

日本製鉄技術の性格とその課題

Characters and Problems of Japanese Iron and Steel-Making Technology

館 充*

Mitsuru TATE

高炉—転炉—ホットストリップミルという体系によって代表されるわが国の製鉄技術の特徴は巨大化と急速化の点で世界の先頭をきっている点にある。その今後の発展にとって重大な障害になるとみられるのは粘結炭の不足であり、これにいかに対処するかが最重要課題である。粘結炭にまったく依存しないプロセスも考えられるが、目下は開発の段階であり、当面は高炉のコークス比を可及的に低下させる方法を追求すべきである。

1. 現代日本製鉄技術の特徴

日本の昨年度の鉄鉄、粗鋼、圧延鋼材の生産高はそれぞれ 6,100 万トン、8,500 万トン、6,300 万トンであり粗鋼生産高は戦前最高の 10 倍をこえるにいたった。

鉄鉄の 99% は高炉で、粗鋼の 77% は転炉でつくられる。圧延鋼材の 90% は普通鋼であり、普通鋼圧延鋼材の 67% は各種板材、とくに 45% 近くが広幅帯鋼である。すなわち板材の大半、したがって普通鋼圧延鋼材の約 50% がホットストリップミルでつくられることになる。そこで現代日本の製鉄工場の典型的な技術体系は高炉—転炉—ホットストリップミルという工程で表わされる(もっとも転炉とホットストリップミルの間には造塊と分塊または連続鋳造による鋼片の製造工程があるが)。したがって製鉄技術の特徴をみるにあたってはまずこの工程を構成する個々のユニットについて調べる必要がある。

(1) 高炉の巨大化と急速操業化

かつては大型高炉といえ、内容積 1,000 m³、出鉄量 1,000 t/d のいわゆる 1,000 トン高炉をさすのがふつうであった。ところが 1959 年戸畑に 1,600 m³ の第 1 高炉がつくられてから、大容量化が急ピッチですすみ、昨 1969 年福山で 3,300 m³ の炉が動きだし、近く大分に 4,000 m³ の炉が出現しようとしている。高炉のこの大容量化の点で世界のトップを競っているのは日本とソ連でやや古いデータであるが、1968 年 8 月の調査によれば、世界の 2,000 m³ 以上の高炉 34 基のうち日本が 14、ソ連が 16 基を占めている。しかも日本の炉はすべて 20 位以内にあり、1~4 位が日本である。

他方高炉の生産速度の尺度である出鉄比(内容積 1 m³ あたり 1 日出鉄量トン)も非常に大きくなっており、かつての約 1.0 から 1968 年全高炉平均の 1.73 と増大した。この数字が現在ももっと大きくなっていることはたしかであり、とくに最近つくられた 2,000 m³ 以上の炉

の出鉄比はほとんどが 2.0 以上であることを考慮する必要がある。こうして近く 1 基 1 日 11 万トン (7t/min)、連続出鉄の時代を迎えようとしている。

すなわち巨大化、急速化、連続化が高炉の特徴といえる。

(2) 製鋼の転炉化と急速化

1958 年日本鋼管(川崎)と八幡に LD 転炉 (50 t) が導入されてから、それまで製鋼装置の主流を占めていた平炉の転炉による置きかえ、すなわち転炉化が急速にすすみ、現在は前述のように粗鋼の 77% が転炉でつくられる。残りの大部分(全体の 16%)は電気炉である。こうして平炉と転炉の地位が逆転したことは、なによりもまず製鋼プロセスが急速化されたことを意味する。事実最近の実績によると全国平均の製鋼時間 1 hr あたりの生産速度は、平炉の 25 t/hr にたいし、転炉は 180 t/hr となっており、転炉化により 10 倍近くスピードアップされたことになる。もっとも平炉の生産性はその容量、溶鉄配合率、酸素使用量などによって大きく左右されること。これにたいし日本の平炉の容量が、受注ロットが小さいという理由で一般に小さかったこと、また鉄鋼一貫工場のすべてが転炉化し、大型で高能率の平炉が稼働していないことを考慮せねばならない。さらに製鋼法としてどのプロセスを選ぶかは、その国の諸条件、とくに屑鉄と鉄鉄との需給関係や価格などによって規定される面があり、転炉の比重が大きいが、ただちに技術水準が高いことを意味するものとはいえない。

しかし転炉が単に生産速度の点だけでなく、多様な鋼種の製造法としての適応性の点でも、製出鋼の質の点でも、平炉に勝るといえることが、最も大々的な転炉化を行なった日本の実績で示されたという点が重要である。このためいまでは平炉王国であった米・ソ、トーマス転炉を伝統的に保持してきたドイツなどでも、LD 転炉化が進みつつあり、日本が転炉化のテンポと水準の点で世界をリードしたことは誇られてよい。なお転炉の容量は当初 50~100 t がふつうであったが、最近では 250 t ないし

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

それ以上まで大型化しつつあり、ここでも大容量化と急速化が主要な特徴であるといえる。

(3) ホットストリップミルの発展

ホットストリップミルの大規模な導入は高炉の大容量化と製鋼の転炉化にさきがけて、1953年以降急速にすすんだ。その主要製品である広幅帯鋼の生産高は1959年の260万トンから、昨年1969の2,600万トンへと10倍になり、普通鋼圧延材のなかでの比率も20%から40%にふえている。もちろんこの間ミルそのものの技術の進歩もあり、たとえば50インチ、600m/min、半連続式といったものから、90インチ、1,000m/min、全連続コンピューターコントロール式へと能力の向上をみせ圧延速度も平均で1959年の128tから1968年の300t(いずれもロール運転1時間あたり)へとあがっている。国際的地位についていえば、昨1969年世界全体のホットミル総数140台、能力2.1億トンのうち17台、3,400万トンと第2位を占めていることを指摘すれば十分であろう。すなわち圧延工程についてもストリップミルによる板材中心の生産構造への移行によって、急速化と連続化、そして自動化という特徴を備えるにいたったといえる。

こうして個々のユニットについて、日本の製鉄技術の特徴を大型化(あるいは巨大化)、急速化、連続化および自動化という標語で表わすことができる(もっとも連続化や自動化の水準は、工程によって異なり、このいずれもが現実のものとなっているのは、ホットストリップミルだけである)。そしてこれらのユニットの大型化と急速化に伴って、一貫工場全体の巨大化もすすみ、かつて最適規模が粗鋼年産100万トンとされていたのが、現在は1,000~1,500万トンとされている。そしてこの巨大新鋭製鉄所の建設を最も盛んに行なっているのがこの日本であり、1969年の統計によると、世界の400万トン以上の製鉄所23のうち7を日本が占めている。さらに規模の点だけでなく、製品の質と価格の点でも大きな進歩を遂げ、現在産普通鋼については強い国際競争力を備えるにいたっていることは周知の事実である。

こういうわけで日本の製鉄技術の特徴は巨大化と急速化の点で世界の先頭をきいているところにあるが、高炉の急速化を裏づけている原料の事前処理、複合送風、高圧操業などの技術、LD転炉プロセスそのもの、ストリップミルそのもの、すなわちひと口にしてプロセスの性格を規定する根幹技術はすべて海外からの導入に依存してきたことを忘れることができない。むしろこうした最新の導入技術を、優良な原・燃料、大型専用船、海岸

立地、豊富でやすい労働力などの諸条件と結合して、高効率の生産を行なうという路線*にこそ、日本鉄鋼業の性格があり、上述の特徴は鉄鋼業のこうしたあり方に規定されたものであったとみるべきである。

2. 日本鉄鋼技術の発展の見通しと矛盾

(1) 見通し

約10年前1970年における粗鋼生産高は4,300万トンとみこまれたことがある。この見通しはその後数年して大きく修正されたが、その修正値もまた小さすぎたことが明らかになった。実生産高は常に予想を大きくうわまわったのである。現在1975年には1.5あるいは1.6億トンという予想にたいして、もちろん楽観論も悲観論もあるが、どちらかといえば悲観論者の声は小さい。

人口1人あたりみかけ粗鋼消費量が700kg/年をこえ米国の水準を抜いてしまったという事実、労働力、とくに若年労働力の不足が顕著になり、賃金も漸時上昇してきたという事実、公害対策が軽視できない重みをもってきたという事実など、不利な材料がめだってきたことはたしかである。ところが他方過去数10年間の鉄鋼の蓄積量が欧米諸国に比してひとケタ小さく、1967年でやっとイタリアなみの2,500kg/人に達したばかりであって、米の9,000kg、西独の6,500kgには遠く及ばないという有利な事情がある。建設、自動車、船舶などの国内市場の鉄鋼需要が依然として旺盛であることは、この事情の反映でもあって、必らずしもつくりだされた需要とばかりはいえないであろう。目下のところ生産の伸びを急速に鈍化させるような要因は探しにくいとされている。

前述した日本鉄鋼業の性格および製鉄技術の特徴は、なによりもまず生産の急上昇を強力なテコとして形成されたものであるから、このテコがもし今後も作用し続けるものとすれば、製鉄技術の発展の方向も変らなるとみることができよう。ごく最近5,000m³の高炉の建設計画が噂されたり、既設工場の能力が足りないという理由でユニットを増加するとか、敷地が狭くなったので埋立面積を増すとかいう案を耳にするのも、こうした見通しと関係があるろう。また60年代に始まった連続鋳造化の一そうの展開による連続化の推進と、工程によって水準の違いが顕著であった自動化がコンピューターコントロール化の方向で、より高度化するという新しい特徴も加わってくるものと思われる。

(2) 矛盾

しかしこうした発展が重大な矛盾にぶつかることなしに進行するとはいえない。現に前述した基本的な諸矛盾の顕在化のほか、日本鉄鋼業の性格の形成に大きな役割を演じた技術導入が次第に難しくなってきたといわれ

* 日本鉄鋼業の今日の「繁栄」がこの路線によるところ大であることはいうまでもない。しかし創造的技術の開発という見地からみて、失なうところがなかったとはいえない。この路線の真価が問われるのは今後であろう。

ている。技術体系そのものと関連した問題についていえば、転炉とストリップミルの生産性が非常に高いため、高炉と造塊一分塊（とくに造塊）の能力が追いつかないという事実がある。とりわけ造塊部門は、そこでの作業が肉体的にきびしい条件のもとで行なわれるという問題のほかに、この部門の製品である鋼塊の質が圧延材の質に決定的な影響を及ぼすという事情のため、技術的には最も問題の多い部門となっている。

しかしこれらの要因はそのどれをとってみても、逆に技術の発展を促す要因として作用するものである。現に高炉の生産性の向上という要請はその大型化と急速化を促がしたし、造塊プロセスの諸問題を解決しようとする努力が連銜や真空処理などの大規模な採用をもたらしたのである。現在直面している公害対策という、いわば従来のもとは異質的な課題にしても、技術によって解決できない問題とは考えられず、むしろそれを解決することによって、これまでともすれば見失いがちであった技術の本来の人間性をとり返すひとつの機会とすべきであろう。

現在これらのどの矛盾にもまして深刻かつ現実的な問題、すなわち原料炭需給事情の悪化という事態が生じている。

周知のように日本の鉄鉱石資源と粘結炭資源はきわめて貧困である。このため鉄石消費量の 95% は輸入鉄であり、1969 年の輸入量は 7,800 万トンに達している。石炭の方は弱粘ではあるが、国内からかなり産出されるため、輸入依存率は 80% 程度である。しかし高炉用コークスの製造に不可欠とされている強粘結炭については輸入依存率は 100% であり、強粘、弱粘あわせて 1968 年の輸入量は約 4,000 万トンである。輸入依存率の観点からみる限り将来の発展にとって鉄鉱石の需給関係の方が重大のように見えるが、鉄石についてはオーストラリアにかなり大きく依存するにせよ、南米、アジア、アフリカ、北米とソースが多角的であり、かつ開発の軌道にのったところから、長期契約によって比較的有利かつ安定に入手できるから、手放しの楽観はできないにしても一応の見通しはたつとされている。ところが粘結炭は輸入の 85% をアメリカとオーストラリアに依存し、とくに強粘結炭については 60% がアメリカとなっている。しかもこの米炭は灰分が非常に低く、かつ高炉用コークスの強度を確保するのに不可欠な低揮発分炭が大部分である。そのうえこの米炭をかなり多量に配合してつくられた低灰分、高強度のコークスが、わが国の大型高炉の高エネルギーの操業を保証してきたことからみて、米炭への依存性は量的なものだけでなく、質的なものでもあったとみねばならない。

ところでこの米炭は大西洋岸に近い地方に産出され、積出港も大西洋岸にあってパナマ運河経由の輸送によら

ざるをえないこと、また積出港の港湾能力が小さくごく大型の専用船を用いにくいことなどの不利があり、日本の鉄鋼業は輸送コストが高いことによる割高な価格に悩んできた。そしてこのことがあらゆる技術を動員してのコークス原単位低下を至上命令たらしめた結果、世界最低のコークス比という成果を生む強力な原動力となってきた。ところがここ数年間、一方において日本の鉄鋼生産の急激な上昇による需要急増、他方においてアメリカの原料炭業界の諸矛盾の深化その他の事情で需給関係がアンバランスになり、値上がりはもちろんのこと、必要量の入手すら困難になってきた。現に 1969 年度は低揮発分はおろか、高揮発分のものを含めてやっと 2,000 万トン確保しえたにすぎない。したがって今後さらに鉄鋼生産がのびるとすれば、強粘結炭の手当不能量が大きく増大するおそれがあるとされている*（現在のところ米国以上に原料炭供給能力の大きい国はないとされている）。

こうして石炭問題は日本の鉄鋼業の今後の発展を妨げる深刻な矛盾となってきたのであり、この矛盾を前述の諸矛盾と同じように、創造的な自主技術の展開の方向に作用させることを求められている。

3. 矛盾解決の方向

(1) 高炉の矛盾と直接製鉄

原料炭問題は現在日本で主として量の不足という形で深刻な様相を伴って現われたが、実は粘結炭という限りある資源に依存せざるをえないところに高炉そのものの質的な矛盾があり、「高炉によらない製鉄法」の創造こそ製鉄人の任務であるという主張は早くからなされていた。この主張はしばしば、原理的には冶金学の成立以前に確立したプロセスである高炉法は、近代的な科学あるいは工学に基づく原理的に新しいプロセスによって置きかえられるべきである、という主張と結びついていた。それはまた将来の製鉄法は鉄石からいったん高炭素鉄である銑鉄をつくるという段階を経ることなく、直接低炭素鉄をつくる方法、すなわち直接製鉄法であるべきであるという主張とも結びついていた。

実際この主張の方向に沿ったプロセスの研究・開発は早くから行なわれ、すでに第 2 次大戦前にヴィーベルグ法（シャフト炉ガス還元による海綿鉄製造法）、ヘガネス法（外熱レトルト中での固体還元による海綿鉄製造法）、クルップ・レン法（ロータリーキルン中での石炭還元によるルッペ製造法）が誕生していた。戦後にはこれらおよびその変形法の展開とならんで、石油化学工業の発展を契機とする H アイアン法その他の粉鉄流動還元法や、

* 1.2 億トンの粗鋼生産としても強粘結炭必要量は 3,000 万トン以上とみこまれる。

サイクロスチール法(粉鉄からの直接溶鋼製造法)が出現し、そのあるものは500t/dないし1,500t/dの規模で工業化されるにいたった。

しかし、こうした直接製鉄法の展開と時期を同じくして、LD転炉法という溶鉄を大量かつ急速に処理するプロセスが発明され、その嵐のような発展が始まった。溶鉄にたいする転炉の要求をみだすため、高炉は大型化され、各種の新技術によって武装され、出鉄比の点でもコークス比の点でもめざましい進歩を遂げた。溶鋼の直接製造をめざす新プロセスの大部分は存在の基盤を失った。その他の直接製鉄法も溶鉄をつくることを目的としていないということだけでなく、その生産性の点で合理化によって再生されたというべき高炉に遠く及ばないという理由で、それを駆逐できなかっただけでなく、その多くは屑鉄代用材の生産法という意味で、高炉の補完物の地位にとどまらざるをえなかった。

こうして高炉はその技術の発展によって、それ自身の備えていた可能性を開現し、古いものは新しいものに席を譲るべきだという単純な議論をしりぞけたが、直接製鉄法を不可避とする主張は、実はもうひとつの打撃を受けていた。戦後行なわれた研究によって、粘結炭という概念は現在のコークス製造法と結びついたものであり、製造法を然るべく変えることによって、弱粘結炭あるいは非粘結炭によるかたいコークスの製造も可能であることが明らかになったのである。すなわち高炉の弱点がかたいコークスに依存することにあるとしても、粘結炭に依存するということが高炉の固有の矛盾とはいえないわけである。高炉の最も本質的な矛盾はなにかという問題はつきつめられていなかったといわねばならない。

最近、原料炭の入手難が深刻になるにつれて、いわゆる原子力製鉄のような、たぶん高炉によらない製鉄法を指向するプロセスないし計画は華やかに論ぜられても、強粘結炭に依存しないコークス製造法の研究や開発を主張する声は小さい。これは新しいコークス製造法がプロセスとして未完成であり、まだまだ問題があることによることはいまでもないが、そのことよりはむしろ石炭産業そのものの将来に関する悲観論、および製鉄を含む日本の産業全体の将来のエネルギー源をなにに依拠するかという政策の次元にかかわるところが大きいとみるべきである。

現在原子力製鉄としては高温ガス冷却炉の廃熱を利用して還元ガスをつくり、このガスによって鉍石を還元し、還元鉄を電気炉で処理するという案はあるが、還元プロセスとしてどんなものを採用すべきかの問題は未解決である。また原子力発電のやすい電力を用いることを前提とする電気炉による直接製鋼にせよ、電気製鉄にせよ、コストの点はともかく、生産性の点で高炉—転炉体系に匹敵する能力をもちうるとは考えられていない。

つまるところ「高炉によらない製鉄法」は強粘結炭によらないコークス製造法と共に、まだ研究開発の途上にあるものであり、現実には高炉のコークス比を可能な限り低下させる方法の研究が当面の課題とならざるをえない。

(2) コークス比低下対策、高炉の非高炉化

さいなまで日本の高炉のコークス比は500kg/t程度(重油吹込の場合はこれをコークスに換算して)であった。大ざっぱにいうとこのうち1/3程度が還元剤源、残りが熱源として働いているといえる。ところが熱源としてのコークス必要量には、酸化鉄の直接還元反応の大きな吸熱を補償する部分が含まれており、還元のための直接・間接の必要量は1/3をこえている。実際高炉と類似の装置であるキューボラでは、装入物が銑鉄であって還元が必要ないため、コークス比は200kg/t未満となっている。したがって高炉のコークス比を本質的に下げるには、還元をコークス以外の還元剤によって行なえばよい。これに関連してコークスには装入物柱の通気性を維持するという重要な機能があり、キューボラとちがって溶鉄のほかにも多量の溶滓を生成する高炉では、融体存在域の通気維持材としてのコークスが重要な意味をもつとする見解もありうるが、われわれの研究によれば通気抵抗が問題になるのはむしろシャフト上部の固相域であり、装入物の物理的性状が理想的であれば、コークスは十分少なくてよい。すなわち極限としてはキューボラに近いコークス比を実現することは不可能でないと考えられる。

ところで還元剤をコークス以外のもので置きかえることは、すでに燃料吹込あるいは複合送風の方法でなされているが、燃料の羽口からの吹込量には、酸素を多量に利用できるという条件でもない限り、現実的な限度があり、これによるコークス比低下は50kg/t程度というのが実情であった。この理由で現在燃料を予め変成し、高温の還元ガスとして炉の適当な位置に吹きこむ方法が注目されているが、これには設備的な問題のほかに、吹きこまれたガスの半径方向への分布の程度に関連した利用効率の問題がある。他方送風温度1,200°CでかつこれをO₂40%まで富化して、銑鉄トンあたり最高235m³までの天然ガスを羽口から吹きこんで、コークス比を229kg/t下げることができたというソ連の試みもあり、酸素添加の重要性と天然ガスの有利性が注目される。こうしてやすくて大量の酸素をえることと、変成、未変成の燃料の大量吹込法の研究・開発は今後有力な方向となる。

還元剤を置換するもうひとつの方法は、事前処理の概念を拡大し、鉍石を高炉へ装入する前に他の還元剤によって予備還元することである。実際にはペレットを予備

還元することが多いから、還元ペレット装入法とよんでよい。これにもすでに実施例があり、たとえばカナダの Stelco では SL-RN 法 (ロータリーキルンによる還元鉄製造法の 1 種) でつくった Fe 89% の還元ペレット 30% を配合した結果、コークス比が 502 kg/t から 400 kg/t に下がったと報告している。しかもこのさい出銑量も大幅に増加しており、この方法の有効性は明らかであるがこれにも問題がなくはない。すなわち上の例でもそうであるが、ペレットの予備還元率 (つまり金属鉄化水準) を十分高くしなければ、高炉にとって十分な強度がえにくく、かつ効果も小さいということである。また当然のことであるが、還元ペレットは大気や炉内上部の雰囲気中で再酸化される危険の少ないものでなければならない。これらの条件をみだし、しかもコークス比の低下 (プラス出銑量の増大) の形でえられる利益が、予備還元を行なうこと自体の不利益を補って余りあるといった効果的なプロセスはまだ存在しないといってよい。したがってこの問題もまた今後の研究課題である。

こうして高炉のコークス比を本質的に低下させることにも、一定の見通しはあるにしてもまだまだ問題があるのであり、当面は上述の方法の可能な限りの複合的な適用と高炉操業そのものの十分入念なコントロールとによって、総合的にコークス比をいくらかでも下げるといふ方向に落ちつかざるをえない。またコークスの、したがって粘結炭の総消費量が莫大なものとなった現時点では、わずかのコークス節約も有効であることは明らかである。

しかしこれらの方法を徹底的に追究すれば、高炉のコークス比の低下限界とそれを規定する要因を把握することができるはずである。この結果を送風量の限界に関する追究の結果と総合すれば、高炉の生産性と経済性との 2 つの限界、すなわち高炉プロセスそのものの限界をつかむことができるはずである。同時にこの研究は還元という機能を基本的には失なった高炉、すなわち高炉にあらざる高炉の出現に導びく可能性があるという意味でも、高炉へ装入することを目標とした予備還元鉄の大量生産法、すなわち生産性の大きい直接製鉄法の開発をもたらす可能性があるという意味でも、高炉の研究の域をこえる可能性がある。こうして既存プロセスとしての高炉の極限の追究は新しいプロセスの誕生を促がすひとつの契機となりうる。

追 記

われわれはこれまで試験高炉で送風限界に関する研究を行ない、ほぼ限界規定要因としての固体装入物の流動を明らかにしえたと考えている。今後は上述の意味でコークスの問題にとりくむことによって、高炉そのものの限界に迫りたいと考える。ただし周知のように試験高炉には相似性の点での制約があり、実験室の研究と試験高炉による試験とを結合してなんらかの結論をえるにしても、それは理論的なものとならざるをえない。しかしこの結論の「高炉」による検証を経て、理論を築くことこそ試験高炉の任務であると信じている。

(1970 年 8 月 18 日 受理)

