点で使用空気量やその中の O_2 分圧の制御の問題、溶銑粒の旋回ガスによる分離の問題、溶銑や溶滓の付着する炉壁材料の問題など解決すべき幾多の問題を含んでいるが、粉銑と低質燃料による製鉄ないし製鋼という将来の課題に立ち向かう一つの方向を示している。

また Ontario 研究財団で研究中の Jet 製鉄法もこの方向に沿うものである。これは磁鉄鉱粉を天然ガスと酸素の混合気流とともに立型炉に垂直下方に吹き込み、天然ガスの燃焼と磁鉄鉱の赤鉄鉱への酸化熱で炉内に熱を供給し、さらにこのジェットの周囲から吹き込む過剰天然ガスによって炉底に高温の還元性雰囲気をつくり、ここで赤鉄鉱を溶融と同時に還元する方法である。排出ガスは高熱量を保有しているが、これは酸素発生装置の動力に利用する。この方法も開発の初期段階にあって、その良否を簡単に論ずることはできないが、溶融状態における還元の反応速度はきわめて大きいことが予想され、Cyclosteel 法とともに注目すべきものである。

以上のように、直接製鉄法の最近の研究の方向は、海綿鉄製造から前進して、還元と溶融の両過程を組み合わせるか、あるいはさらにそれらを同時に行なう直接製鋼の方向に進んでいる。これらの新研究は、アイデアの提出に止まっていたり、開発の緒についたものばかりで、技術的に成立する見通しもまだ得られていないが、反応速度の増大と鉱石中の脈石の分離という点から考えて、高炉に代わる製鉄法は当然この方向を指向すべきものと考える。

(1960. 8. 11)

文 献

- 1) 鉄鋼技術共同研究会報告；鉄と鋼，46 (1960) 1, p. 64~85, および同研究会直接還元法分科会提出資料
- 2) P. E. Cavanagh; J. of Metals, Dec. (1958) p. 804~809
- 3) Von J. Willems; Stahl und Eisen, 79 (1958) Nr. 2, p. 74~80
- 4) F. W. Starratt; J. of Metals, May (1959) p. 315~318
- 5) A. Stewart, H. K. Work; ibid, July (1958) p. 460~464
- 6) A. M. Squires, C. A. Johnson; ibid., April (1957) p. 586~590
- 7) R. A. Lubker, K. W. Bruland; ibid., April (1960) p. 321~324
- 8) M. L. Udy, M. C. Udy; Metal Progress, Dec. (1958) p. 92~94
- 9) J. J. Burke; J. of Metals; Nov. (1959) p. 747
- 10) T. F. Reed, J. C. Agarwal, E. H. Shipley; ibid, April (1960) p. 317~320
- 11) Anon; Chemical Engineering, Jan. (1957) p. 130~134
- 12) O. Stelling; J. of Metals, April (1958) p. 290~295
- 13) S. Y. M. Ezz, R. Wild; J. of the Iron & Steel Institute, Feb. (1960) p. 211~221
- 14) A. de Sy; J. of Metals, April (1959) p. 265~269