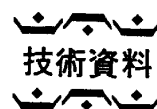


© 1984 ISIJ

東大試験高炉の歩んできた道



館

充*

The Course the Experimental Blast Furnace in the University of Tokyo Has Followed

Mitsuru TATE

1. 緒 言

東京大学生産技術研究所(以下東大生研)の試験高炉はラテライトの活用(高炉湯溜吹精法による溶鉄中 Cr の脱除)に関する研究を目的として、1954 年度に設置され、1955 年 3~4 月の第 1 次操業以来今日まで 29 次の操業が行われた。この間操業目的は未利用資源、国内資源の活用に関する試験から、複合送風、送風限界など高炉プロセスに関する試験、さらにはコークスおよびコールドボンドペレットの挙動の調査へと推移した(表 1)。高炉本体および付帯設備も 3 次にわたって行われた改造、増設を経て大きく変貌し、初期の俵を全くとどめていない。操業にあたっては当初から鉄鋼各社の多面的な援助と協力をうけたが、1964 年以降は日本鉄鋼協会に試験高炉委員会が設けられて共同研究体制が確立した。また操業には毎回全国国公立大学(主として金属工学系)の学生・院生が実習を兼ねて参加し、その延人数は 800 名をこえた。以上の経緯とその背景についてはさきに詳細な報告^{1)~3)}を行つたので、本稿では試験高炉の歩んできた道を内外の諸試験高炉の動きと対比してふり返つてみることによつて、それが果たした役割を明らかにすることを試みる。

2. 内外の試験高炉の動向

2.1 海外の試験高炉

1960 年代の初めの情報で、当時またはその至近過去まで試験高炉かつ稼働されていたとみられたのはアメリカ・ベルギー・西ドイツ・ソ連・中国などであり、1950 年頃まで動いていた BISRA の炉はすでに廃止と報告されていた⁴⁾。このうちソ連の炉(0.2 m³、中央黒色冶金研究所)は羽口が 1 本だけ、しかも羽口近傍の炉体が角型というもので、あきらかに燃焼帯(レースウェイ)の研究専用のものであつた。中国の炉(0.96 m³、冶金工業研究所、上海)は 1955 年、CaF₂ を多く含む包頭の

鉱石の処理に関する研究のために設けられたもので、初期の東大生研炉とよく似た設備(内径 23 mm で下向き 15° 傾斜羽口 4 本)、操業条件(装入物粒度、送風諸元)のもとで、出鉄量 2.5 t/d、コークス比 930 kg/t と、当時としては非常によい成績を示していた。しかし同国の政治情勢のその後の推移をみれば、この炉のその後の運命は推察にかたくない。

西ドイツの炉(0.75 m³、Hattingen)は生産高炉(Heinrichshütte の 3 高炉)と相似なプロフィールをもち、かつ同等な間接還元率(56%)を与える鉱石粒度(約 7 mm)を採用し、酸素富化冷風(通常 O₂ 27.5%、5 Nm³/min、羽口は 20 mm φ で 8 本)を用いることを特

表 1 試験高炉操業年譜

操業次	年	月	試 験 目 的
1	1955	3~4	安定操業条件確立
2	"	8	"
3	1956	8	"
4	1957	3~4	脱クローム
5	"	8	"
6	1958	3~4	三油炭コークス(I)、石灰石羽口吹き込み
7	"	8~9	高アルミナ鉱石、含チタン焼結鉄(I)、石灰石吹き込み
8	1959	3~4	三油炭コークス(II)、含チタン焼結鉄(II)
9	"	8~9	都市ガス、天然ガス吹き込み
10	1960	3~4	"
11	1961	3~4	天然ガス吹き込み、高圧操業
12	1962	3~4	粉コークス、粉炭吹き込み、高圧操業
13	"	8	粉炭吹き込み、高圧操業
14	1963	3	高圧操業、高温送風、酸素負荷送風
15	"	8	粉炭吹き込み
16	1964	3~4	送風限界
17	1966	7~8	"
18	1967	7~8	"
19	1968	7~8	"
20	1969	7~8	"
21	1971	3~8	天然ガス吹き込み予備試験
22	"	8	石油コークス使用
23	1972	7~8	天然ガス吹き込み
24	1973	7~8	熱レバ
25	1974	7~8	"
26	1975	8	劣質コークス使用
27	1977	7~8	コールドボンドペレット使用
28	1979	7~8	成型コークス使用
29	1981	7~8	ピッチコークス使用、SiO ₂ 源

昭和 59 年 3 月 31 日受付 (Received Mar. 31, 1984) (依頼技術資料)

* 東京大学生産技術研究所(現:住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター) 工博
(Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Now Hasaki Research Center, Central
Research Laboratories, 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-04)

徴としていた。これは縮尺モデルとしての試験高炉では生産高炉との厳密な意味での相似性は成立しないとして、プロフィールの幾何学的相似性と鉱石の還元挙動の相似性だけを実現しようとしたものであつた。しかしこの炉の通常操業の成績は、F.C. 80% のコークスを用いるものであつたとはいえ、2.6 t/t(出銑量 1.2 t/d) と著しく高いコークス比に象徴されるものであつたうえ、高酸素富化送風とともに CO₂ を吹き込んで間接還元率の飛躍的向上をねらつた試験では、C=2%, S=0.4~0.5% という異常な出銑成分が報告されるなど、操業は満足できるものであつたとは思えない。その後この炉が稼動されたという情報がないのも、おそらくこうした事情によるものであろう。

これに対してアメリカの炉 (8.6 m³, U. S. Bur. of Mines, Bruceton)[†] では、プロフィールの相似性を放棄して有効高さ (19'9 1/2")/炉床径 (4') を大きくとることによつて、ガスと装入物の炉内滞留時間を長くするとともに、アルミナペブルベッド式熱風炉 (2 基) を備えて、1300°C までの高温送風を可能とし、還元機能、炉熱水準の両面について生産高炉への接近をはかつたものであつた。事実この炉では灰分 9% のコークス、Fe 65% の焼結鉱を生産高炉のそれに近い粒度 (コークス 25~45 mm, 焼結鉱-50 mm) で使用しても、出銑量 15 t/d, コークス比 700 kg/t という好成绩がえられ、多量の天然ガスを吹き込んだ試験では 473 kg/t というコークス比さえ達成されたのである。一方ベルギーの炉 (24.6 m³, CNRS, Ougrée) は 1953 年, OEEC の肝いりで行われた国際共同研究のための低シャフト炉が、1957 年以降、ベルギーの IRSIA とフランスの IRSID および欧州炭鉄共同体の財政的援助のもとに、試験高炉として転用されるようになったもので、当時は低シャフト (有効高さ 4.7 m) であつただけでなく、楕円形の水平断面をもつていた。ここではガスの滞留時間延長のため、炉頂圧 1.4 atg の高圧操業を行うという路線をとり、これと適切な荷下がり速度 (すなわち送風量)、装入物粒度とを組み合わせることによつて、ガス還元機能と炉熱水準を生産高炉に近づけることに成功した。実際自溶性焼結鉱 100% 使用という条件のもとで、ベルギーや西ドイツの内容積 500 m³ 程度の高炉と同等のコークス比 (670 kg/t)、ガス利用率を実現し、かつ同一成分の銑鉄 45 t/d を出銑したのである。

U. S. Bur. of Mines の試験高炉の当初 (1950 年頃) の炉床径が 2'2" であり、数回の改造を経て 4' まで拡大されたものであつたという経緯⁶⁾ は、試験高炉のガス還元機能と炉熱水準の生産高炉への接近がその規模のある程度の拡大を伴つたことを示している。そのことは処

[†] U. S. Bur. of Mines では遅くとも 1920 年の始めには、その Minneapolis 実験所に内容積 4.9 m³ の試験高炉を設置し、鉱石の粒度とその還元挙動との関係など高炉に関する種々の研究を行つていた⁵⁾。

理すべき溶融物の量や準備すべき原燃料などの量を増大させ、したがつて試験高炉の運用を金と人手のかかるものとし、これをいかに調達するかを重要な問題とした。この問題は、ベルギーの炉の場合は、その生い立ちから国際的共同研究の形で、なかば自動的に解決された。一方アメリカの場合には、50 年代に行われた試験の多くが Bur. of Mines と U. S. Steel 社との共同研究であつたことは、それが一つの解決策であつたことを示唆している。1963 年、その U. S. Steel が Universal (Monroevill 付近) に試験高炉 (9.2 m³) を設けた後は、アメリカとカナダの 22 の鉄鋼会社が研究組合 (B. F. Research Inc.) をつくり、Bur. of Mines と協定を結んで、2 年単位の研究を行うという運営形態に転換した。すなわちここでもやはり共同研究の路線が選ばれたが、この形態も長くは続かなかつた。組合参加企業数は 1967 年には半減し、翌 68 年以降 Bur. of Mines の炉は廃止されることとなつた。もつともこの運命をたどつたのは Bur. of Mines の炉だけではなかつた。やがて U. S. Steel の炉も、ベルギーの炉もその後を追つたのである。

2.2 わが国の試験高炉

わが国で本格的に稼動された最初の試験高炉は、1934 年、谷口・八木 (九大名誉教授) らによつて、日鉄八幡技術研究所 (東田) に設けられた 1 トン試験高炉であらう^{6)†}。同炉は「低炭素銑の製造の研究に端を発し」、「可及的小規模」であつて、生産高炉と同様な成分の銑鉄を製出し、かつ長期間の連続操業に耐えるものとして構想されたものであり、この構想が数回にわたる改造を経て実現し、1 t/d 程度の規模の炉として最終的な姿に落ちついたのは 1939 年頃であつたとみられる。この段階における同炉の内容積は 0.596 m³ で 1"GP 製水冷羽口 4 本 (下向 15° 傾斜) を有し、鉄管式熱風炉を備えていた。その操業成績は灰分 20% のコークス (15~25 mm)、Fe 55~60% の鉱石 (5~10 mm)、送風温度 450~550 °C、送風量 4~4.5 m³/min の条件で、コークス比 1.7 t/t(出銑量 1 t/d) というところであり、これによつて各種原料の試験や炉内状況の調査などが行われた。

1 トン試験高炉は 1944 年に廃止され、これに代わつて同じく八幡技術研究所 (戸畑) に 3 トン試験高炉 2 基が

[†] 保本⁶⁾ は 1925 年鞍山製鉄所で内容積 3.4 m³ の試験高炉が、また 1928~29 年釜石製鉄所 (当時三井鉱山) で内容積 1.2 m³ の炉が稼動されたと述べているが、鞍山の炉は鉄管式熱風炉を備えていたものの、30 mmφ の羽口 1 本だけをもち、炉底れんがの試験のため、1 週間程度の操業を目標としたものにすぎなかつた⁷⁾。また釜石の炉は、1930 年八幡で行われた「熔鉱炉座談会」における中田の発言⁸⁾ から、「Bosh のない Cylindrical」なプロフィールの効果を試すためにつくられた「実験炉」と推察されるが、「かかる実験には莫大なる費用を要し、民間工場では困難であるから八幡のような所で実際的小さい実験炉を作つていただきたい」とも述べられていることからみて、長期間多目的に運用されたとは考えにくい。なお中田は後に日本鋼管に転じ、同社大島工場に 2.5 トン試験高炉 2 基を設けたが、同炉は同工場の 4 高炉の熱風本管から分岐して送風を行うものであつたため、順調な操業を行うことができなかった。同炉は戦後岩手木炭 (株) に移設されている⁹⁾。

設けられた。同炉は粉鉱と低強度コークスの使用に適する炉形と操業法の研究を目的とするものであり、このため2基の内容積(4.6~4.8 m³)をほぼ同じとし、第1高炉のプロフィルは洞岡3高炉(1000 t/d)の1/6の相似形、第2高炉は著しく小さいボッシュ角(約9°)をもつものとし、それぞれカウパー式熱風炉を備えていた。実際には第2高炉は稼動されず、第1高炉だけが稼動され、太平洋戦争中には各種鉄源などの使用試験、戦後初期には鋳物銑や高珪素銑の製造、50年代の初めには高炉湯溜吹精法に関する東大生研との共同研究が行われた。その操業成績は灰分20%で粒度25~40 mmのコークス、Fe 55~60%で粒度10~30 mmの鉱石を用いた戦中および戦後初期には、1トン高炉のそれより格段によいものではなかった(出銑量3 t/d、コークス比1.6 t/t)⁶⁾が、1950年代前半に行われた装入物粒度の効果に関する試験¹⁰⁾では、灰分14.34%で粒度10~25 mmのコークスとFe 59%で粒度5~10 mmの鉱石を使用することによつて、出銑量7 t/d、コークス比1.19 t/tと成績の著しい向上がみられた。設備の若干の改善によつて、当時500°C程度にすぎなかつた送風温度を上昇させる余地が十分にあつたと考えられ、またその後コークス灰分がさらに一段と低下し、自溶性焼結鉱の使用が可能になつたことからみて、成績を飛躍的に向上させることは可能であつたと思われるが、3トン高炉は50年代後半に入つて間もなく廃止された。同炉の所在地の近くには、おそらく戦中につくられたと思われる100トン試験高炉の基礎なるものがあつたことから、日鉄では3トン炉でもまだ小さすぎると考えられていたとも推察されるが、その廃止後間もなく250 kg/dの試験高炉が置かれたことからみて、廃止の理由はやはりその運用が高くつきすぎるということであつたと思われる。

東大生研に試験高炉が設けられたのは、3トン高炉の廃止の直前であり、日本鋼管技術研究所にベブルベッド式熱風炉を備えた試験高炉(当初0.63 m³、後3.2 m³)が設けられたのは、約12年後(1967年)のことであつた。

3. 東大生研の試験高炉

3.1 初期の試験高炉とその問題点

東大生研の試験高炉(以下単に試験高炉)の基本計画はつぎの二つの要件を前提としてたてられた。

(i) できるだけ小規模であつて、しかも正常な操業が可能であること。

(ii) 炉床の貯銑能力が十分大きくて、湯溜吹精法の実施が可能であること。

日鉄の1トン試験高炉の先例に鑑みて能力は1 t/dと定められた(この理由で試験高炉は「1トン試験溶銑炉」または「1トン試験高炉」とよばれた)。しかし日鉄の1トン炉は2 hの出銑間隔を原則としており、炉床の

貯銑能力は100 kg程度にすぎず、(ii)の要件をみたしえなかつた。湯溜吹精法による溶銑の脱Cr法は、炉床の含Cr溶銑浴に酸化剤と冷却剤とを同時または交互に吹き込み、長時間の低温酸化によつてCrを脱除しようとするものであり、その実施のためには200~300 kgの貯銑能力が必要と考えられていたのである。この問題は炉床高さを大きくして所要の貯銑能力を確保し、その結果不可避的に増大する放熱損失を既設高周波電源(1 kHz・167 KVA)を利用する誘導加熱によつて補償するという方向で解決された。こうして試験高炉は湯溜部を除く本体については日鉄1トン炉、付帯設備については同炉および八幡3トン炉のそれを手本としてつくられた。原燃料の粒度や送風条件などの操業条件についても、日鉄1トン炉のそれにならつたことはいうまでもない。

湯溜部の誘導加熱は異例に深い炉床を可能とした斬新な着想ではあつたが、以下のような問題をも伴つた。

(i) 炉体外皮(鉄皮)は誘導発熱を避けるため二つ割りとし、かつコイルに近い部分是非磁性材料製としたが、出銑口付近などの大きな切りこみのある部分では誘導による局部過熱が避けられなかつた。このため水冷が必要となり、それによる熱損失の増大を招いた。

(ii) 一定の誘導加熱効率を確保するため、湯溜壁厚さを制限せねばならなかつたため、保温不足を招いた。

(iii) 炉本体を高周波電源に接近させる必要があつて、既設建屋内に置いたため、付帯設備を含むレイアウトが全体として不具合になり、とくに熱風本管が長くなつて放熱による送風温度の低下が大きくなつた。

(iv) コイルを出銑口付近に設置せねばならなかつたため作業性が悪化した。

脱Cr試験に続いて行われた資源関連の試験と還元性ガス吹き込み試験は、試験高炉の問題点が誘導加熱だけにあるのではないことを示した。酸性操業による高アルミナ鉱石の処理を意図した試験では、コークス灰分由来のスラグ量が多く、それによる稀釈効果のためスラグのAl₂O₃含量が上がらず、鉱石以外のアルミナ源を装入してこれを補わねばならなかつた。TiO₂の還元生成物によるトラブルを予想した砂鉄多配合焼結銑の試験では、焼結銑使用率の増加につれてTiO₂の還元率が低下して、流銑現象やベアの生成などの発現を著しく遅らせ、試験高炉の炉熱水準が低いことを示した。還元性ガス吹き込み試験は試験高炉の機能上の重大な弱点が低いガス利用率(~10%)に反映していることを再確認させただけでなく、低い羽口先温度のもとでは吹き込みガスの1次燃焼生成物としてのH₂Oの負効果が著しくなるのではないかという疑いをいだかせた。これらの事実是一面では試験高炉で行うる試験の内容に制約があることを、また反面ではガス利用率およびコークス比という相互作用の関係にある二つの指標を改善して、この制約を緩和せねばならないことを示すものであつた。実際試験

高炉はこれらの指標に関連して以下の問題点をかかえていたのである。

(i) 復熱式熱風炉の保障しうる送風温度は 600°C にすぎなかつたうえ、熱風輸送系が長く、かつその断熱が不十分であつたため、大きな温度降下が避けられなかつた。このため早くから環状管入口に送風電熱器を設け、環状管および羽口支管の保温を強化したが、実効送風温度はたかだか 400°C にすぎなかつた。

(ii) 鉍石はよく整粒(当初 $5\sim 10\text{ mm}$, 後に $3\sim 10\text{ mm}$) されていたが、生鉍または酸性焼結鉍であつたため、溶剤として多量の石灰石を装入せねばならなかつた。

(iii) コークスもよく整粒 ($10\sim 20\text{ mm}$) されていたが、鉍石とともにヤードに野積されていたため、水分の変動が避けられなかつた。このため日鉄1トン炉、八幡3トン炉の場合にならつて容量装入方式としていたが、乾装入量の変動が避けられなかつた。

3.2 設備および操業の改善とその効果

1960~62年度、1963~65年度および1970年度と3次にわたつて設備の大改造および増強を行うとともに、操業諸条件の改善につとめた。

(1) 1960~62年度の改善とその効果

1960年度に熱風炉と原料処理設備を除く主設備の大改造を行つた。炉頂圧 0.5 kg/cm^2 の高圧操業を可能とすること、本体の炉床高さを小さくして保温を強化し、誘導加熱を廃止すること、熱風本管から羽口までの熱風輸送系を更新して断熱構造を改善することなどを主旨とするものであつたが、このさいバケット装入方式をスキップ-コンベア装入方式にあらため、かつその運転を自動化した。この改造は炉頂圧を高くするという点では結局成功しなかつたが、熱風輸送系のやや過大であつた内径の縮小と断熱構造の改善によつて、実効送風温度の上昇 ($\sim 600^{\circ}\text{C}$) をみた。さらに1962年度以降4本の羽口支管にそれぞれ2次送風電熱器を設けて昇温と羽口間温度差の減少をはかつた。これによつて平均送風温度は最高 765°C まで上昇したが、2次電熱器の動作は必ずしも安定でなかつた。

これとともに自溶性焼結鉍(さらには高塩基度焼結鉍)100% 使用操業へと移行した結果、1963年にはコークス比を 1.0 t/t 前後まで下げ、ガス利用率を20% 前後まで上げることができた(表2)。

(2) 1963~65年度の改善とその効果

1963~65年度に原料処理系の合理化と装入物の秤量の自動化、出銑・滓作業の機械化などのための設備を新設した。この結果整粒された装入物は屋根つき貯槽に貯えられるようになってその水分が安定し、秤量を含む装入操作の完全自動化が実現して、コークスの乾装入量を一定に保ち、装入回数の増加に対応することが可能となつた。またこのさい放風量の手動調節を含んでいた送風量の半自動制御方式を、送風機の回転数制御による完全自動制御方式にあらためた結果、送風量の変動が顕著に減少した。

以上の処置による操業条件の安定化に加えて、コークスペースの適正化 ($20\text{ kg}\rightarrow 15\text{ kg}$) や送風量の最適化 ($4\sim 4.5\rightarrow 5.0\text{ m}^3/\text{min}$) などを行つた結果、溶銑のSの上昇をみることなくSiを下げる事が可能となり、1966年には 650°C 程度の送風温度のもとでも、送風水分の低い ($5\sim 8\text{ g/cm}^3$) 3~4月期にはコークス比を 820 kg/t に下げ、ガス利用率を27.5% に上げることができた(表2)。

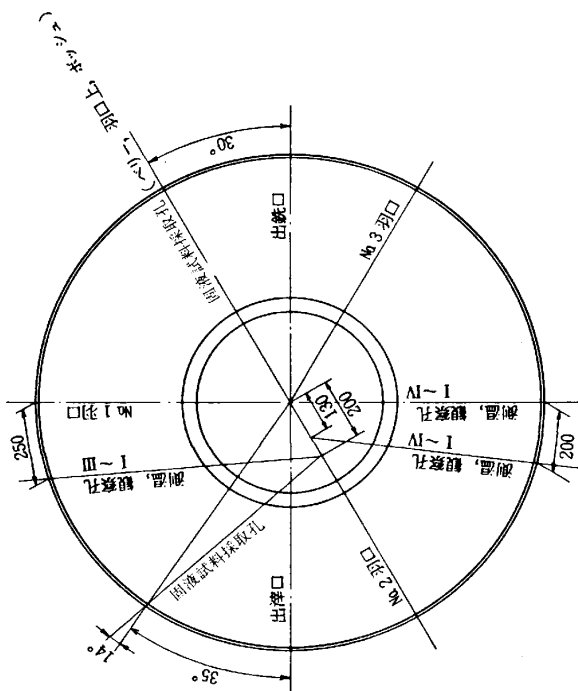
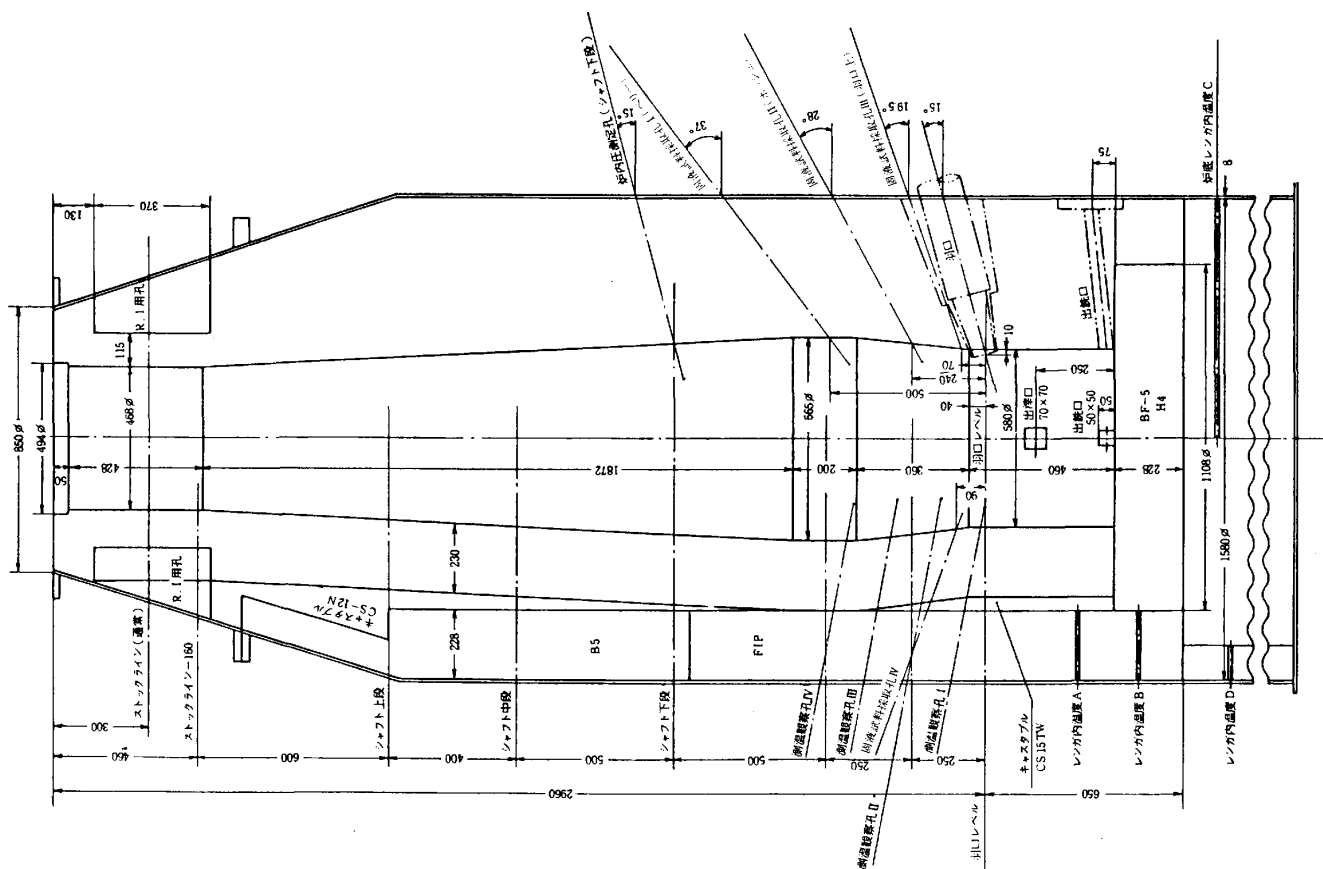
(3) 1970年度の改善とその効果

1970年度に熱風炉と熱風輸送系を更新し、高炉本体の大改造を行つた。すなわち蓄熱式熱風炉(ベブルベッド型)2基を新設して復熱式熱風炉を置きかえ、熱風輸送系をより高温に耐えるよう再改造して、1次および2次送風電熱器を廃止した。高炉本体についてはシャフト高さを約1m延長して、ガス及び装入物の滞留時間の延長をはかつた(この結果炉内容積はそれまでの 0.53 m^3 から 0.83 m^3 に増大した)。またこのさい羽口数を4本から3本に減じるとともに、環状管を作業床下のピットに移設して各種炉内調査のための作業空間をつくつた。

これらの新設備や改造設備が若干の改良や操作の改善を経て順調に稼動するまでには数回の操業を必要とし、また熱風輸送系における著しい放熱損失のため実効送風温度は 850°C にとどまつたが、操業成績は著しく向上した。すなわち送風の除湿をも行つた1974年7~8月の操業では、 620 kg/t 台のコークス比と40% に近いガス利用率が達成され、これに伴つて出銑量も 3.5 t/d に増加して、1トン高炉の名は全く実態を表さないものとなつた(表2)。図1に改造後の本体、図2にレイアウトを示す。

表2 試験高炉操業成績推移

次数	年 月	送風温度 ($^{\circ}\text{C}$)	送風水分 (g/m^3)	送風量 (m^3/min)	O/C	コークス比 (kg/t)	出銑量 (t/d)	γ_{CO} (%)	Si (%)	備 考
9	1959 8~9	360	22.6	4.16	0.825	1820	0.91	11.8	1.37	高周波電力 20kW
14	1963 3	733	6.5	4.22	1.62	986	1.784	24.7	1.53	焼結鉍 100% (CaO/SiO ₂ =1.62)
16	1966 3~4	640	5.0	4.79	2.06	820	2.75	27.8	1.00	同上 (CaO/SiO ₂ =1.72)
25	1974 7~8	849	5.5	4.74	2.71	622	3.91	39.9	1.46	同上 (CaO/SiO ₂ =1.77)



固液試験材料採取孔、測定、観察孔の方向

図 1 最近の試験高炉のプロファイル (1974年)³⁾

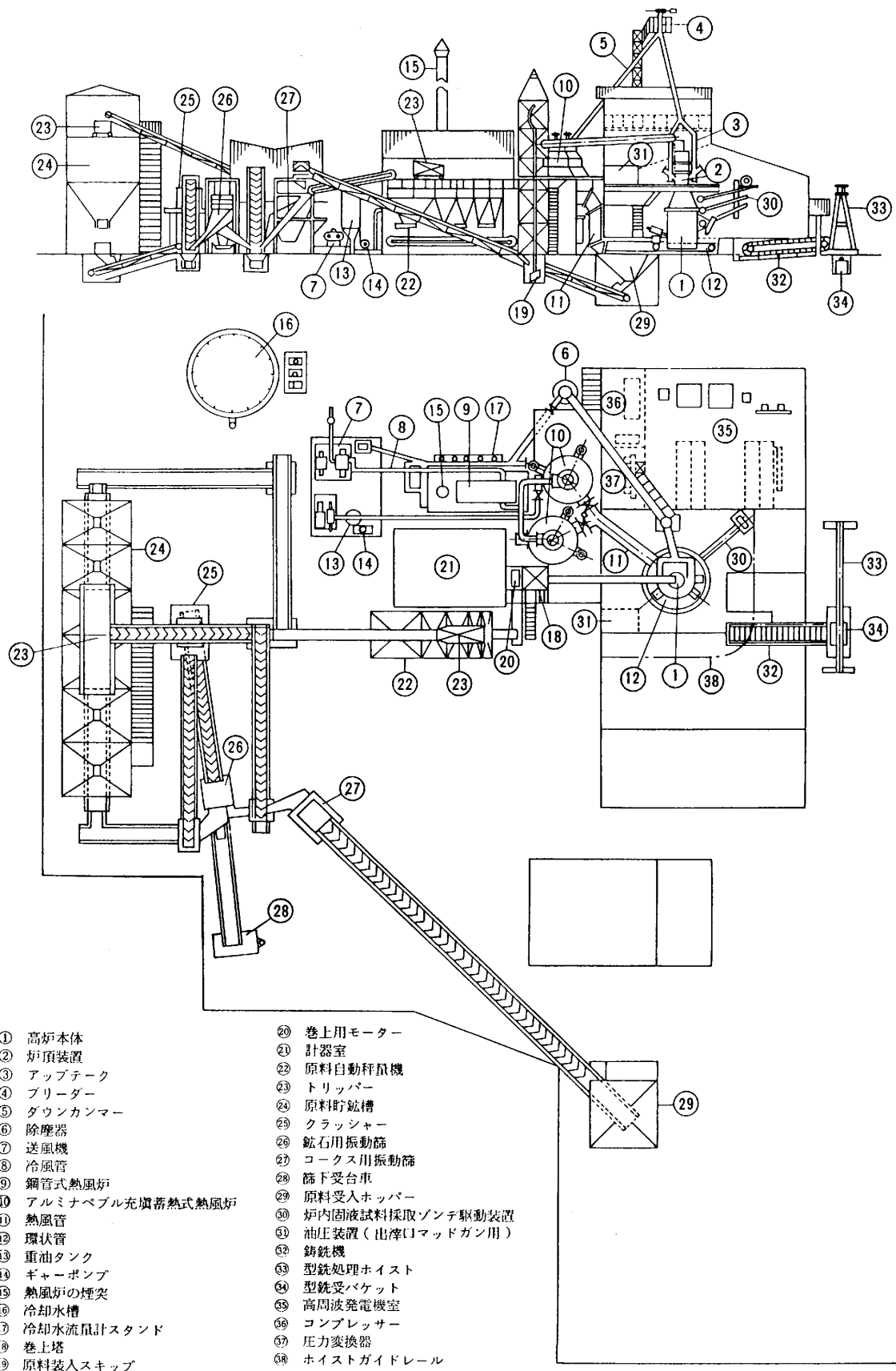


図 2 最近の設備配置図 (1981年)³⁾

3.3 試験操業の成果と問題点

試験高炉は 1960 年度の大改造以後、高炉プロセスにかかわる諸問題の研究のため運用され、19 次の試験操業が行われた。これを以下のように 4 テーマに大別して成果の概要と問題点を述べる。

(1) 粉炭吹き込み試験

1962~63 年に行われた粉炭吹き込み試験は、これに先行した都市ガス・天然ガス吹き込み試験とともに、当時重油吹込が急速に発展しつつあったことを背景としながら石炭に注目したもので、テーマの先駆性の点でも、成果¹¹⁾(置換率 1.20 でコークス比を 1.13 t/t から 0.74 t/t に低下)の点でも、成功をおさめた例であつたといえよう。しかし吹き込み燃料の燃焼率と吹き込み可能量がレースウェイの大きさに依存するものとするれば、試験高炉の深さが 150 mm 程度にすぎないレースウェイでは、吹き込み口を羽口先端から約 1 m 後退させ、酸素を 25% 程度まで富化していたにしても、粉炭の十分な燃焼は期待できないはずであつた。にもかかわらず -50 メッシュの粉炭 (V.M. 39.5%) について 75% の燃焼率が推定されたのは、羽口先付近での粉炭の燃焼挙動に単純な推察をこえるものがあつたことによるものと考えられる。したがって真に解明されるべき問題はむしろこの点にあつたのであり、それへの本格的な取りくみの契機としてこそこの試験が普遍的な意義をもちえたと思われる。

(2) 送風限界の試験

1964 年から 69 年まで 5 次におつたて行われた送風限界試験は、当初「炉況の悪化をみることなく最大出銑量を与える送風量」の追究を目的としていたが、えられた知見は常識的かつ試験高炉かぎりのものにすぎなかつた。しかし後に「高炉の生産性を規定するものとしての送風量の限界を支配する要因は何か」という -50 年代の始めにアメリカの研究者によつて提起された¹²⁾一理論的な問題の究明に目的を転換し、かつ実験室的な基礎研究を並行して進めることによつて、つぎのような重要知見を与えることができた¹³⁾。

(i) 試験高炉の送風量の上限を規定するのは固体装入物の集合的な流動 (Aggregative fluidization) である。

(ii) この流動の発生と激化を 2~4 Hz の低周波微圧振動の出現とその振幅の増大によつて判定しうる。

(iii) 溶銑・滓量を著しく増加して増風しても、Flooding による炉下部での棚吊りはおこらず、むしろ炉上部での荷下がり障害が発生する。

(iv) 溶融生成物量増加時の炉下部微圧振動特性の推移 (13~15 Hz → 2~4 Hz) からみて、ホールドアップの増大は Flooding ではなく、ガス流の偏流を招き、最終的には固体装入物の大規模な流動にいたるとみられる。

また 1968 年大阪製鋼(株)と同社西島 I 高炉に関する共同調査¹⁴⁾を行い、同炉の通気・荷下がり障害の大部分が炉上部で初発することを見出し、微圧振動による荷下がり挙動の判断の可能性を確認したことは、試験高炉によつてえられた知見を一般化するうえできわめて有益であつた。2000 m³ 以上の大型高炉の操業の初期にみられた大規模な吹き抜けの機構の理解¹⁵⁾にはこの知見の寄与もあつたと考えられる。なおこの試験はまたガス試料や固体装入物試料の採取による炉内調査を並行して実施したという点でも、炉頂ガス組成の連続分析によつて試験高炉の特性をガス側から把握したという点でも、一つの画期をなしたものであつた。

(3) コークス比の限界に関する試験

1971 年から 74 年まで再び 5 次におつたて行われた操業は、直接の試験題目はさまざまであつたが、いずれも送風限界とならぶ高炉の極限状態、すなわちコークス比の限界を規定する要因、およびこれと密接に関係する熱レベルの実体とその指標に関する調査をめざしたものであつた。発想の連続性の点からも、やがて燃料比のいつそうの低下が製銑技術の重要課題となつたという客観情勢からみても、妥当な問題設定であつたと思われる。えられた成果はつぎのとおりである。

(i) 反応性だけでなく物理的性質の点でも通常コークスとは異なる石油コークス使用試験の結果から、反応性の効果を分離して評価することを直接の目的として、特色のある数学モデルが開発された¹⁶⁾。

(ii) 銑鉄の Si を一定に保つのに必要な溶落レベルの高さ (すなわちコークリザーブ量) は羽口先温度の水準によつて異なるので、Si を熱レベルの指標とすれば、コークリザーブは必ずしも熱レベルの実体を表さないことが知られた^{17)†3}。

(iii) 炉内採取メタル試料の Si が最終値に比べてレースウェイ付近では著しく高く、レースウェイから遠いところでは著しく低いことから、Si のメタルへの移行反応が、おそらく温度分布に対応して、著しく不均等に進行するものと推定された¹⁷⁾。

しかしコークス比の下限を規定する要因は何かという基調的課題については、天然ガスの多量吹き込みによつてコークス比の自然な低下をはかろうとした方法上の誤りを主因として、知見の前進がみられなかつた。実際天然ガスの吹き込みには、粉炭吹き込みの場合と同様、燃焼率にかかわる疑問があつて成功の見こみが確かでないということのほか、熱レベルの指標である Si に直接の影響を及ぼす可能性があるという問題もあつたのである。むしろコークス比の意図的な低下を段階的に進め、

^{†3} これを今日の課題に即していれば、羽口先温度を高くしても、O/C を上げて溶落レベルを下げることによつて Si の上昇を防ぎうることであり、逆に O/C の低下によつて溶落レベルが上がつても羽口先温度を下げることによつて Si の上昇を防ぎうることである。

その結果としておこる低熱状態への漸時的移行のどの段階で、どんな問題が生じるかを詳しく調査するという方法をとるべきであったと思われる。それによつて溶落レベルの羽口レベルへの接近、すなわちコークリザーブの極限的減少に伴う変化が明瞭に観測され、生産高炉における「炉下部不活性帯」の理解に役立つ知見を与える可能性もあつたと思われる。なおこの試験でファイバースコープによる炉内観察法が開発され、レースウェイ上部でのコークスの流動状態をみとめたことや融着層とその近傍の状態に関する情報¹⁷⁾¹⁸⁾をえたことには、試験高炉の域をこえる意義があつたといえよう。

(4) コークスの劣化挙動に関する試験

1975, 79, 81 年にそれぞれ劣質 (低冷間強度, 低反応後強度) 通常コークス, 成型コークス (破碎片, この場合高冷間強度, 低反応後強度), ピッチコークス (この場合低冷間強度, 高反応後強度) に関する試験を行った。これはコークスが高炉の死命を制するとの認識に立ち、開発された炉内観察法を一つの重要手段として、これらコークスの炉内での劣化挙動を調査し、その結果と熱間性状に関する実験室的基礎研究とを総合して、コークスの耐劣化性の本質を明らかにしようとしたものであつた。えられた知見はつぎのとおりである。

(i) 劣質通常コークス¹⁹⁾および成型コークス²⁰⁾²¹⁾は送風条件による緩急の差はあつたが、いずれも甚しく粉化・細粒化して粉・細粒コークスの多量集積とその激しい流動をもたらし、遂には強固な棚吊りを招来して、操業を不能とすることが知られた。

(ii) ピッチコークスの場合には粉化・細粒化によるトラブルが全く生じないことが知られた²¹⁾。

この知見は試験高炉の装入コークス粒度の枠内で有効なものであるが、反応後強度が耐劣化性の指標として一定の有効性をもつこと、耐劣化性が炭素基質の性質によつて規定される可能性が強いことを示すものであつた。また反応後強度が反応性と強い相関関係にあることから、CO₂ との反応が劣化の一因をなすものと推定されたが、それがレースウェイ付近で著しく進行する劣化といかにかかわるか、唯一または主要な原因であるかなど問題は解明されるにいたらなかつた。すなわちコークスの炉内挙動の研究は未完であるが、その完結のためになされるべき今後の研究の方向を示したという意味で、試験高炉はこの段階における役割を果たしたといえよう。なおこの試験のなかで光ファイバーによる测温法²⁰⁾とスペクトル分析法²²⁾が開発され、酸素プローブの適用²³⁾の可能性が実証されたことは、ファイバースコープの事例に鑑みて、特筆すべき成果であつたといえる。

3.4 試験高炉の特性

生産高炉と相似な炉形の小型高炉で、ガス流れ、伝熱、反応などに関する無次元量を同一に保つて、厳密な意味での相似則をみたすことができないことはいわば自

明であつた。このことをみとめてなおかつ生産高炉のモデルとしての試験高炉のあり方を追求するとすれば、「相似」概念の原点に立ち返つて、生産高炉の本質的な特徴である向流熱・酸素交換過程をシミュレートする方策を採求するほかなかつた。コークス比を下げようとしたのは、熱交換過程を左右する基本量の一つである熱流比の値を生産高炉のそれに近づけようとしたものにほかなかつた。ガス利用率の向上をめざしたのは、ガス側からみた酸素交換機能を生産高炉のそれに近づけようとしたものであり、それによつて鉱石の還元挙動、したがつてまた融体の生成や滴下域での諸過程も生産高炉内のそれに近いものになると期待したのであつた。

しかし試験高炉には小型なるがゆえのきびしい条件がつきまとつた。相対的に大きい放熱損失はそれ自体高いコークス比の原因になつただけでなく、内容積あたりコークス燃焼速度、したがつて送風量を増大させてガスと装入物の滞留時間の減少を招いた。そして短い滞留時間が、O/C が小さいために小さい鉱石の炉内容積占有率とともに、低いガス利用率を招き、それがまたコークス比の上昇にはね返つた。この悪条件を補償するための送風温度の上昇には、これまた送風量の絶対値が小さいがゆえに相対的に大きい熱風輸送系の放熱損失のため、限界があつた。酸素富化も一つの補償手段ではありえたが、その適用によつて酸素富化空気量の絶対値がさらに減少して、放熱による温度低下をさらに著しくするという矛盾があつた。炉頂圧の上昇はその実現のための設備にかかわる問題のため、その効果を確かめるまでもいならなかつたが、この問題もまた主として小規模装置なるがゆえの困難だつたのである^{†4}。それゆえ試験高炉では送風温度の可及的上昇、自溶性焼結鉱の 100% 使用、装入物の徹底的な整粒と鉱石の平均粒度の低下、炉高の増大、そしていうまでもなく本体の十分な保温などの手段を総合して^{†5}、コークス比の低下とガス利用率の向上をはからねばならなかつた。

装入物粒度の低下が伝熱、反応の両面で有効であつたことはいうまでもないが、断面積あたりガス流量 (すなわちガス速度) が小さいこととあいまつて、粒子基準レイノルズ数を生産高炉のそれに比べて、ほぼ 1 桁小さい

^{†4} このほか試験高炉には以下の問題もあつた。

(i) 火入後 1 週間以上にわたる炉体 (ボッシュ以下) 浸食の進行……これに伴う非定常状態は短期間の操業を原則とした試験高炉にとってはなはだ不都合であつたが、その反面浸食の進行は保温が有効で、炉熱が順調に上昇していることを示す現象でもあつた。

(ii) 出鉄・滓時の装入物柱の急速沈降と数チャージの連続装入……このためプロセス変数の高さ方向分布が 1 出鉄 (滓) 間隔を 1 周期とする変動をくり返すこととなつた。すなわち試験高炉は炉体浸食がとまつた後でも準定常状態にあつた。

(iii) 出鉄温度の測定困難……湯溜の貯鉄能力が小さくて (最近でも 450 kg 程度)、一般に出鉄時間が短く、かつ出鉄速度が一定でないため、正確な测温が難しかつた。このため、溶鉄温度を熱レベルの指標としにくかつた。

^{†5} 1973~74年の操業のさいに試みた送風機吸込口での送風の除湿は、熱風炉出口での燃焼廃ガス由来水分による加湿の問題はあつたが、小規模なるがゆえの問題はなく、試験操業がもつばら夏期に行われるようになったという状況のもとで、きわめて有効であつた。

ものとしただけでなく、装入物粒子の塊状性を減殺することともなつた。また炉高の相対的増大は幾何学的相似の放棄を意味するが、これと装入物の径方向・周方向の分布が一樣であることをあわせれば、試験高炉は生産高炉の面積要素に近い方向を指向したということになる。いずれにしてもコークス比とガス利用率の改善によつて試験高炉のかちえた生産高炉との「相似性」は、高さ方向での熱交換と酸素交換の過程のパターンとしての近似性にすぎなかつた。このような性格の試験高炉にふさわしい役割は、基本的には、これを高炉—正確には高炉型の反応装置—内での諸プロセスの進行状態に関する定性的な知見をえて、一方では実験室的な基礎研究に、他方では生産高炉そのものによる調査に適切な問題提起を行うための実験炉として位置づけることであつた。そしてそれが東大生研の試験高炉だけでなく、アメリカやベルギーの試験高炉が行きついた姿でもあつたのである。

試験高炉がこの役割をはたしうるための必要十分条件が何かは試験高炉の歴史そのものが示しているが、これを要約すればつぎのとおりである。

(i) 課題性があり、できればトピック性もあり、しかも基礎的でもあるような試験テーマの選定

(ii) 試験高炉によつてえられる知見が本質的には定性的であることをわきまえた適切な実行方法の採用

(iii) 必要な炉内情報をえるための新しい手段(検出端)の開発

これらの条件を整えるためには事前・事後の基礎研究を必要とすることが多く、したがつて同一テーマのもとの試験操業のくり返しを必要としたこともまた歴史の示すところである。また新しい検出端の開発が試験高炉の域をこえる意義をもつ場合もあつたという事実は、これが試験高炉のいま一つの役割であつたことを示すものであろう。

4. 実習施設としての試験高炉

4.1 操業体制と学生の役割

試験高炉がかなり長期間の昼夜連続操業を原則とすることから、そのための数10人の要員をいかにして整えるかという難しい問題が生じた。この問題は公務員または準公務員である常勤教職員に、操業のつど実習生として参加する多数の学生・院生(以下学生)を加えて要員の基幹部分を構成するという方式で解決された。すなわち学生の参加は、試験高炉を学生実習のための実験工場たるべきものとした創設者(故金森九郎教授)の信念の帰結であつただけでなく、試験高炉の運営の不可欠の条件でもあつた。このため操業は毎年学年末(3~4月)および夏期(7~8月)休暇の両期またはいずれか1期に1ヵ月以内(最近は隔年の夏期だけ)実施された。

4.2 実習の実態

参加学生は3班(例外的には4班)に編成され、班を単位として東大生研内に特設された宿泊施設で共同生活をおくり、1日8hの3交替勤務(5~7日で交替、4班編成の場合1班は常昼勤)を行つた。1班は教職員2~3名、学生7(初期)~15(最近)名、応援者1~2名で構成され、その担当作業は原燃料の装入(秤量を含む)、出銑・滓(測温、試料採取、銑・滓の処理を含む)、計器の監視とデータの記録、ガス分析および銑鉄分析などであつた。

学生は火入に先だつて、高炉操業理論の概要、試験の目的・方法・実施手順、試験高炉の設備と作業の概要などについて説明をうけ、また操業中1回程度は試験の進行状況、成果などについて、文書または口頭による統一的な説明をうけたが、日常的な指導は所属班の責任者(教職員)によつて行われた。データの整理や解析はほとんどすべて操業が終わり、学生が引揚げた後に行われたので、学生はほとんどこれに関与しなかつた。したがつて試験高炉における実習の実体は上述の作業の実行であつた。

初期の操業では原燃料の装入および出銑・滓作業のほとんどすべてを人力に依存していたが、装入回数が少なく(約30回/8h)、かつO/Cが低いこと、出銑・滓間隔が長く(4h)、かつ出銑量が少ないことがゆとりを与えていた。常時行われる計測項目は送風関係の諸量と高炉本体・熱風炉各部および炉頂ガスの温度といつたところであり、きびしい監視を要求されるものは少なかつた。したがつて作業は全体として牧歌的ともいえるものであつた。

秤量を含めて装入操作が全自動化された後、装入関係の作業は監視と記録だけとなつたので、監視・記録作業に統合された。これとともに炉内ガス圧、炉頂ガス組成などが常時計測項目に加わり、さらに自動切換機構をもつ蓄熱式熱風炉が設けられた後には、その関係の計測・要監視項目も加わつて、監視・記録作業の密度と比重が著しく増大した。一方コークス比の低下と送風量の増加に対応する出銑量の増大および炉床高さの減少に伴つて、出銑・滓回数がふえ、この関係の作業量も増大した。その対策として出銑・滓口の開閉作業の機械化が行われ、後には銑銑機も設けられたが、樋の補修・整備と銑・滓の処理にかかわる作業は軽減できなかつたので、再び炉床高さを増して出銑回数の減少をはからねばならなかつた。すなわち試験高炉の高炉としての機能の向上と設備の高度化は、一方では監視・記録などの単純精神労働、他方では出銑・滓など自動化しにくい肉体労働の激化に導いた。

学生はほとんどすべての作業、とくに深夜のそれに未経験であるため、おおむね3交替勤務を一巡するまでは作業への習熟と新しい生活リズムへの順応にエネルギー

を費した。その後彼らは単純精神労働にも肉体労働にも飽きるようになったが、高炉に関してはアマチュアであるという当然の理由で、例外的な場合を除いては、試験の内容には強い関心を示さなかつた。高炉操業に関する一般的な学習課題を課することは考えられたが、4直3交替制をとつた例外的な場合を除けば、作業時間中に系統的な学習を行うことは現実的でなかつた。勤務時間外に学習を行うことも試みられたが、日常の学生生活とは甚だしく異なる生活環境と勤務態様のもとで、そしてとくに酷暑下の高熱労働の後に、時間外の学習を行うだけの精神的・肉体的余裕は、若い学生にもなかつたというのが実情である。

試験高炉における実習が、一つの実物教育であつたということ以外に教育的でありえたとすれば、それは生産にせよ、研究にせよ、日常性に貫かれた労働のくり返しなしにはありえないという真理を体得する一つの機会であつたということであろう。参加学生からしばしば語られることは、大学の枠をこえた共同生活のなかで育まれた友情が最大の収穫であつたということである。試験高炉がそうしたふれあいの場となりえたとされることは、教育機関としては最高の名誉であるが、教育を任務とする者がこれを誇つてこと足れりとしてよいであろうか。

5. 結びにかえて

東大生研の試験高炉の4半世紀をこえる歩みは、設備と操業の改善による機能の向上と、それによつて果たすべき役割の探求の歴史であつたといふことができる。世界各国の試験高炉がつぎつぎに消え去つていつた時代に、この炉が長く活動を続けることができたのは、何よりもまずわが国の製鉄技術が発展につぐ発展の途上にあつて、試験高炉がその存在の客観的意義を失わなかつたことによるものであるが、これを可能とした多くの要因があつたことを忘れることができない。以下にこれを列記して結びとし、あわせて関係各位への謝辞にかえたい。

(1) 試験高炉が大学(付置研究所)に帰属し、その稼動が研究の自由に属することとして保障され、さらには共同研究の一つとしてさまざまな専門分野の研究者の協力がえられたこと

(2) 試験高炉が大学の枠をこえた学生実習の施設として意義あるものとみとめられ、多数の学生・院生の労力提供の形で協力をえることができたこと

(3) 試験高炉による研究が大局的には有意義なものとうけとめられ、鉄鋼業界から共同研究の形で、持続的かつ多面的な援助が与えられたこと

(4) 試験高炉が西千葉に所在して、川崎製鉄千葉製

鉄所と同所の関係者の適機かつ具体的な援助をうけることができたこと

(5) 試験高炉と付帯設備の改造、新・増設にあつて、設備メーカーである石川島播磨重工(株)の協力と援助がえられたこと

(6) 日本学術振興会製鉄第54委員会を中心として、全国の製鉄関係研究者の援助がえられたこと

文 献

- 1) 館 充: 第60回製鉄部会資料 鉄60-講(1982年5月)
- 2) 館 充: 生産研究, 34 (1982), p. 325
- 3) 東大生研鉄鋼研究室: 大型共同研究成果概要, 第4号(昭和58年9月)
- 4) 館 充: 金属(1963) 399, p. 36
- 5) P. H. ROYSTER, T. L. JOSEPH and S. P. KIRNNEY: Blast Furnace and Steel Plant (1924) Jan., p. 35
- 6) 保本 保: 熔鉱炉製鉄法(1954), p. 318 [産業図書]
- 7) 鈴木庸生: 燃料協会誌, 4 (1925), p. 163
- 8) 中田義算: 鉄と鋼, 16 (1930), p. 1222
- 9) 入 一二: 私信
- 10) 城 博, 児玉惟孝: 鉄と鋼, 40 (1954), p. 849
- 11) 館 充, 中根千富, 金 鉄佑, 鈴木吉哉: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 2157
- 12) W. O. PHILBROOK: J. Met., 6 (1954), p. 1396
- 13) Y. KUWANO, K. SUZUKI, C. NAKANE and M. TATE: Proc. ICSTIS Part 1., P. 127 (Suppl. to Trans. ISIJ, 11 (1971))
- 14) 桑野芳一, 山本誠一, 大谷啓一, 本田紘一, 張 東植, 中根千富: 鉄と鋼, 58(1972), p. 1203
- 15) 中村直人: 第8回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編)
- 16) 全 明, 館 充: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 948; cf. 鈴木吉哉, 張 東植, 本田紘一, 桑野芳一, 呉 平男, 松崎幹康, 館 充: 同上, 60 (1974), p. 2098
- 17) 館 充, 鈴木吉哉, 李 海洙, 桑野芳一, 張東植, 呉 平男, 中村成子: 同上, 62 (1976), p. 483
- 18) 館 充, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 張 東植, 呉 平男, 松崎幹康: 同上, p. 495
- 19) M. TATE, K. SUZUKI, T. S. CHANG, Y. KUWANO, H. GO, K. HONDA, M. MATSUZAKI, E. TSUJI and S. NAKAMURA: Trans. ISIJ, 19 (1979), p. 332
- 20) M. TATE, Y. KUWANO, K. SUZUKI, T. S. CHANG, H. GO and S. NAKAMURA: International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium, Newcastle, Australia (1981) Mar.
- 21) 館 充, 張 東植, 鈴木吉哉, 中村成子: 東京大学生産技術研究所報告, 30 (1983), p. 5
- 22) Y. KUWANO and M. TATE: Trans. ISIJ, 22 (1982), p. 790
- 23) M. SASABE, K. KOBAYASHI, M. TATE, Y. KUWANO and K. SUZUKI: 同上, p. 794