

戦後日本における技術導入と普及： 鉄鋼業における BOF の受容*

中 村 豪

1. イントロダクション

海外の進んだ技術を導入することは、経済発展の重要な要因の一つである。途上国にとって、先進国で開発された生産技術を自分のものとすれば、生産性を大幅に上昇させ、経済成長が促進されることになる。戦後の日本経済は、しばしばこのような形で成功を収めた代表例であると目されている。第二次世界大戦中に欧米諸国との技術格差が拡大したが、戦後はこれらの国の進んだ技術を盛んに吸収し、多くの産業においてその技術力を高め、飛躍的な成長を遂げたと考えられている。

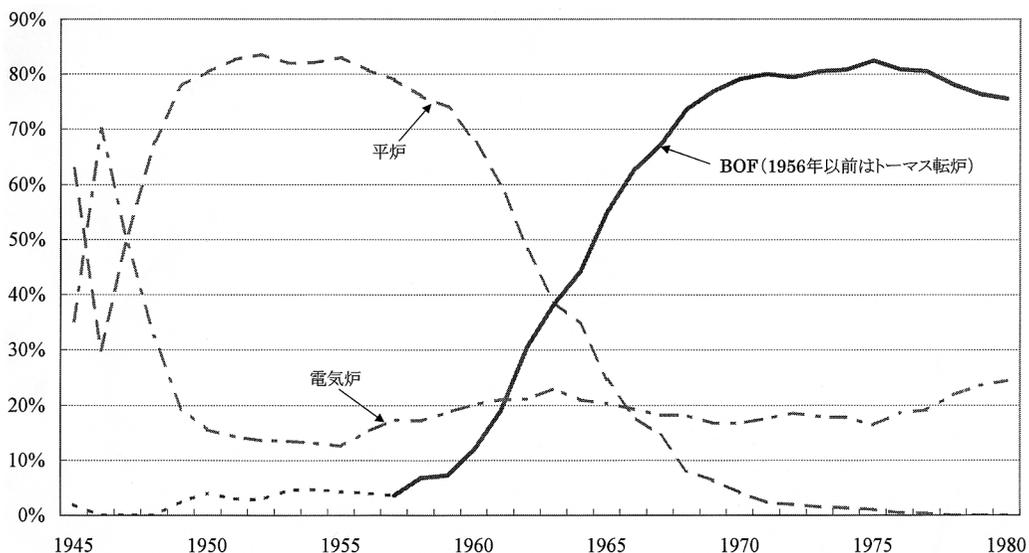
こうした戦後日本の技術導入の中でも、鉄鋼業における BOF（Basic Oxygen Furnace の略。純酸素上吹き転炉、LD 転炉などもよばれる）の導入は、その導入の形態やその後の技術改良の進展、そして何より短期間のうちに世界最大の鉄鋼輸出国へと変貌を遂げたその発展の様子から、最も成功した例の一つに挙げられる。

BOF は 1950 年代初頭にオーストリアで開発され、その革新性から、20 世紀の鉄鋼業において最も画期的な技術とされるものである。日本には 1957 年に導入された。これはアメリカ、カナダ（1954 年に導入）に次いで早く、西ドイツ、ブラジルと同じ年の導入となる。

この当時の日本の粗鋼生産量は、年間 1200 万トンあまりに過ぎず、アメリカの 8 分の 1 にも満たない程度の規模でしかなかったが、BOF 導入後は平均して年率 15% を超える成長を続け、1973 年には年産 1 億トンを突破した。これはアメリカ（1.37 億トン）とソ連（1.31 億トン）に次いで世界第 3 位の生産量であり、鉄鋼輸出額も 53 億ドルを超え、西ドイツの 50 億ドルをしのいで世界最大であった。こうした急成長は、生産性の急激な上昇に伴って生じた。この 1957 年から 1973 年の間に、鉄鋼業の労働生産性（＝粗鋼生産量 ÷ 労働投入（man-hour））は 5 倍以上に上昇している。このような日本の鉄鋼業の発展は、BOF の導入を抜きにしては語れない。

日本は BOF の導入も早かったが、その後の普及も他国に比べて速かった。図 1 に見られるように、1971 年には粗鋼生産の 8 割が BOF によるものとなった。日本より先に、あるいは同時期に BOF を導入したアメリカや西ドイツでは、同年における BOF のシェアが 6 割前後であったことと比べると、その普及の速さが際だっていることが分かる。

図1 製鋼技術別生産シェア



出所：鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑」各年版より作成。

こうした日本における BOF の導入と鉄鋼業の発展については、既にいくつかの分析がなされている。リン (1986) は、BOF の導入を巡る経営組織のあり方に着目し、日米の主要な鉄鋼メーカーの意思決定を比較した。そして、特に導入の早かった日本企業においては、技術者の BOF に対する理解や、その情報が経営首脳陣に伝達されるような組織内関係、および商社や取引先を含めた「組織集団」の技術力に優れていたことを論じている。

また後藤 (1993) では、政府 (特に通産省) による技術導入の規制が果たした役割が強調される。当時の日本では、海外からの技術導入は、外資法および外為法の下で厳しい規制を受けていた。個々の技術導入案件は政府によって審査されるため、政府は技術導入のプロセスにさまざまな形で介入することができた。関口 (1986) によれば、「日本企業の技術輸入競争によって輸入の条件が不利化するのを防止し、外国企業が不平等な制限を課すのを防止するために」個別の案件を審査する過程で、当事者である企業の行動に介入するというのが、1950 年代における日本の技術導入政策の基本方針であった。

BOF に関しては、日本鋼管と八幡製鉄の 2 社が、ほぼ同じ時期に技術導入契約を結ぼうとしていた。しかし両社が契約締結を争うことによって導入条件が厳しくなるのを恐れた通産省は、両社の責任者をよんで協議を開き、その結果日本鋼管が日本側の唯一の窓口としてオーストリアの Alpine 社 (BOF を開発した企業の一つ) との契約交渉に当たり、八幡製鉄をはじめ国内の他の鉄鋼メーカーにサブライセンスする形で BOF の導入が認められることになった¹⁾。こうした政策判断が功を奏し、日本に有利な契約を結ぶことができたと言われている。

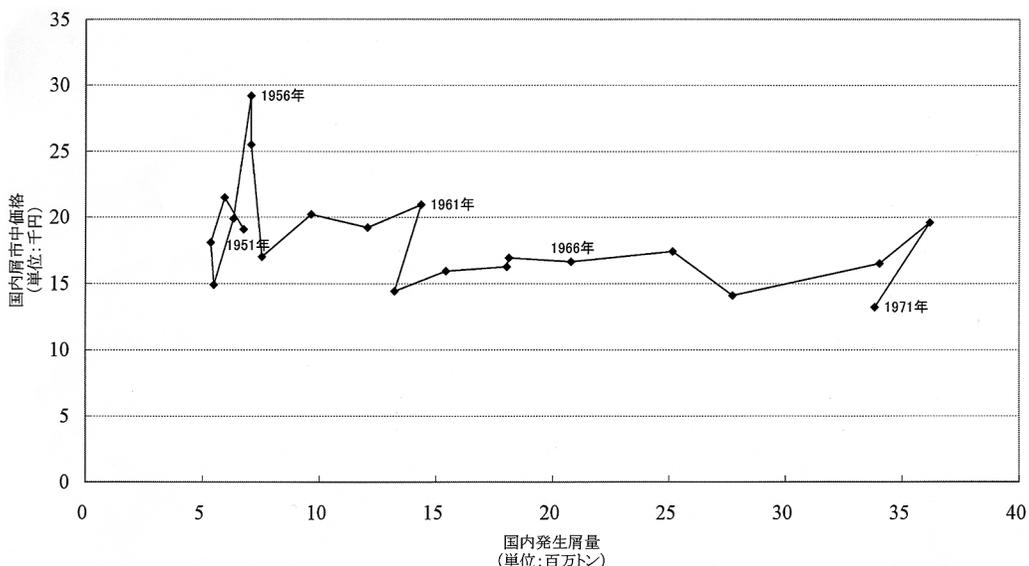
この点についてはリン（1986）も言及している。BOFを導入するために、日本企業は結果的に生産1トン当たり僅か0.36セント程度の対価を支払っただけであったのに対して、アメリカの企業は1トン当たり15～25セントのライセンス料を負担したと述べている²⁾。

これらの分析は、新しく登場した技術に対応する経営組織のあり方や、経済発展を促す政策の是非を考える上で示唆に富むものではあるが、そもそもある技術が企業によって選択されるか否かという問題においては、その技術の生産性が（他の技術との比較において）どれだけ高いか／高くなっていくかということが、主要な決定要因であると考えられる。従って、BOFの技術的な特性、ないしその推移について整理しておくことが、なぜBOFが日本でいち早く普及し、鉄鋼業の発展につながったのかという理由を探る上で必要となるはずである。本稿はこの立場から、開発～導入～改良～普及という一連の流れの中で、BOFという技術がどのように進歩し、それが日本の鉄鋼業にどのような影響を与えたか、あるいは日本の鉄鋼業を取り巻く環境とどのようにかかわってきたのかをたどる試みである。対象とするのは、1950年代から1970年頃にかけてのBOFに関わる技術的な変容になる。叙述に当たっては、日本鉄鋼協会（1982）をはじめ、実際にBOFという技術に携わった人々が著した資料に多くを依拠している。

日本企業がBOFの導入を検討していた頃は、この技術は潜在的には高い生産性が期待できるものの、依然として解決すべき課題を抱えており、必ずしも他の技術に対する優位が確定的ではなかった。これらの課題は、各企業が導入前の試験や導入後の操業経験を通じて、次第に対応が確立していったのである。また、この技術が大きく発展したのは、技術自体の進歩のみならず、使用する原料供給や生産される財に対する需要の動向が、この技術にとって有利に作用したことも影響している。さらには、BOF以外の製鋼技術がどのように変化していったのかということも、BOFがどれだけ使われるかを左右する重要な要因である。こうした技術史的な見地から、産業の発展と技術の関連を考える視座をまとめたい。

本稿の構成は以下の通りである。第2節では、BOFの導入が検討され始めた頃に、日本の鉄鋼業が置かれていた状況を述べる。第3節では、BOFの技術的な特徴を、他の製鋼技術と比較しながら概観し、BOFがどのような点で革新的であったのかをまとめる。第4節は、BOFが導入される経緯を各社の技術的な取り組みを中心に追っていく。第5節は、BOFの普及を促進した要因を、BOFの改良技術、原料の供給体制、生産される財の性質の面から整理する。第6節は、BOF以外の製鋼技術に焦点を当てる。BOFが導入された後も、これらの技術における改良の試みは続けられていたが、一つの技術は衰退し、もう一つの技術は埋没することなく、むしろ近年その存在感を増すことになった。第7節は結語である。

図2 鉄屑の需給状況 1951～71年



出所：国内発生屑量については、鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑」各年版より。国内屑市中価格については、日本鉄鋼連盟（1959, 69, 81）より。

2. BOF 導入の背景－1950年代の日本の鉄鋼業

鉄鋼業は、1950年代には日本の基幹産業であった。1955年の時点で全出荷額に占める割合は9.6%、付加価値額では8.1%を占める位置にあった。さらに鉄鋼業は、他産業への影響が大きい。造船、機械、建設といった、戦後復興期から高度成長期にかけて大きく生産が伸びた部門で、鉄鋼は重要な原材料として使用されていた³⁾。戦後の日本経済が成長していくために、鉄鋼業の発展は重要な役割を担っていたのである。

こうした重要性から、鉄鋼業の生産能力及び生産性を向上させることに対して、大いに関心が払われた。1951年から始まった一連の合理化計画は、こうした背景の中進められたのである。1950年代前半の第一次合理化計画では、ストリップミルをはじめとする圧延設備の導入に重点が置かれた。合理化計画資金の半分が圧延部門に注ぎ込まれ、この部門における生産能力および生産性は飛躍的に増大した。

合理化計画の進展により、鉄鋼業の生産能力は向上したが、鉄鋼業が発展するためにはもう一つ解決しなければならない問題があった。資源の確保である。鋼材の主原料の一つは鉄屑であるが、戦災によって一時的に増加していた鉄屑は、1950年代にはいと不足しがちになってきた。鋼材として生産されたものが鉄屑として回収されるには、20～25年程度かかる⁴⁾とされる。戦争の影響で生産が落ち込んでいた日本の鉄鋼業にとっては、生産を拡大していく上で必要な鉄屑を、国内で確保することは当面困難であった。そのため、日本の鉄屑価格

は諸外国よりも平均して 4 割から 5 割程度高く、殊に鉄鋼生産が大きく増加する時期には高騰し（図 2）、鉄鋼業の発展にとって大きな障害となっていた。

国内で十分な鉄屑が確保できないとなると、いきおい輸入に依存しなければならなくなる。しかし、欧米諸国でも鉄鋼増産の動きが盛んになったことから輸入も容易ではなく、1956 年にはアメリカの鉄鋼業界が鉄屑の輸出制限を要求したため、翌年富士製鉄の永野重雄社長らが「鉄屑使節団」として訪米し、輸出承認のための運動を行っている⁵⁾。日本の鉄鋼業が増大する需要に応えるためには、鉄屑への依存度を下げる必要があった。

鉄屑と並ぶ鋼材の主原料は銑鉄である。銑鉄は、鉄鉱石を高炉において精錬することで生産される。1950 年代に入ると、新たな輸入先が登場したことから鉄鉱石の品質が戦前よりも向上した。さらに原料の処理方法など、銑鉄を生産する技術面での進歩もあって、銑鉄の安定供給が可能になってきた。このため、日本の鉄鋼業が発展するためには高炉を充実させて銑鉄の供給量を増やし、銑鉄を鋼材の主原料とする方向で転換することが望ましいという考え方が広まった。先に述べた「鉄屑使節団」も、アメリカ側の理解を得るために、高炉の建設を進め、鉄屑依存度を下げる長期計画を携えていた。オーストリアで BOF が開発されたのは、ちょうどこのような時期であった。鉄屑依存度の低いこの技術は日本企業の関心を引き、1950 年代後半に始まった第二次合理化計画においては、高炉の建設と相俟って、その導入が推進されることとなる。

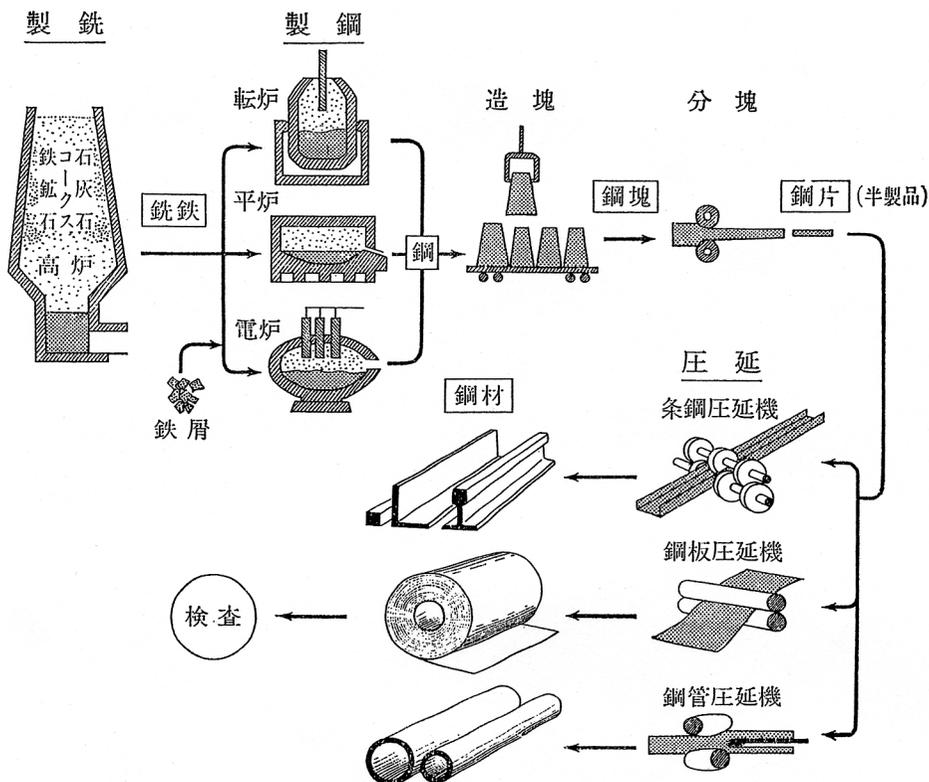
3. BOF とはどのような技術か

BOF の導入は、その後の日本の鉄鋼業における生産性上昇に大きく貢献した。本節では、どのような点で BOF が優れた技術であったのかを、他の技術との比較を交えながら概説する。

一口に鉄鋼の生産技術といっても、さまざまな工程から成り立っており、それぞれに役割が異なる。鉄鋼業の生産過程、すなわち鉄鉱石から鋼材ができるまでには、大きく分けて 3 つの工程がある（図 3）。原料である鉄鉱石は、酸素が結合した酸化鉄の状態で鉄を含有する。これを高炉内でコークスとともに燃焼することによって還元し、鋼材の原料になる銑鉄を得る。銑鉄を生産するまでが製銑と呼ばれる工程である。銑鉄は炭素、珪素、燐、硫黄などの不純物を多く含み、そのままでは鋼材としてふさわしい性質を持たない。そこで次に銑鉄を高炉内で熱し、その熱化学反応によってこれらの不純物を除去、あるいは加工に必要な元素を加え、望ましい化学的な性質を持つ鋼（粗鋼ともいう）につくりかえる必要がある。この工程を製鋼と呼び、BOF は製鋼法の一つである。製鋼過程では、銑鉄のほかに鉄屑も原料として投入される。鋼は加工しやすいように適切な大きさに分けられたあと（分塊）、さまざまな形に圧延・加工され、鋼材として出荷されることになる。

加工のしやすさ、脆さ、硬さといった鋼材の性質は、製鋼の段階でどのような成分比にな

図3 鉄鋼の生産過程（1960年代の頃）



出所：大木達治編『鉄鋼の実際知識』東洋経済新報社 1967. p.31.

現在の日本では製鋼は転炉（BOF）または電炉（電気炉）によって行われ、平炉は用いられていない。また、製鋼と圧延の間は連続製造機により工程が連続化されている。

るかによって決まる。たとえば燐が多く含まれると加工するときに亀裂が生じやすくなり、炭素が多く含まれると鋼材の硬度が増すことになる。これらの物質をどの程度含むとよいのかは、鋼材の用途によっても異なってくる。また、どの物質をどれだけ取り除けるべきなのかは、そもそもの原料である銑鉄や鉄屑が、どのような成分構成になっているかによっても変わってくる。製鋼法の発展は、いかにしてさまざまな望ましい成分比を、さまざまな条件の下で実現するかを追及する道のりでもあった。

この点に関して、第二次世界大戦後に大きな注目を集めたのが、製鋼における酸素の利用であった。酸化反応を利用すれば、銑鉄中の炭素、珪素、燐、硫黄などを効果的に取り除くことができ、またこのとき発生する熱が製鋼過程での反応を促進するからである。製鋼に酸素を利用するアイデア自体は19世紀には既に存在していた⁶⁾が、第二次世界大戦後になって酸素の量産化技術が確立されたことから、その実用化に対する関心が急速に高まった。1950年代にはいくつかの新しい製鋼法が提案されたが、酸素利用の実用化がその契機となったの

である。

製鋼法は、一般的には使用する炉の種類によって区別される。1950年代の日本では、(1) 平炉法、(2) トーマス転炉法、(3) 電気炉法の3種類の製鋼法が用いられていた。このうち電気炉法は、図4(b)にあるような密閉された炉内で、主に鉄屑から成る原料を電熱によって溶解するもので、他の方法よりも簡易な設備で済むという利点はあったが、この当時は電力供給が不安定であったこともあって大規模な生産には向かず、図1に示されるように、製鋼法全体に占める割合は小さかった。

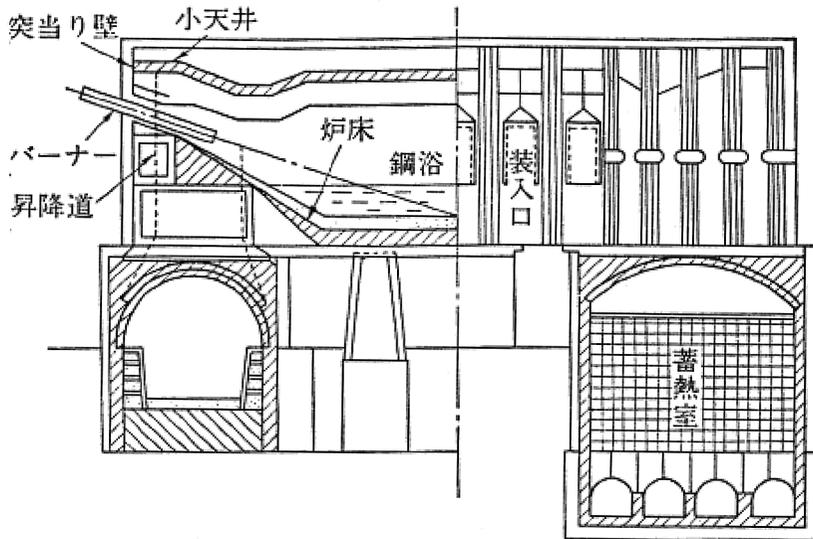
この当時主流であった製鋼法は平炉法である。平炉とは、図4(a)に示される構造を持つ。図4(a)の装入口(図5の正面側に見える)から銑鉄と鉄屑を炉床に入れ、これにバーナーで燃焼ガスを吹き付ける。このとき発生した廃ガスが持つ熱は、下にある蓄熱室を通過する際に内部のレンガに蓄えられることになる。蓄えられた熱は再び融解室に戻り、燃焼ガスによる熱と相まって装入原料を溶解し、化学反応を促進する。このように炉内で熱が循環して熱効率のよいことが、平炉の利点であった。基本的にどのような化学成分を持つ原料であっても精錬できるため、当時は最も主流の製鋼法として採用されていた。主要な製鋼工場では100トンや150トンという規模(製鋼に用いられる炉の大きさは、通常1回に生産できる鋼の量で表される)の平炉を何基も備え、大規模な生産を行っていた。製鋼における酸素の利用に関する研究も、まず平炉における利用を前提として進められた。1949年には主要な鉄鋼メーカー8社⁷⁾が共同して、平炉における酸素製鋼の実験が行われている。

もう一つのトーマス転炉法は、主として溶銑、すなわち溶けた状態の銑鉄を原料とする製鋼法である。溶銑を図4(c)のような形の炉に注入し、炉の底から空気を送り込むと、空気中の酸素が溶銑中の燐と反応して発熱し、その熱化学反応を通じて炭素などを目標とする水準に至るまで取り除く。この作業は吹錬と呼ばれ、溶銑を空気によって攪拌させて激しい反応を生じさせることから、平炉法に比べるとかなり短時間のうちに精錬が終わる。平炉の場合は、一連の反応が終わるまでにはおよそ4～5時間程度かかるのが標準的とされるが、転炉では精錬に数十分しかかからない。また、溶銑中に十分な燐があれば外部燃料を必要としないという利点も持つ⁸⁾。このような優れた点もあったが、トーマス転炉法を行うためには、一定以上の比率で燐が溶銑に含まれている必要がある。当時日本で唯一トーマス転炉を稼働させていた日本鋼管は、そのために高価な燐鉱石を購入する必要がある。またトーマス転炉法では、鋼材の品質を落とす燐の除去に時間がかかり、その間に炭素の除去も進んでしまうため、トーマス転炉法は炭素が多く硬度のある鋼材の生産には向かない。このような鋼種の制限もあり、トーマス転炉法は日本で広く普及するには至らなかった⁹⁾。

BOFは、トーマス転炉と同じく転炉の一種であるが、次の2つの点で異なっている。第一に、吹錬には空気の代わりに酸素を吹き込む。空気に含まれる窒素が溶鋼に溶け込むと、加工時に鋼材が割れやすくなったり、低い温度に晒された場合に脆くなったりするという問題

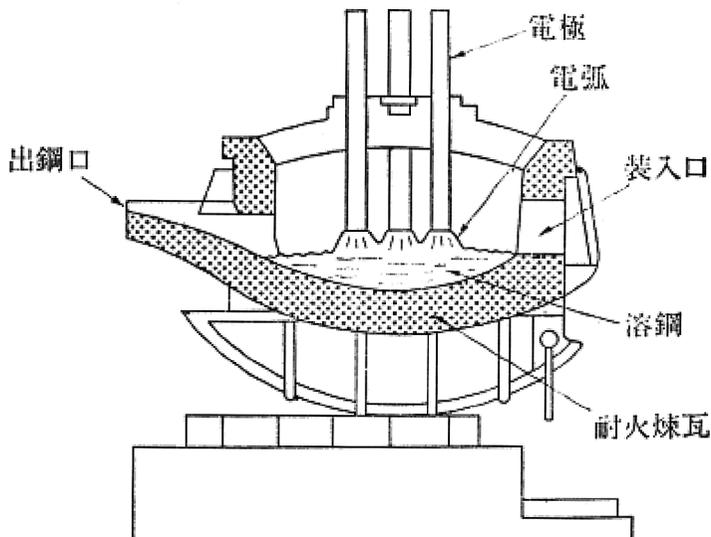
図4 製鋼炉の種類

(a) 平炉



図の右側が平炉の外観を表し、左側は右側の断面図になっている。「鋼浴」とは、熔解された鉄屑や銑鉄で、バーナーからの燃焼ガスと、蓄熱室からの予熱を受けて精錬される。炉内は、(多くの場合塩基性の)耐火レンガで覆われている。高炉に対して低い炉であることから、「平炉」と名付けられた。

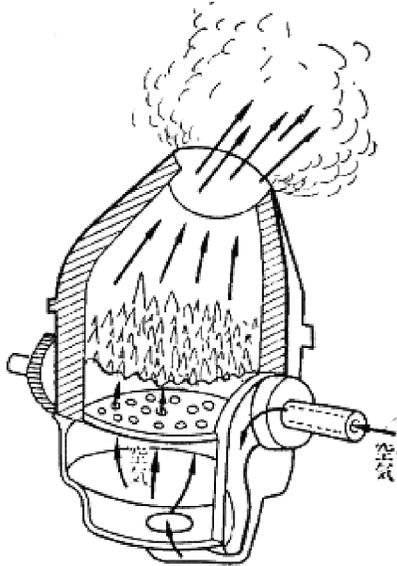
(b) 電気炉



電気炉の中でも広く用いられている弧光式電気炉(エルー式電気炉)の断面図。電極から飛ばされる電弧(アーク)によって熔解・精錬を行う。

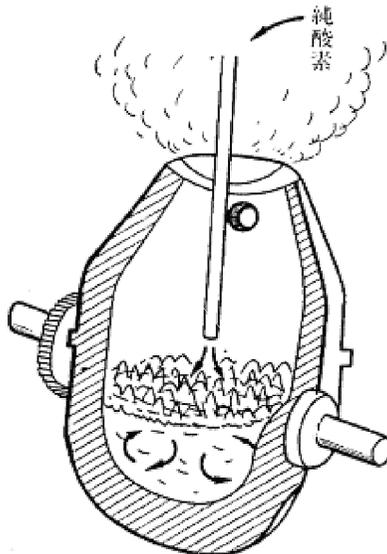
図 4 製鋼炉の種類 (続き)

(c) トーマス転炉



炉の底から、炉内の溶銑に空気を吹き上げて精錬を行う。精錬が終了すると、炉を傾けて出鋼することから「転炉」と呼ばれる。

(d) BOF



炉の上から純度の高い (99.5%以上) 酸素を溶銑に向かって吹き付けて、精錬を行う。精錬が終わると炉を傾けて出鋼する点は、トーマス転炉と同じ。

出所：(a)・(b) は、ダイヤモンド社 (1974) より。(c)・(d) は鉄鋼界 1961 年 1 月号, p.77 より。

図5 平炉



川崎製鉄・千葉製鉄所における平炉の様子。

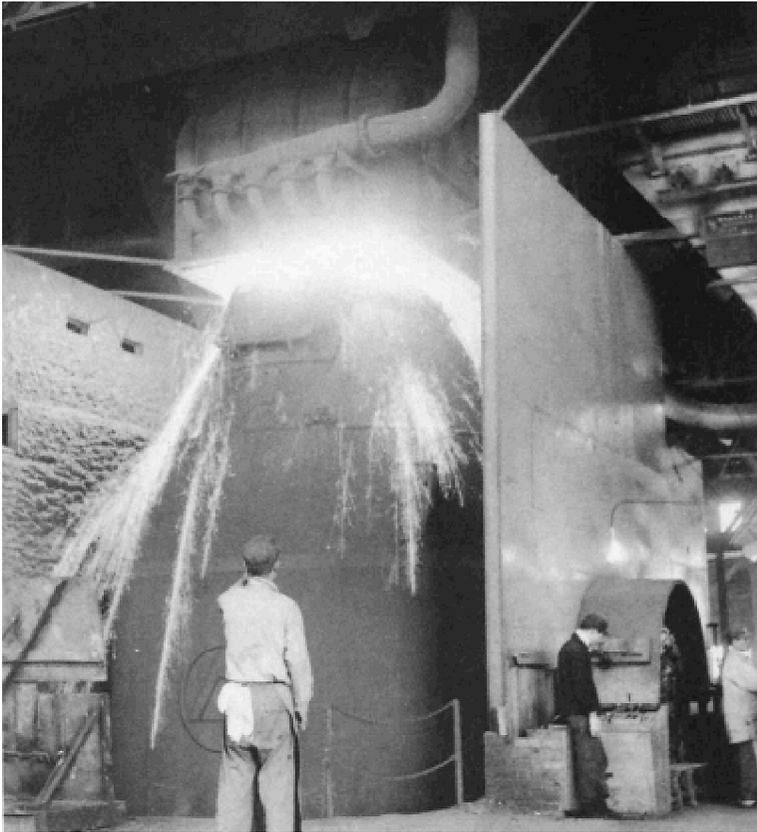
出所：日本鉄鋼連盟（1959）。

が生じる。そのため、機械工業や自動車産業が発達して冷間加工されることが多くなるにつれ、転炉鋼は品質の劣るものという認識が広まった。純酸素を利用すれば窒素の問題は解決され、より優れた品質の鋼材を生産することができる¹⁰⁾。また、空気を利用する場合よりも加熱が容易で、溶銑にそれほど多く燐が含まれている必要もなくなる。第二には、酸素を炉の底からではなく、図4(d)にあるように炉の上から鋼浴に向かって勢いよく吹き付ける。この方式によれば、従来の方式よりも反応が安定的になり、製鋼歩留まりの向上が見込まれる（BOF 操業の様子は図6）。

元々転炉は平炉に比べ製鋼時間が短く、設備費が少なくすむという利点があった。平炉は通常図5に見られるように、一つの工場に何基も連ねて使用されていたが、BOF の場合は同じ年間生産量をより少ない炉数で実現できる。また、平炉よりも炉の構造が単純であるという点も、設備費の面で有利に働く。武田（1962）によれば、酸素工場などの分を含めても、平炉の60～70%の設備費で、同じ生産能力を持つBOF工場が建設できたとされる。

BOF は設備費だけでなく、操業費の面でも平炉より優位にあった。表1は、平炉に対するBOFの操業費用上の優位をまとめたものである。いずれの項目においてもBOFの方が少ない費用ないし同程度ですむことが分かる。特に「耐火物・炉修材・補助材料」「燃料・動力」の項目における費用削減効果が著しい。前者については、平炉もBOFも、その精錬過程にお

図 6 BOF における作業の様子



操業開始当時（1957年9月）の八幡製鉄・八幡におけるBOF。

出所：新日本製鐵（1981a）。

表 1 平炉とBOFの操業費比較：年産100万トンのケース

| | 平炉 (A) | BOF (B) | B/A |
|--------------|-----------|------------|-------|
| 減価償却 | 23.7 | 16.0 | 0.675 |
| 間接費・諸雑費 | 5.0 | 4.2 | 0.840 |
| 耐火物・炉修材・補助材料 | 26.7 | 8.3 | 0.311 |
| 工具・鑄型 | 10.8 | 10.8 | 1.000 |
| 燃料・動力 | 23.4 | 10.4 | 0.444 |
| 労務費 | 10.4 | 6.7 | 0.644 |
| 合計 | 100.0 | 56.4 | 0.564 |

土井（1966）, p.14図1-7より。平炉の操業費合計を100とした時の値。

戦後日本における技術導入と普及：鉄鋼業における BOF の受容*

いて炉内が高温になるため、炉の内側に耐火レンガが張られている。BOF では、激しい反応が生じる部分は酸素ジェットが鋼浴に当たる周辺に限定されるため、炉内の耐火物の損傷はあまり大きくなり、平炉に比べると張り替えの頻度が少なく済んだ。後者については、溶銑の酸化反応熱を利用することが外部燃料を不要にしたことによるものである。

要するに BOF の利点は、

- ・平炉よりも少ない設備費・操業費で、より高い生産性を発揮する。
- ・トーマス転炉よりも利用できる原料の品質・生産される鋼材の種類と品質の面で優れ、平炉と遜色のないものになる。

ということにある。加えて当時の日本は鉄屑不足の問題に直面しており、鉄屑への依存度が低いことも BOF の導入を促す要因となった。

このように BOF は従来の製鋼法よりも優れた技術であるが、発明された当時、あるいは日本への導入が検討された当時には、必ずしもその優位が日本の鉄鋼業全体で認識されていたわけではない。平炉において酸素の利用を進めて生産性を向上させる努力は続けられており、また BOF 以外にも新しい製鋼法が提唱され、その導入を検討した企業もあった。次節では、BOF という技術に対する各社の認識に触れながら、日本における BOF 導入の経緯を述べる。

4. 日本における BOF 導入の経緯

BOF はオーストリアで開発され、1950 年 1 月には特許が申請された。最初の BOF 工場が稼働したのは 1952 年である。日本企業の中には、この最初期から BOF に注目していたものもあった。また政府（具体的には通産省）も、日本の鉄鋼業が発展するために BOF の持つ可能性を喧伝していた。1955 年には通産省の製鉄課長が、業界誌「鉄鋼界」に BOF の利点をまとめた論文（三井（1955））を寄稿している。

しかし 1950 年代前半の段階では、BOF の将来性に注目する見方がある一方で、その技術的な困難を指摘する声も少なくはなかった。BOF の利点を紹介した三井（1955）においても、

- ・酸素製鋼では排気ガスが著しく発生し、その処理にコストがかかり、設備も大きくなる。
- ・精錬に要する時間が平炉に比べて大幅に短く、反応の制御が難しい。

という 2 点が指摘されている。ただし第一の点は、当時進められていた平炉における酸素使用でも同様の問題が生じるため、BOF 固有の問題というわけではない。そのため、BOF を導入するか、それとも平炉における酸素製鋼法の開発を推し進めるかという選択に当たっては、まず第二の点にいかに対応するかを検証する必要があった。

また当時の BOF は、鉄鋼業の生産性を高めるために有望な製鋼法の一つとして捉えられてはいたが、唯一の存在というわけではなかった。酸素の利用を中心として平炉における改良

の努力は続けられていたし、同じ転炉技術の中でも横吹き法、カルドー法、ローター法の3種類が提案されていた¹¹⁾。BOFを導入するには、これらの製鋼法との比較においても優位であることが検証される必要があった。既にオーストリアでは実用化された技術ではあり、操業の様子を見学するための視察団が現地に派遣されることはあったが、操業の詳しい情報を把握することはできなかった¹²⁾。また、原料事情が異なるなどの理由から、必ずしも日本でも同じように操業できるとは限らないこともあり、いずれにしても自分たちで検証する必要があったのである。

こうした検証は、実際にさまざまな条件下で吹錬を繰り返すことで行われる¹³⁾。これが可能になるための必要条件は、高炉を保有していることである。BOFは銑鉄を主原料とする製鋼法であるため、操業試験を継続的に行うには、自社で溶銑が供給できなければならない。1950年代前半の日本で高炉を保有していたのは、八幡製鉄、富士製鉄、日本鋼管、川崎製鉄、住友金属、尼崎製鉄の各社であった（1950年代後半には神戸製鋼も高炉を保有した）が、このうち早くからBOFの試験に取り組んだのは、八幡製鉄、富士製鉄、日本鋼管の3社であった。

各社の取り組みの経緯は表2にある通りである。もともとトーマス転炉を稼働させていた日本鋼管は早くから関心が高く、八幡製鉄と富士製鉄は転炉を実稼働させてはいなかったが、1950年代前半には試験転炉を設置して操業試験をおこなった。しかし各社とも当初からBOFの試験に取り組んだわけではなく、トーマス転炉における酸素利用や横吹き法などの成果が芳しくないことを確認してから、BOFの試験を開始している。

日本鋼管と八幡製鉄は順調に試験を続け、適正な吹錬方法や耐火物の開発に成功し、90%程度の製鋼歩留まりは見込めると判断して、ほぼ同時期にBOFの導入を決定した。これに対して富士製鉄は決定が遅れ、BOFを導入することを決めた時点で既に八幡製鉄がBOFを稼働させており、BOFの操業を開始したときには、日本鋼管も八幡製鉄も第二のBOF工場を稼働させたあとであった。

富士製鉄では、平炉の酸素利用操業を優先させ、BOFの試験は大きな制約を受けていた。試験期間は1956年6月から2年あまりあったが、その間の試験回数は八幡製鉄の6分の1強に過ぎない。そのため耐火物の性質などについて十分な情報が得られず、BOF操業に関する問題に対して満足な解答を得られなかった。このように、早くから注目していたにもかかわらず、その導入に消極的であった理由の一つは、3社の品種構成の違いにあると考えられる。表3は、3社で最初にBOFが導入された工場における主力品種を示したもののだが、富士製鉄の場合は厚板・中板、すなわち主として造船用の鋼板が主力であった。当時の認識では、転炉鋼は造船用鋼板には不向きとされており、逆に自動車用鋼板や鋼管などに用いられる低炭素鋼の生産には向いていると考えられていた。八幡製鉄でも厚板の生産は盛んであったが、同時に自動車向け鋼板などの低炭素鋼の生産も多く、実際BOF稼働直後に生産されたものは、

表2 主要メーカーによる導入の経緯

| 年 | 月 | 日本鋼管 | 八幡製鉄 |
|------|----|--------------------------------|-------------------------|
| 1951 | 7 | ヨーロッパでトーマス法の調査。BOFの実験炉を見学。 | |
| 1952 | 6 | 技術者グループの自発的判断で試験転炉による上吹き法試験。 | |
| 1953 | 5 | | |
| | 6 | | |
| | 7 | BOFの調査を開始（当面はトーマス転炉の酸素富化実験優先）。 | 試験転炉設置。横吹き法の試験開始。 |
| 1954 | 4 | | |
| | 7 | 川崎製鉄所の転炉技術者グループが、本社にBOFの採用を要望。 | BOFの試験開始。 |
| 1955 | 5 | | BOFの試験開始。 |
| | 6 | BOFの特許の状況を調査。 | BOF社と技術導入交渉開始。 |
| | 9 | 八幡製鉄との間で、BOF導入に関する協定締結。 | 日本鋼管との間で、BOF導入に関する協定締結。 |
| 1956 | 4 | Alpine社との間でBOF導入契約締結。 | |
| | 6 | | |
| | 8 | Alpine社より技術指導を受ける。 | |
| 1957 | 3 | | |
| | 7 | | |
| | 9 | | 洞岡BOF稼働。 |
| | 10 | | |
| 1958 | 1 | 川崎BOF稼働。 | |
| | 10 | | |
| | 10 | | |
| 1959 | 1 | | |
| | 3 | | |
| | 7 | | |
| | 10 | | 戸畑BOF稼働。 |
| 1960 | 3 | 水江BOF稼働。 | |
| | 9 | | |
| | 11 | | |
| 1961 | 5 | | |
| | 11 | | |
| 1962 | 4 | | |

日本鉄鋼協会（1982）および各社社史より作成。

表 2 主要メーカーによる導入の経緯 (続き)

| 富士製鉄 | | その他の主要メーカー |
|------|----|-------------------------------|
| 年 | 月 | |
| 1951 | 7 | |
| 1952 | 6 | |
| 1953 | 5 | ヨーロッパでBOFの実情調査。あまり高い評価を下さず。 |
| | 6 | (川) 千葉第1高炉火入れ(銑鋼一貫メーカーになる)。 |
| | 7 | (住) 小倉製鋼を合併 (銑鋼一貫メーカーになる)。 |
| 1954 | 4 | |
| | 7 | 横吹き法の試験開始。 |
| | 10 | |
| | 12 | |
| 1955 | 5 | |
| | 6 | |
| | 9 | |
| 1956 | 4 | BOFの試験開始。しかし十分な成果を上げられず。 |
| | 6 | |
| | 8 | |
| 1957 | 3 | (尼) BOF調査団をヨーロッパに派遣。 |
| | 7 | (住) 小倉へのBOF導入決定。 |
| | 9 | |
| | 10 | BOF導入を決定。 |
| 1958 | 1 | |
| | 10 | 日本鋼管とサブライセンス契約 = 日本BOTグループ誕生。 |
| | ク | (尼) 尼崎製鉄・尼崎製鋼合併。 |
| | ク | (住) 欧米に調査団派遣。 |
| 1959 | 1 | (神) 瀬浜第1高炉火入れ(銑鋼一貫メーカーになる)。 |
| | 3 | (川) 日本鋼管とサブライセンス契約。 |
| | 7 | |
| | 10 | |
| 1960 | 3 | (尼) BOF稼働。 |
| | 9 | |
| | 11 | 広畑BOF稼働。 |
| 1961 | 5 | (住) 小倉BOF稼働。 |
| | 11 | (神) 瀬浜BOF稼働。 |
| 1962 | 4 | (川) 千葉BOF稼働。 |

日本鉄鋼協会 (1982) および各社社史より作成。(川) 川崎製鉄, (住) 住友金属, (尼) 尼崎製鉄・尼崎製鋼, (神) 神戸製鋼。

表 3 富士製鉄・広畑と BOF 早期導入工場との主力製品比較
(1955 年度の生産量上位 5 品目)

| 日本鋼管 川崎 | 八幡製鉄 八幡 | 富士製鉄 広畑 |
|----------------|---------------|---------------|
| 特殊鋼鋼管 305.5 | 広幅帯鋼 522.8 | 厚板 287.4 |
| 普通鋼鋼管 156.1 | 厚板 287.6 | 広幅帯鋼 190.9 |
| 小形棒鋼 96.3 | 重軌条 232.8 | 冷鋼板 133.4 |
| 帯鋼 74.9 | 冷鋼板 176.4 | 中板 68.1 |
| 管材 72.0 | 大形形鋼 154.0 | 薄板 32.7 |

鉄鋼新聞社「鉄鋼年鑑」より。単位：1000トン。

「鉄鋼年鑑」でとりあげられている鋼材27品目について、その生産量が多い順に上から5品目を並べた。

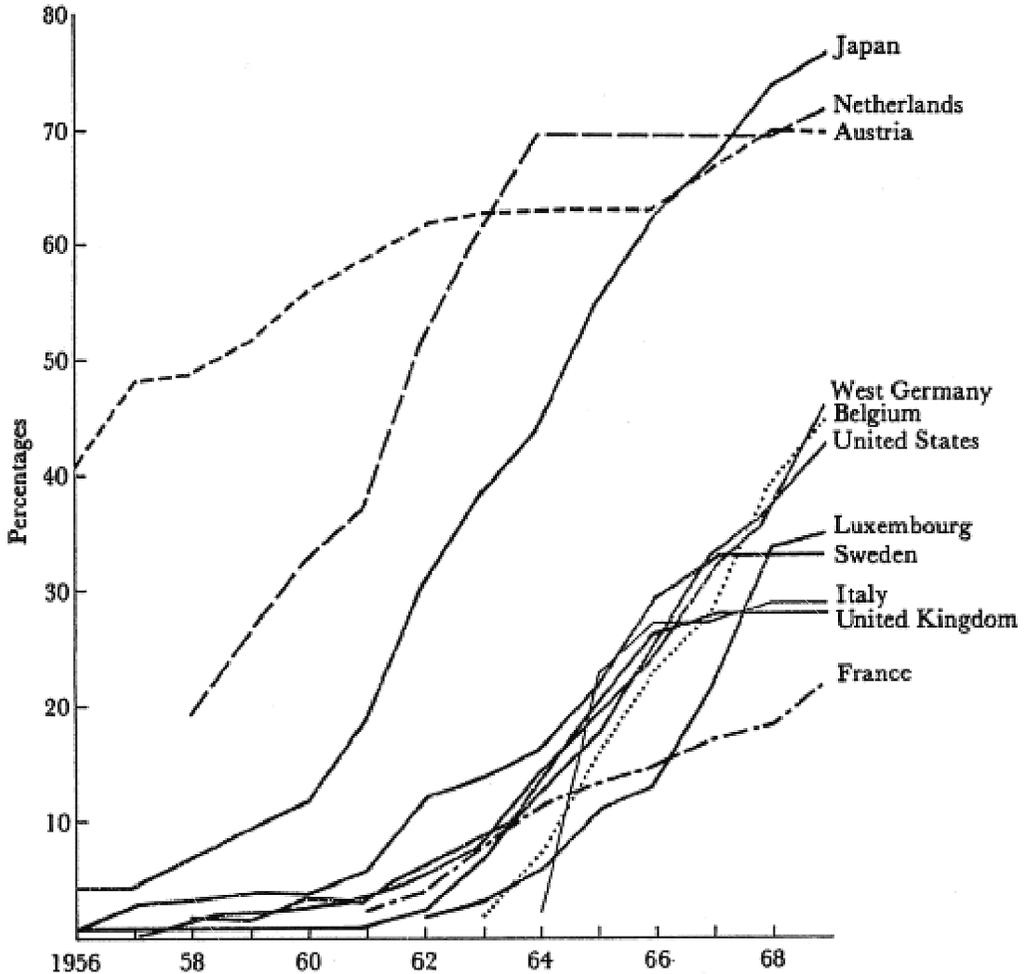
ほとんどが低炭素鋼であった¹⁴⁾。こうした点から、富士製鉄にとっては BOF を導入しても主力製品の生産には向かず、導入によって得られる利益はあまり高くないと認識されていたことが窺える¹⁵⁾。

他の主要メーカーは、八幡製鉄・日本鋼管の両社が BOF を導入したことを受けて導入に踏み切った¹⁶⁾。これらの企業は、八幡製鉄と日本鋼管で実際に稼働している BOF を見学することができ、両者から技術指導を受けることもできた¹⁷⁾。日本鋼管が日本側の代表として Alpine 社と技術導入契約を結んだ際に、自由に技術情報を交換することが認められており、また日本鋼管内部も「国内みんなで行おうとする意見に完全にまとまっていた」（日本鉄鋼協会（1982），p.73）ことが、このことを可能にした。技術情報の伝播において、地理的な緊密さは重要である（Jaffe（1989），Zucker, Darby, and Brewer（1998）など）。特に複雑な技術情報が伝えられるには、その技術についての知識を持つ企業と、直接コミュニケーションがとれることの意義が大きくなる。日本における BOF の普及が他の国よりも速く進んだ背景には、こうした経緯があったことも見逃せない。

5. BOF の普及を促した技術的要因

最初の導入から 5 年で、日本の主要な鉄鋼メーカーはすべて BOF を使用するようになった。

図 7 主要国における BOF の普及

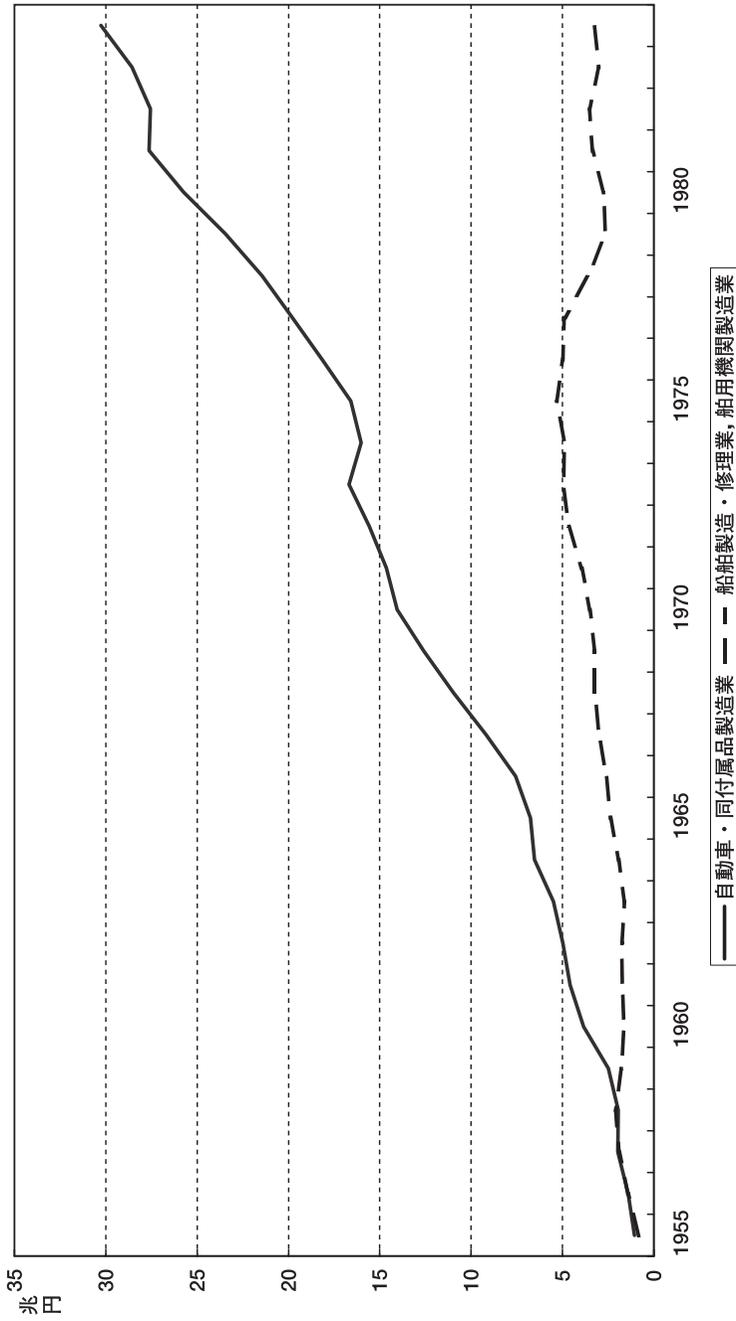


出所：Meyer and Herregat (1974), p.153.

各国の粗鋼生産のうち BOF によるものの割合を表している。

その後の普及は目覚ましく、諸外国と比べても非常に速いものであった（図 7）。BOF が日本でこれほど普及した理由を考える上で、BOF が生産する鋼種の特性と、高度成長期における日本の産業構造の変化とが、うまく調和していたという点は重要である。BOF は、平炉に比べると炭素が少ない鋼材を生産するのに適していた。低炭素鋼は冷間加工性が高く、とりわけ自動車向けの薄鋼板に向いている素材である。この点を考えると、1960 年代以降の日本の産業構成の変化は、BOF の普及を後押しするものであったといえる。図 8 にあるように、1950 年代には自動車と造船は、ほぼ同程度の規模を持つ産業であったが、BOF が導入された 1950 年代末ごろからその差が開き始め、以後の成長率は圧倒的に自動車の方が高く、日本の

図 8 自動車と造船の製品出荷額推移



出所：総務庁統計局監修「日本長期統計総覧」。

基幹産業の地位を占めるに至った。この間に平炉から BOF への転換も完了しており、「自動車はまさに [BOF] とともに歩んできた」(日本鉄鋼協会 (1982), p.134) といえよう。

しかし各企業が平炉を完全に BOF へと切り替えるには、BOF によって生産できる鋼種が拡大し、従来平炉が生産していたものを全て置き換えていく必要がある。この転換は、BOF の導入後に生じた操業技術、設備のあり方、投入する原料といった各面での発展によって進められたといえる。これらの中には、日本の鉄鋼メーカーが開発し、欧米の企業に技術輸出されたものもある。

転炉の大型化

製鋼過程の生産性は、炉の大きさにも依存する。図 9 は日本における BOF の炉容の推移を示したものである。BOF の炉容は、導入後の数年間は 50 ～ 70 トン程度にとどまっていたが、1962 年になって一挙に拡大した。その後の推移は、大まかに

- ・新たに建設された工場に大規模な（最小でも 160 トン）BOF を設置する。
- ・既存の平炉工場で、平炉を BOF に置換する。この場合は建物や敷地の制約などから、あまり大きな炉は使用されない（最大でも 100 トン）。

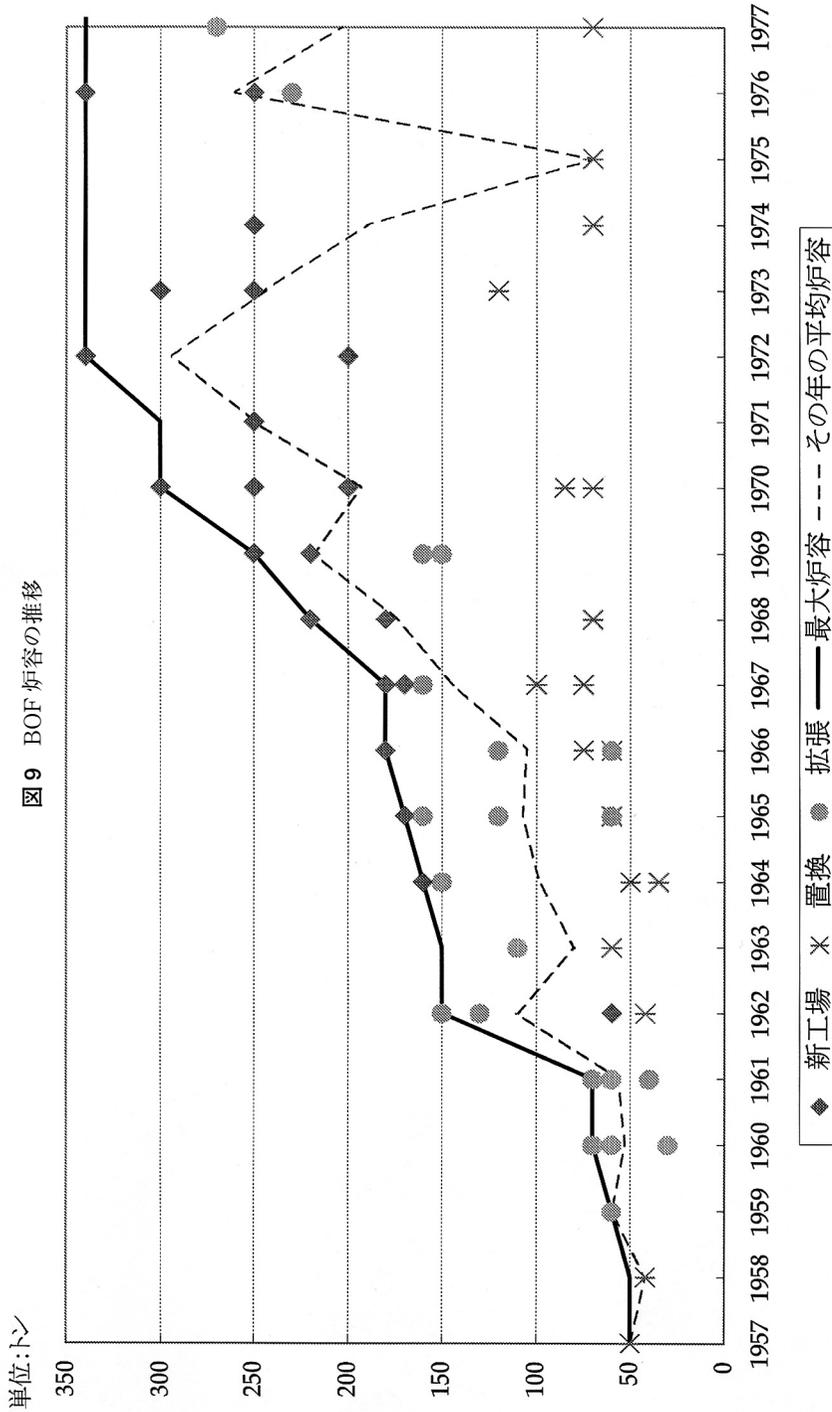
という 2 つの流れにまとめられる。この流れの中で、製鋼の主流は大型の BOF を持つ新鋭製鉄所に移行していった。このような BOF の大型化をもたらした主因は、この時期に開発された 2 つの改良技術、すなわち多孔ランスと OG 装置である。

多孔ランス

導入当初の BOF の操業は、必ずしも十分効率的なものではなかった。導入以前から試験を繰り返していたとはいえ、操業条件は原料の性質、炉体の形や古さなどさまざまな要因から影響を受け、適切な操業形態を規範化するには、こうした諸条件が吹錬に及ぼす影響を把握しなければならない。しかし BOF では鋼浴が酸素ジェットを吹き付けられて激しく運動するため、炉内反応を理論的に把握するのは非常に困難であった。従って、初期には炉前作業員の熟練と勘に頼る部分も多かった。例えば日本鋼管・川崎製鉄所では、燃焼炎の状態を肉眼で観察することで吹錬の終了を判定していた(岸田他 (1961))。適切な吹錬条件を定式化する試みは早くから行われていたものの、なかなか満足な成果は上げられなかった¹⁸⁾。

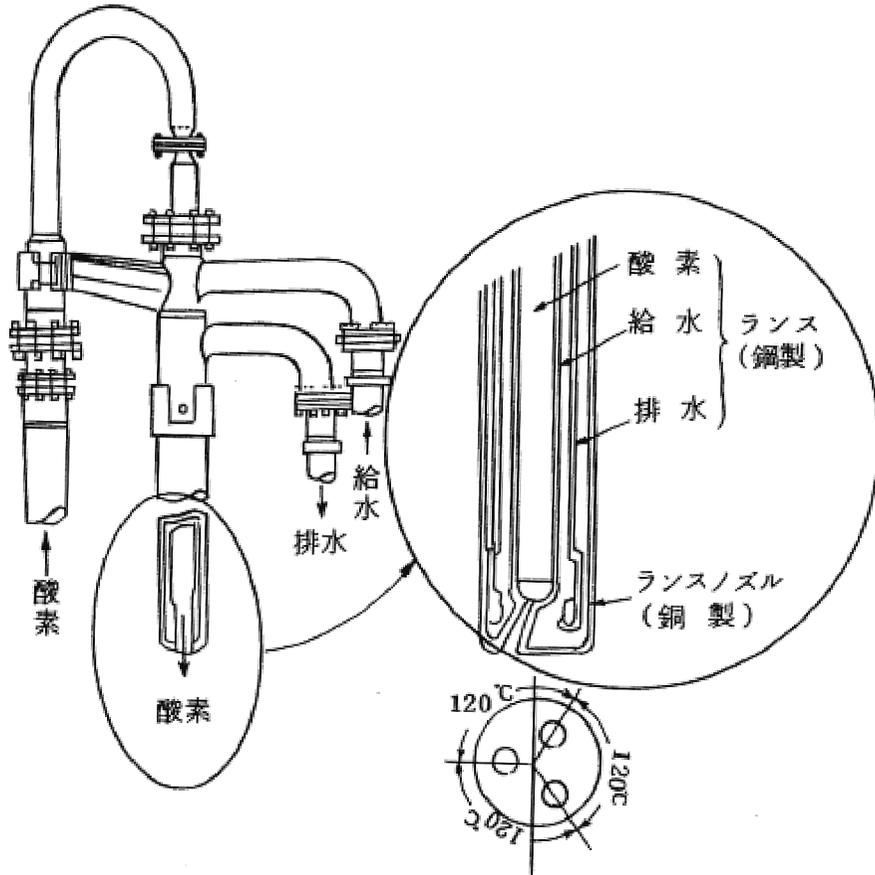
特に BOF 操業に固有の問題として、スロッピング(噴出)とよばれる現象がある。吹錬中に突発的に溶鋼が炉外に噴出するもので、歩留まりを下げる原因であり、甚だしい場合にはそれ以上吹錬が続けられないということもあった¹⁹⁾。

大型炉では吹き込まれる酸素の量が膨大なものになり、鋼浴運動がより激しくなってスロッピングがおきやすくなる。スロッピングを防ぐために、当初は炉を高くすることで対応したが、炉容を拡大するとそれに合わせて工場の諸設備を高くする必要が生じ、BOF の利点の



日本鉄鋼協会 (1982), p.p.156 ~ 161, 表 4.1 に基づいて作成。「新工場」は、新たに BOF 工場として建設されたものに設置された炉, 「置換」は従来平炉工場 (またはトーマス転炉工場) だったものを BOF に置き換えたもの, 「拡張」は既存工場を拡張して BOF を設置したもの。「最大炉容」は, その時点で稼働している最大の炉の大きさ。「その年の平均炉容」は, その年に新設された炉の大きさの平均。

図 10 ランスの例



出所：日本鉄鋼協会（1982），p.181・図 4.29。

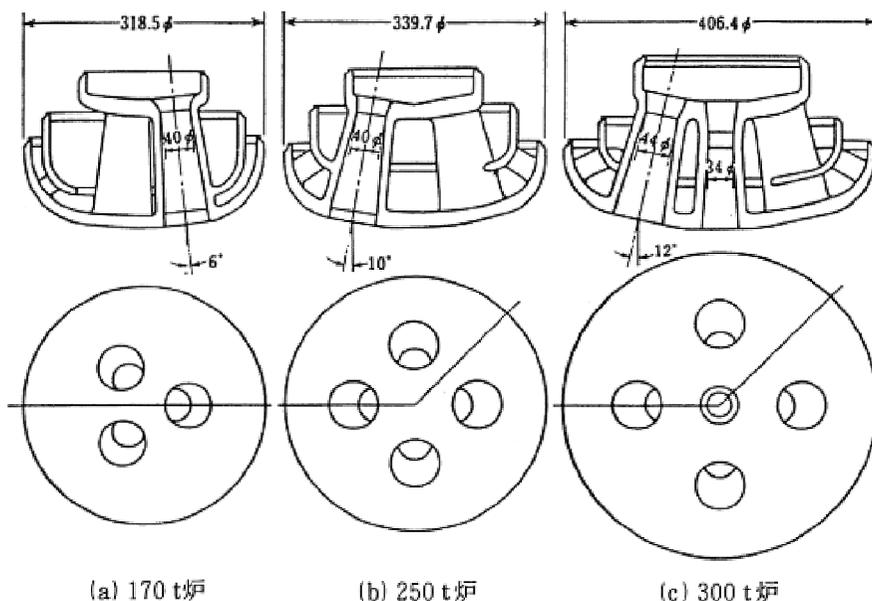
ランスは高温の条件下で使用されるため、水で冷やすことで損傷を防ぐ。先端のノズル部分に大きな孔が1つだけあいているものが単孔ランス、複数あいているものが多孔ランスである。

一つである設備費の安さが失われることになる。そのため炉の高さを変えずに、むしろ操作を工夫することでスロッピングを防ぐ方策が検討されることとなった。

スロッピングを抑えるには、まず酸素の吹き込み圧力を下げるのが有効な手段であると考えられた。炉内の鋼浴運動が激しいことがスロッピングの原因であり、緩やかに酸素が吹き付けられればよいということである。しかし酸素の吹き込みが弱いと、今度は鋼浴の反応が不均一になって、むしろスロッピングが生じやすいということが分かってきた。

そこで考案されたのが、ランスノズルの多孔化である。ランスというのはBOFにおいて酸素ジェットを吹き込む管のことである（図 10）。先端のノズルは当初は径の大きな孔が一つ空いているだけであったが、これを図 11 のように複数の小さな孔をあけ、やや傾斜をつけて鋼浴に酸素を吹き付ける方式に変更した。単孔のノズルと多孔のノズルの違いを表したものが、

図 11 多孔ランスにおけるランスノズルの先端



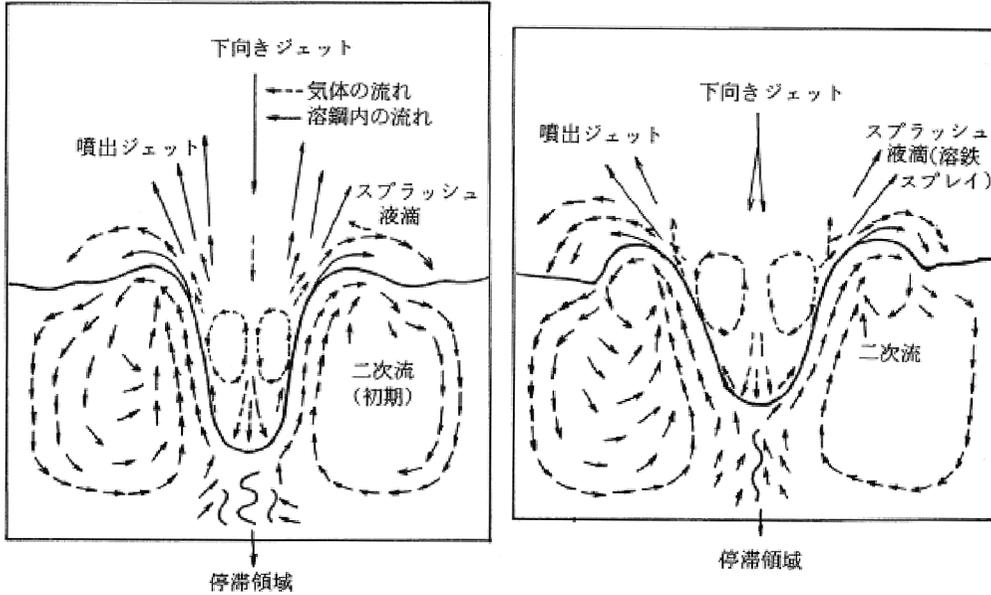
出所：日本鉄鋼協会（1982），p.183・図 4.36。

(a) 比較的小規模な炉では 3 孔ランス，(b)・(c) 200 トンを越えるような大型炉では 4 孔または 5 孔ランスが用いられる。ランスノズルの向きは鋼浴に対して垂直でなく、若干の傾斜（ $6^{\circ} \sim 12^{\circ}$ ）がつけられている。そのため、酸素ジェットはやや傾斜がついた状態で鋼浴に吹き込まれる。

図 12 である。多孔の場合，鋼浴が激しく攪拌されてもその跳ね上がりの角度はより緩やかになり，炉外に噴出しにくくなって，スロッピングが生じにくくなる。このため，あまり炉を高くしなくても製鋼歩留まりの向上が見込まれるわけである。ランスの多孔化の研究は，1960 年から八幡製鉄の 60 トン炉を用いて行われており²⁰⁾，1962 年 3 月に八幡製鉄の 130 トン炉で初めて実用化された。

多孔ランスが開発されたことで，あまり炉を高くせずに炉容を拡大することが可能になった。多孔ランスを初めて導入した八幡製鉄の 130 トン炉の炉高は 8.3m であり，その前年に稼働し始めた富士製鉄の 70 トン炉の 8.45m よりも低く抑えられたのである。さらに，多孔ランスを使用することで耐火物の寿命が延びること，燐の除去がより効率的になること，製鋼時間が短縮されることなども確認され，炉の大型化に寄与するばかりでなく，生産性を高める効果を持つことも分かった。こうした成果は，業界内の研究会や学会報告などを通じて，すぐに他の企業にも共有され，1964 年頃までには，ほぼ全ての炉で多孔ランスが採用されることとなった。

図 12 多孔ランスの効果



出所：日本鉄鋼協会（1982），p.361・図 5.28。

酸素ジェットを吹き付けたときの鋼浴運動の様子。左が単孔ランスの場合、右が多孔ランスの場合。多孔ランスの方が浅い吹き込みになり、鋼浴の跳ね上がりの角度も緩くなるため、スロッピングが生じにくくなる。大量に酸素を送り込んでもスロッピングが起りにくくなり、製鋼時間も短縮できるようになった。

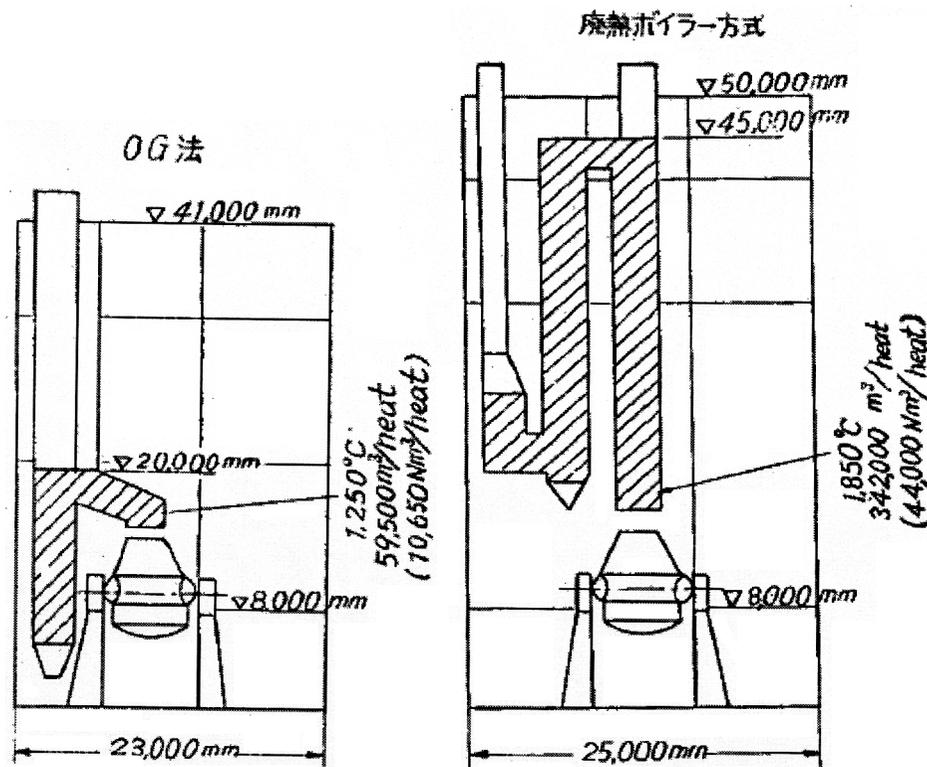
OG 装置

炉の大型化の際にもう一つ問題になったのが、廃ガス処理装置である。酸素を大量に使用すると、吹錬のときに廃塵を含む大量の CO ガスが発生し、これを適切に処理しなければならない。この廃ガス問題は、実用化して間もないオーストリアの BOF を富士製鉄の技術者が見学した際にも、慎重な検討が必要であると懸念させたほどである。

BOF が開発された当初は、CO ガスをボイラーで完全燃焼させてから冷却・除塵する方法がとられていた。この方法の欠点は、まず設備の規模が大きくなってしまふことにある。湯川・岡庭（1963）によれば、130 トン炉を建設する場合、ボイラーの高さは 50m に達し、工場内で最も高い建物になってしまう。また、燃焼によって廃塵は高温かつ微細なものになってしまうために、集塵装置も大規模なものとなし得ない。

これに対して、廃ガスを燃焼せずに回収すれば、処理すべき廃ガスの量が少なくなり（ボイラー方式の約 4 分の 1）、ガス温度も低く（ボイラー方式では 1800℃ になるのに対し、御燃焼の時は 1250℃）、廃塵も比較的大きなままであるため、設備がはるかにコンパクトなものになる（図 13）。その上回収した廃ガスを燃料として使えるメリットもある。こうして生み出されたのが、未燃焼廃ガス処理設備の OG 装置である（図 14）。

図 13 ボイラー方式と OG 装置の比較



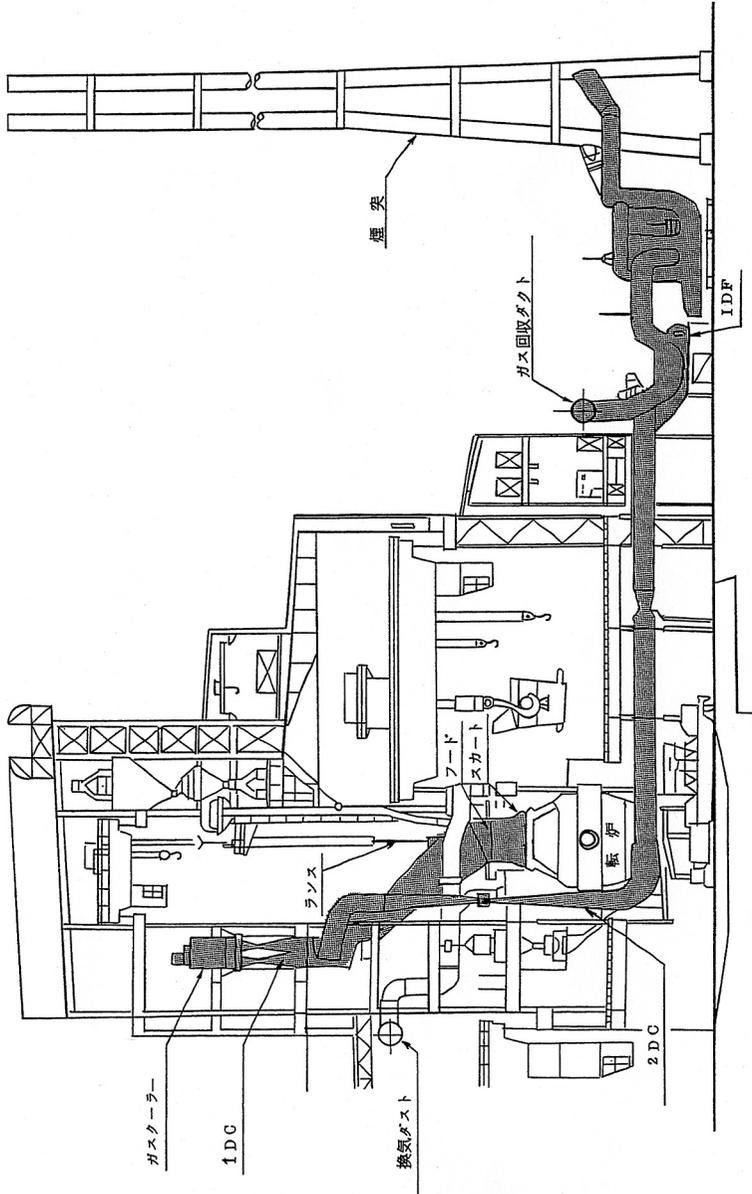
出所：湯川・岡庭（1963），p.1837・第6図。

130トン炉において，設備の大きさをOG装置（左）とボイラー方式（右）とで比較したもの。

多孔ランスと同じく，OG装置も八幡製鉄が開発した技術であり，戸畑第二転炉工場に130トン炉を設置する際に初めて実用化された。廃ガスを燃焼せずに回収する方式は，八幡製鉄が最初のBOFが稼働した頃から検討されていた。そして八幡製鉄は，同様の方式を検討していたボイラーメーカーの横山工業など²¹⁾と共同で，1959年にOG委員会とよばれる共同研究チームを発足させた。OGとは，Oxxygen Converter Gas Recovery Systemの略称であり，のちにこれが回収方式の名前になった。OG委員会では八幡に試験用の2トン転炉を設置し，1960年から1年4ヵ月間OG装置の試験をおこない，装置の有効性や安全性²²⁾の確認をおこなった。この間に戸畑第二転炉工場が完成し，1962年に実用化された。

その後OG装置は各工場で採用され，操業経験を積む中で改良を重ね，1968年頃にはほぼ完成された技術となった。もともとボイラーを備えていたBOFの中からもOG装置に切り替えられるものがあり，1970年代には半数以上の炉にOG装置が備えられている（図15）。OG装置は西ドイツ，オーストリア（Vöest社），イギリス，アメリカといった海外にも技術輸出され，特に第一次石油ショック後に省エネルギーに対する関心が高まってからは普及が進み，

図 14 OG 装置の例



出所：日本鉄鋼協会（1982），p.194・図 4.48。
最近の BOF 工場における一般的な OG 装置の例。色が塗られている部分が OG 装置。

図15 OG装置の普及

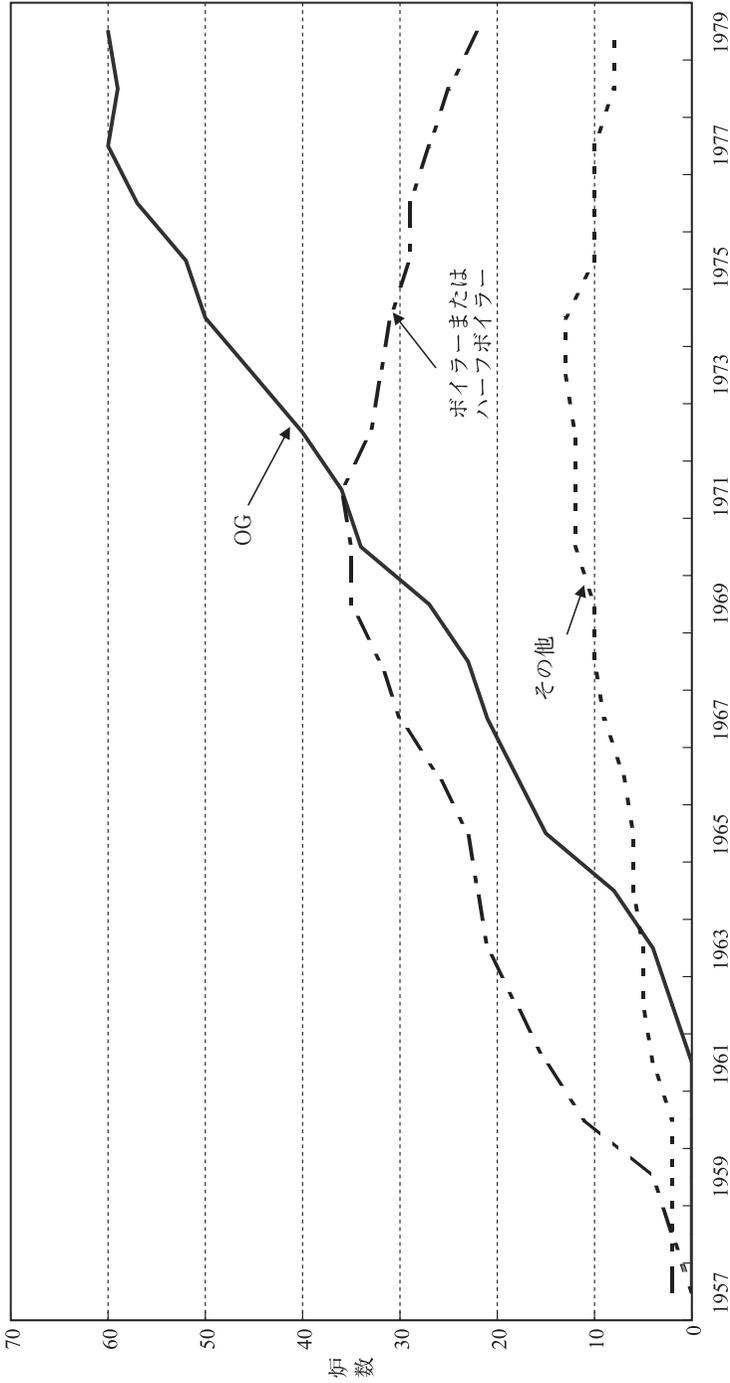


図9と同じ資料に基づいて作成。「ハーフポイラー」とは小型のポイラーで、平炉工場を改造した場合など、建屋に制約があるときに採用されることが多い。「その他」には、OG法とは別にフランスで開発された未燃焼型のガス回収装置（カフル）や、内容が不明のものを含む。

表 4 主要国の鉄鉱石輸送距離の推移

| | 1960 | 1965 | 1970 | 1970/1960 |
|------|------|------|------|-----------|
| 日本 | 4000 | 5460 | 6030 | 1.51 |
| アメリカ | 2500 | 2230 | 2240 | 0.90 |
| 西ドイツ | 2900 | 2940 | 3170 | 1.09 |
| イギリス | 2100 | 2180 | 2380 | 1.13 |
| イタリア | 3300 | 3030 | 3390 | 1.03 |
| フランス | 2100 | 3040 | 3650 | 1.74 |

出所：日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要覧」各年版。各国の平均的な輸送距離（単位：海里）。

1970年代半ばには世界のBOFの約6割で採用されている。

海外鉱山の開発と鉱石専用船

BOFの普及には、BOFにおける技術進歩だけでなく、使用する原料を巡る環境の変化が果たした役割も見過ごせない。BOFの普及を考える上で重要な原料は、鉄鉱石である。BOFの主原料は銑鉄であり、銑鉄は鉄鉱石からつくられるので、鉄鉱石の価格が下がればBOFによる生産は有利になる。

日本の場合、鉄鉱石の大部分を輸入に依存している。戦後の比較的早い時期には、マレーシアなど東南アジアからの輸入が中心であったが、鉄鋼業の発展とともにインド、ブラジル、南アフリカなど、より遠隔地からの輸入が増大した。日本は、主要国の中でもとりわけ遠距離から鉄鉱石を輸入しなければならない（表4）。輸送が長距離になるということは、より安く鉄鉱石を輸入する上で、海運コストの抑制が重要な課題になることを意味する。

そこで日本の鉄鋼メーカーは海運会社と協力して、鉱石専用船の建造を進めた。2万トン級を超える大型の貨物船を鉄鉱石の輸入専用の船として建造し、一度に大量輸送することで輸送費の節約を図ったのである。1960年以前には23隻（うち2万トンを超えるものは8隻）しかなかった専用船は、1961～68年までの間に73隻建造され、船体も大型化した。この結果、輸送距離は大きく伸びたにもかかわらず、海運コストは表5のように低下し続けた。単位当たりの輸送コストは、1958年から1970年の間に6割近く低下した。その結果、より長距離の輸送になったにもかかわらず、鉄鉱石の価格は年々低下していった。

この動きは製鉄所の立地にも影響した。1960年代以降建設された製鉄所は、すべて海に面しており、中には海を埋め立てて建設されたものもある。各製鉄所は港湾設備を備え、しかも大型船が入港できるように、水深も既存の製鉄所よりも深くなるよう設計された。既存の製鉄所でこうした港湾設備が充実させられない場合は、他の製鉄所に生産が集約されるという動きもあった。

表5 鉄鉱石の輸入価格と輸送距離

| | 湿量トン当たり 入着価格 | 湿量トン当たり 運賃 | 運賃負担率 | 平均海上輸送 距離 | t/海里当たり 平均運賃 |
|------|-----------------|---------------|-------|--------------|-----------------|
| | ドル | ドル | % | 海里 | セント |
| 1957 | 21.40 | 12.00 | 56.1 | 3640 | 0.330 |
| 1958 | 14.96 | 5.14 | 34.4 | 3400 | 0.151 |
| 1959 | 14.11 | 5.50 | 39.0 | 3500 | 0.157 |
| 1960 | 14.30 | 5.50 | 38.5 | 4000 | 0.138 |
| 1961 | 14.30 | 5.90 | 41.3 | 4900 | 0.120 |
| 1962 | 14.10 | 5.70 | 40.4 | 5000 | 0.114 |
| 1963 | 13.55 | 5.20 | 38.4 | 5100 | 0.102 |
| 1964 | 13.54 | 5.30 | 39.1 | 5440 | 0.097 |
| 1965 | 13.34 | 5.00 | 37.5 | 5460 | 0.092 |
| 1966 | 13.02 | 4.43 | 34.0 | 5800 | 0.076 |
| 1967 | 12.51 | 4.00 | 32.0 | 5980 | 0.067 |
| 1968 | 12.19 | 3.93 | 32.2 | 6180 | 0.064 |
| 1969 | 11.56 | 3.65 | 31.6 | 6240 | 0.058 |
| 1970 | 11.83 | 3.90 | 33.0 | 6030 | 0.065 |

出所：日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要覧」各年版より。

鋼種の拡大

BOF の普及には、こうした生産性の上昇に加え、BOF が生産できる鋼種の拡大も貢献した。鋼種の拡大は、BOF の操業技術が進歩したことも影響しているが、原料である銑鉄の質が変化したことも重要な要因である。鉄鉱石の燐含有量に対する要求が厳しくなったことと、製銑において燐を含む平炉スラグ（平炉で製鋼するときに生じる残滓で、燐を始め不純物を多く含む）を投入しなくなったことから、銑鉄に含まれる燐の比率は年々低下していった²³⁾。そのため、燐を除去しても炭素の含有量が比較的多い鋼材の生産が容易になり、従来 BOF には向いていないとされた鋼種も平炉と変わらない、ないしそれ以上の品質で生産できるようになった。こうして 1960 年代半ばには、あらゆる平炉鋼を BOF で生産できるようになり、平炉から BOF への置換が決定的なものになった。

6. 平炉の衰退と電気炉の進歩

BOF が導入されてからもしばらくは、平炉の建設や改造が進められていた。表6はそのような動きをまとめたものである。このころは酸素の利用が本格化したことによって平炉の生

表 6 BOF 導入期における平炉の新設・改造

| 稼働開始年 | 工場 | 炉容・基数 | 備考 |
|-------|-----------|--------|----|
| 1956 | 日本鋼管・川崎 | 120t×3 | 新設 |
| | 尼崎製鋼 | 60t | 新設 |
| 1959 | 神戸製鋼・脇浜 | 45t | 改造 |
| | 川崎製鉄・千葉 | 165t×2 | 新設 |
| | 住友金属・和歌山 | 200t×2 | 改造 |
| | 中山製鋼所・名古屋 | 75t×2 | 新設 |
| | 尼崎製鉄 | 60t×2 | 新設 |
| 1960 | 大阪製鋼・西島 | 40t | 改造 |
| | 川崎製鉄・千葉 | 150t | 新設 |
| | 川崎製鉄・千葉 | 150t×2 | 改造 |
| 1961 | 富士製鉄・室蘭 | 200t | 新設 |
| | 川崎製鉄・千葉 | 150t | 改造 |
| | 日新製鋼・呉 | 100t | 改造 |

日本鉄鋼協会（1982）および通商産業省重工業局（1960）に基づいて作成。

産性は上昇し続けており、BOF の利点あまり活かされないと考えられていた品種を主に生産していた工場を中心に、依然として平炉の増強が図られていた。

しかし BOF 操業の経験が各企業で積み、また多孔ランスや OG 装置といった技術改良が進むと、BOF の平炉に対する優位性がはっきりしてきた。平炉がその役割を BOF に譲る転機となったのが、1962 年の不況である。このとき鉄鋼各社は、粗鋼減産措置として平炉の封印を行った。既に休止中だったものを含め約 40 基が図 16 のような封印措置を受けた。封印された平炉の中には、翌年措置が解除になった後も再稼働することのなかったものもある²⁴⁾。このとき BOF についてはこのような措置はとられず、むしろ新たに川崎製鉄・千葉において BOF が稼働したこともあって、BOF による生産量は前年度の 1.5 倍強に増加している。同様の措置は 1965 年にも行われ（このときは、BOF も毎日一定時間休止するように取り決められた）、平炉のいっそうの衰退を招いた。

平炉から BOF への転換は、技術研究の面でも観察される。図 17 は、日本鉄鋼協会の会誌「鉄と鋼」に載った論文の中から、BOF に関するものと平炉に関するものの推移を追ったものである。「鉄と鋼」には鉄鋼業の技術に関するさまざまな論文が掲載され、それらの執筆者の多くが主要な鉄鋼メーカーの技術者・研究者であり、日本における鉄鋼技術研究を概観することができる。BOF が導入され、ある程度実際の操業経験が蓄積されてきた 1960 年頃から BOF に関する論文が急増した一方で、平炉に関する論文は 1962 年以降 BOF に関するもの

図 16 平炉封印の様子



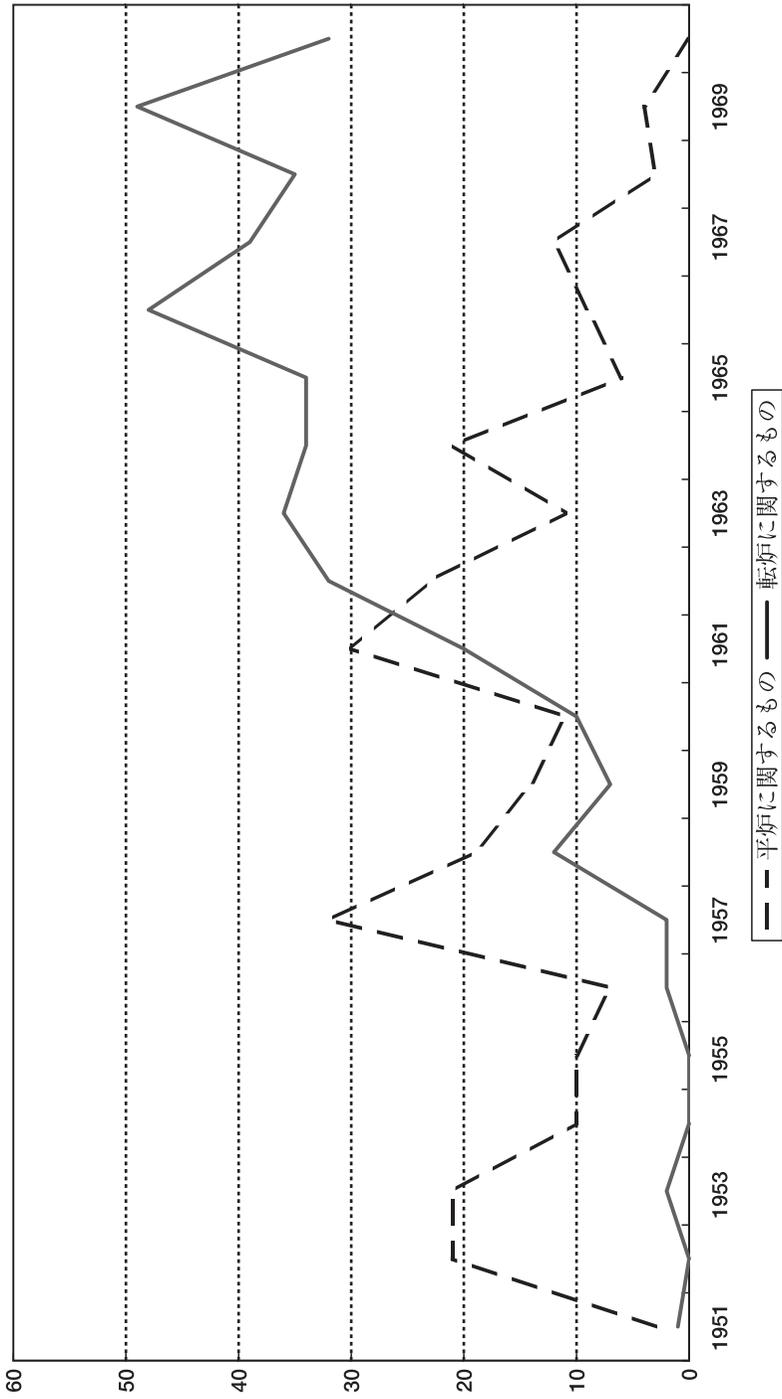
出所：鉄鋼界 1965 年 10 月号，p.71。
1965 年の不況時における平炉の封印作業。

の件数を下回り、そのまま徐々に低下した後、1970 年には遂に一本も発表されなくなった。

1950 年代以降の平炉における技術的な関心は、なんと言っても酸素の利用がどこまで有効であるかという点にあった。しかし平炉において酸素を利用すると、まず従来想定されていたよりも高温の反応によって、炉内の耐火物の損傷がひどくなる。転炉に比べて炉内構造が複雑な平炉の場合、耐火物を頻繁に補修しなければならないのは、大きな負担となった。さらに大量に発生した粉塵（BOF ではボイラーや OG 装置で処理する）が蓄熱室にたまることも問題で、炉内の通風が悪くなり、平炉の利点である熱効率の高さが失われるもとなる。この点について青山（1978）は、

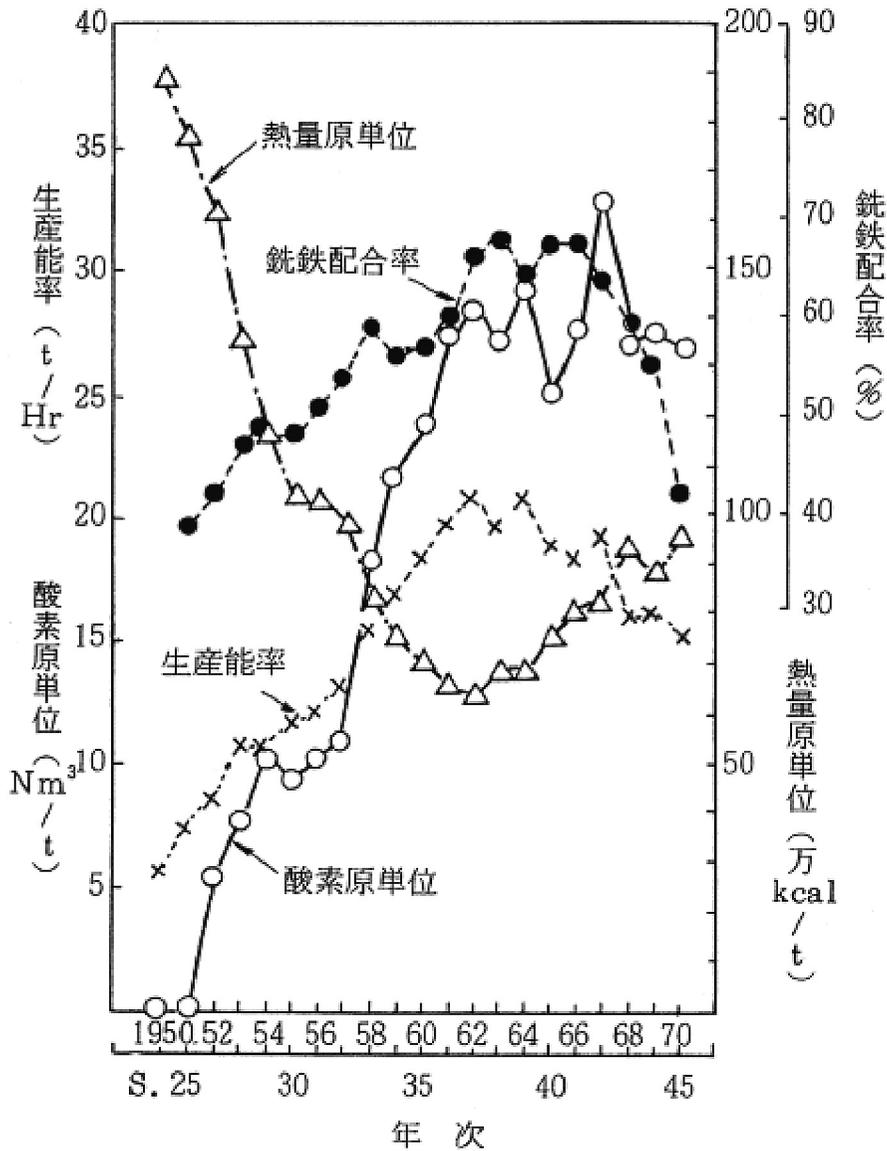
しかし、過度の酸素使用は炉体各部の激しい溶損を招き、特に発生する激しいダストによって蓄熱性は無用の長物と化した。蓄熱室こそ平炉の基本原理であり、銅を溶かすほどの高温を得るために、ジーメンスらが苦心して生み出した装置であるのに、「大量酸素使用」の平炉では、通風を阻害する邪魔者となった。…平炉本来の機能は失われ、その衰退、没

図 17 「鉄と鋼」収録論文数



注: もとになるデータについては、補論参照のこと。

図18 平炉における酸素利用とその効果の推移



出所：青山 (1978), p.14。

落も自然のなりゆきであった。

と述べている (p.19)。こうして平炉における酸素利用の試みは、1960年代前半のうちには限界に達したのである (図18)。

ただし、平炉の技術的な限界が見えた後も、かつてに比べれば減少したものの、平炉に関

表 7 「鉄と鋼」に対する論文が掲載された最後の年

| 企業 | 執筆者の所属 | 最後の平炉論文掲載年 | BOF 導入年 | 平炉生産終了年 |
|----|--------|-------------------|---------------------|---------|
| 八幡 | 八幡 | 1967 | 1957 | 1971 |
| 富士 | 広畑 | 1968 | 1961 | 1969 |
| 鋼管 | 京浜 | 1969 | 1958 | 1971 |
| 川崎 | 千葉 | 1968 | 1962 | 1971 |
| 住友 | 和歌山 | 1965 | 1961 | 1971 |
| 神戸 | 中央研究所 | 1969 ⁾ | 1961 ^{**)} | 1971 |

データの作成方法については、補論を参照のこと。

⁾ 執筆者が工場所属の技術者であるものに限れば、1962年が最後になる。

^{**)} 神戸製鋼としての導入年。尼崎製鉄も含めて考えれば1960年となる。

する研究が依然として続けられていたことも注目に値する。前述の「鉄と鋼」では、1964年に「平炉製鋼法の進歩」という特集を組んでいる（報告されている内容は、1963年までに日本鉄鋼協会の共同研究会で発表されたもの）。しかもこうした研究は、平炉しか持たない企業ばかりでなく、既にBOFを導入した企業においてもなされていた（なおかつその執筆者たちは、BOFが稼働している工場に在籍していた）。表7は、「鉄と鋼」に平炉に関する論文が載った最終年を企業別に見たものである。1960年代後半に入っても、BOFを稼働させている工場の技術者・研究者が平炉の操業法や平炉鋼の性質についての研究を発表している。技術が使用されているうちは、その改良に向けた努力が全く放棄されるわけではないことが認められる。

BOFと入れ替わる形で、平炉は1970年代前半には日本から姿を消したが、もう一つの製鋼法である電気炉製鋼は、図1にあるようにそのシェアをさほど落とすことなく、1970年代後半にはむしろややシェアを伸ばした。

BOFが発展してからも電気炉製鋼法が存続し続けられた主な要因は、設備が小規模ですむことと、特殊鋼の品質ではBOFよりも優れていたことに求められる。電気炉製鋼は、鉄屑を主原料とすることが可能で、BOFのように大規模な臨界製鉄所を建設する必要がない。そのため、鉄屑の発生量が多く、かつ鋼材消費の多い地域であれば、比較的容易に立地できた。加えて、電気炉製鋼では空気や燃焼ガスから不純物が鋼に入ることを防ぎ、合金する金属の損失が少ないことから、特殊鋼の生産において特に強みを発揮した。特殊鋼に限れば、1970年代半ばまでは、電気炉による生産の方がBOFによる生産を上回っていたほどである。

つまり電気炉は、BOFや平炉とすみ分けられる特性を持っていたのである。高度成長期において電力供給も安定し、次第に電気炉製鋼の利点が発揮される環境も整った。そして、1970年代に入るとUHP（Ultra High Powered（超高電力））操業が普及したことで炉容が増

大した²⁶⁾ことから、電気炉の生産性が高まったこともあり、電気炉製鋼のシェアは徐々に拡大することとなった。

7. 結 語

BOF は、日本への導入が検討された時点では、潜在的には高い生産性が期待されていたものの、依然として未成熟な技術であった。操業技術は未確立であり、生産される財の範囲にも制限があると認識されていた。このような技術が導入されるには、同じように進歩が見込まれている他の技術との比較を始め、慎重な検証が重ねられなければならなかった。

さらにこの技術が普及していくには、まず先駆的にその技術を導入した企業が、実際に操業する中から安定的な操業のために必要な改良を試みる必要があるであった。日本の場合、この役割を担ったのは八幡製鉄と日本鋼管である。八幡製鉄は日本の鉄鋼メーカーの中でも技術研究のための環境が整備されており、日本鋼管はトーマス転炉による操業経験を活かすことができた。こうした技術力の要因に加えて、両社の主力製品が、BOF での生産に向いていたことも、両社が先導的な役割を果たした理由の一つとして考えられる。また、実用化された改良技術の内容は業界内で早いうちに共有されたことも、日本の鉄鋼業の発展にとっては有益であったと思われる。

しかし技術の普及の速度は、技術自体の進歩だけでなく、技術を取り巻く環境からも大きく影響を受ける。BOF に関して言えば、導入の頃の鉄屑問題や、自動車産業の発展、海外からの鉄鉱石輸入体制の整備といった要因がその普及に影響を及ぼしていた。さらに近年になって、電気炉がそのシェアを伸ばしつつあるのは、UHP 操業などの技術的な要因に加え、電気炉が持つ柔軟性・機動性が、安定成長期に入った日本経済の状況に合致したことと関連していると考えられる。

なお、本稿は BOF の導入・普及を中心に戦後日本の鉄鋼史を概観してきたが、ここでは十分取り上げられなかったものの中にも、日本の鉄鋼業の発展を考える上で重要なトピックスがあることも指摘しておきたい。連続鋳造法の導入、BOF 操業の計算機制御なども重要な技術進歩であるが、本稿の対象とする時期においてはまだ十分その効果を発揮していたとは言えず、本稿では取り上げなかった。

今後検討すべき課題としては、以下の諸点が挙げられる。本稿の叙述によって、BOF の普及においてさまざまな要因が重要な役割を果たしていたことが示唆されるが、これらの影響を定量的に評価する必要がある。例えば、改良技術はどれほど生産性の向上に寄与したのか、それは技術導入の対価が抑えられたことによる影響と比べてどれほど大きいのかといった点を探ることで、経済発展における技術政策の重要性を判断することができる。

また、本稿では技術的な要因と、鉄鋼業を取り巻く環境要因については詳しく見たが、こ

れら以外にも BOF の普及や鉄鋼業の発展に大きな影響を及ぼしたものがあるかも知れない。例えばこの時期には、労務管理のあり方も整備されてきており、これによる生産体制の効率化も重要であった可能性がある。また労務管理のあり方自体が、BOF という新技術の登場によって変化している点も見られ²⁷⁾、両者の関連も分析されるべきであろう。

本稿の叙述は日本における BOF の導入・普及に限ってきたが、日本の発展をより深く理解するには国際比較を行うことも意義があると考えられる。Oster (1982) などアメリカにおける BOF の普及を分析した研究もあり、こうした研究成果を踏まえながら、アメリカと日本の鉄鋼業では BOF への対応が異なった理由を探ることも、今後取り組んでいくべき課題であろう。

補論. 図 17 と表 7 の作成について

図 17 と表 7 のもとになったデータは、以下の手続きによって集めた。「鉄と鋼」の掲載論文は、国立情報学研究所「論文情報ナビゲータ」CiNii²⁸⁾において創刊号掲載分から収録されている。そこでまず「平炉」「転炉」をキーワードとして、各年の論文を論文名検索した。その上でヒットしたものについて題名を確認し、明らかに平炉ないし BOF に関わらないものを除いた。例えば学会講演の報告論文などでは、セッション名として「転炉, 平炉, 電気炉」というものがあり、こうしたものが題名にも付くわけであるが、内容から平炉ないし BOF の操業や設備に関係ないと判断されるものは取り除いた。

表 7 に関しては、同様の手順で「平炉」の論文とされるものを、さらに著者所属で絞り込み、その掲載年が最も新しいものを「最後の平炉に関する論文」とした。参考までに、このように定義された論文の題名を以下に掲げる：

塩基性平炉における媒溶剤の早期滓化について
傾注式大型平炉に於ける低溶銑操業について
平炉 150T 取鍋へのアルゴンガス吹込の適用
平炉に於ける炉内予備脱酸の検討
ラジオアイソトープによるリムド鋼塊の凝固速度の検討
20ton 炭素鋼铸塊内の内部性状とその成因に関する 2, 3 の所見

注

* 本稿は、大橋弘氏（東京大学）との共同研究に基づくものである。もちろん本稿におけるあり得べき誤りは、全て筆者に属するものである。

- 1) 日本鋼管の方が選ばれた理由としては、両者の見積書を比較したときに、日本鋼管の方が有利な契約を結べると判断されたことによる。八幡製鉄は、もう一つの BOF 開発企業である Vöest 社との間で、ton fee によるライセンス支払いを条件とした契約を結ぶ予定であったのに対し、日

戦後日本における技術導入と普及：鉄鋼業における BOF の受容*

本鋼管は一括払いであった。この決定のあと、契約交渉における立場を強めるために、八幡製鉄は自らが持つ BOF の技術情報を日本鋼管に提供している。

- 2) この契約で、日本鋼管は技術指導料を含め 140 万ドルを支払った。契約期間は 1970 年までであったが、この間に日本全体でおよそ 3.2 億トンの粗鋼が BOF によって生産されている。
- 3) 通商産業省産業構造研究会 (1960) によれば、付加価値に対する鋼材購入の割合は、車両・造船で 23.2%、機械で 20.6%、建設で 15.3% を占める。
- 4) 川崎 (1962), p.315。
- 5) 日本鉄鋼協会 (1993), p.p.291 ~ 292。
- 6) 転炉製鋼法を発明したベッセマーは、1856 年の特許の中で、酸素の利用によってより効果的に精錬できることを明記している (下村 (1993), p.46)。
- 7) 日本製鉄 (のちに八幡製鉄と富士製鉄に分割され、1970 年に再び新日本製鉄として合併した)、日本鋼管 (現在は川崎製鉄と合併して JFE スチールになった)、新扶桑金属 (現在の住友金属工業)、中山製鋼、日亜製鋼 (現在の日新製鋼)、川崎重工 (のちに鉄鋼部門が独立して川崎製鉄となり、現在は日本鋼管と合併して JFE スチールになった)、神戸製鋼、尼崎製鋼所 (のちに神戸製鋼に合併される) の 8 社。
- 8) 最初に転炉による製鋼法のアイデアを生み出したベッセマーは、その発明を「火を使用しないでの鋼の製造」と名付けている (雀部 (1975))。
- 9) ヨーロッパでは燐を多く含む鉄鉱石の入手が容易であったため、日本よりもトーマス転炉法が普及していた。トーマス転炉法が開発されたことで、燐を多く含むヨーロッパ産鉄鉱石が利用できるようになり、19 世紀後半にドイツ・フランスで鉄鋼業が発展することとなった (内田 (1974), p.100)。
- 10) 木下 (1960) によれば、トーマス転炉を使用していた時に比べ、BOF 導入後は鋼中に含まれる窒素の比率が 0.01% 前後から 0.003% 程度にまで減少した。また燐の除去については、トーマス転炉時代には 0.04 ~ 0.06% 程度含まれていたものが、やはり BOF の導入以後 0.02 ~ 0.03% へと低下したことを報告している。
- 11) 欧米では、実際にこれらの技術を採用した企業もあった (リン (1986), p.p.18 ~ 19)。
- 12) 1953 年に日本鋼管は、Vöest 社に設備を供給しているオーストリア企業に対して BOF の技術情報を問い合わせたが、回答を得られなかった。
- 13) 八幡製鉄の場合、1954 年 12 月から 1956 年 4 月までに、1327 回にのぼる BOF の吹錬試験を行った。
- 14) 1957 ~ 58 年の時点で転炉によって生産された鋼種は、八幡製鉄については冷延鋼板、亜鉛原板、熱間圧延鋼板、自動車用圧延鋼板、軽量形鋼、軟鋼線材などであり、日本鋼管については鍛接管用鋼材、熱延薄鋼板用シートバー、ガス管材などであった。
- 15) これとは別に、リン (1986) は「富士の経営陣は、自社より小さい日本鋼管から BOF の再実施権を受けるのを嫌っていた。とはいえ、BOF に関して八幡にかなり遅れをとっていることにも心穏やかでもなかった。そこで、日本で富士がバイオニアになれる何かほかの技術を探ることになった。」(p.86) と述べ、経営陣の意識の要因を強調している。
- 16) 尼崎製鉄は、1957 年頃独自に BOF の導入を検討し、スイスの BOT 社 (BOF の特許管理会社) と導入交渉しようとしたところ、日本鋼管の契約が先に成立したため、日本鋼管からサブライセンスを受けることになった。

- 17) 住友金属の場合、最初の BOF の操業（1961 年 5 月）に先立って、1961 年 1～3 月の間に、八幡製鉄と日本鋼管の BOF 工場にて実習を行っている。
- 18) 岸田他（1960）では、製鋼歩留まりや吹錬時間を被説明変数、溶銑の成分比や温度、炉の使用回数（炉齢）などを説明変数として、重回帰分析によって吹錬の成績を左右する要因を探ろうと試みているが、推定式の当てはまりはあまり高くなく（決定係数 0.056～0.311）、これらの諸要因よりも「計数化のきわめて困難な外の要因」が重要であることを指摘している。
- 19) ほかに、吹錬中に発生する CO ガスのために鉄粒が炉外に飛び出すスピitting という現象も、製鋼歩留まりを下げる要因の一つである。スロッピングと同様に、スピitting も酸素の吹き込み条件によってその発生頻度が左右される。
- 20) この当時、八幡製鉄は他社から BOF 操業の実習者を受け入れていた（注 17 参照）が、多孔ランスの試験はこれらの実習者には秘密にされていた（新日本製鐵（1981a）、p.432）。
- 21) 両社のほかに、計測器メーカーの富士電機製造が制御技術の開発のために参加した。理論的なものの検討には、東京大学・山崎毅六教授、京都大学・後藤廉平教授の協力を受けた。
- 22) OG 装置は大量の CO ガスをそのまま回収するため、爆発や中毒の防止に特に関心が払われた。
- 23) 八幡製鉄や日本鋼管の例では、1957 年当時 0.3%前後だった溶銑に占める燐の割合は、1960 年代前半には 0.2%を切り、1960 年代後半には 0.1%前後にまで低下した（日本鉄鋼協会（1982）、p.358・図 5.23）。
- 24) 川崎製鉄・葦合工場では、このときすべての平炉（稼働していたものが 9 基・計 350 トン、既に休止していたものが 1 基・35 トン）が休止し、以後生産を再開することはなかった。葦合工場は、BOF を導入した千葉製鉄所に次いで、川崎製鉄では 2 番目に大きな工場であったが、1965 年にはすべての炉が解体され、製鋼工場としての役割を終えた。
- 25) UHP は、1964 年にアメリカで実用化された。同一容量に対して従来の 2 倍近い大電力を与え、原料を溶解するのに要する時間が大幅に短縮される。日本では、1969 年に神戸製鋼・神戸工場に建設されたものが最初である。この当時の実績として、UHP 化したことにより、操業時間が 3 割近く短縮されたことなどが報告されている（奥村・中村（1972））。
- 26) 1960 年代に新設された電気炉の容量は、平均して 20 トンから 25 トン程度であったが、1970 年代前半で 34.0 トン、後半に入ると 45.8 トンに増大した（下川（1989）、p.317）。
- 27) この点については米山（1978）の分析などがある。
- 28) <http://ci.nii.ac.jp/cinii/servlet/CiNiTop#>

参 考 文 献

- 青山芳正（1978）「日本における平炉の興亡」鉄鋼界 1978 年 10 月号，p.p.14～20。
- 内田星美（1974）『産業技術史入門』日本経済新聞社。
- 奥村昇・中村俊明（1972）「20 屯電気炉の U.H.P.化とその成果」鉄と鋼 vol.58，S415。
- 川崎勉（1962）『日本鉄鋼業の発展と特質』工業図書出版。
- 川崎製鉄（1976）『川崎製鉄二十五年史』川崎製鉄。
- 岸田正夫・水井清（1960）「純酸素転炉における吹錬諸要因の解析」鉄と鋼 vol.46，p.p.1182～1185。
- 岸田正夫・水井清（1961）「純酸素転炉における終点判定について」鉄と鋼 vol.47，p.p.350～352。
- 木下恒雄（1960）「日本鋼管における転炉製鋼法の推移概況について」鉄と鋼 vol.46，p.p.788～796。
- 神戸製鋼所（1986）『神戸製鋼 80 年』神戸製鋼所。

戦後日本における技術導入と普及：鉄鋼業における BOF の受容*

- 後藤晃 (1993) 『日本の技術革新と産業組織』東京大学出版会.
- 雀部晶 (1975) 「ヘンリー・ベッセマー－転炉法の発明者－」鉄鋼界 1975 年 11 月号, p.p.104～109.
- 下川義雄 (1989) 『日本鉄鋼技術史』アグネ技術センター.
- 下村泰人 (1993) 「酸素製鋼法の発明：LD 法で実現されたベッセマーの夢」鉄鋼界 1993 年 11 月号, p.p.44～51.
- 新日本製鐵 (1981a) 『炎とともに：八幡製鐵株式會社史』新日本製鐵.
- 新日本製鐵 (1981b) 『炎とともに：富士製鐵株式會社史』新日本製鐵.
- 住友金属工業 (1967) 『住友金属工業最近十年史』住友金属工業.
- 関口末夫 (1986) 「技術輸入者としての日本：技術輸入と直接投資に対する政策」関口末夫・トラナーヴァントウ編『直接投資と技術移転』第 3 章 日本経済研究センター.
- ダイヤモンド社編 (1974) 『産業全書・鉄鋼』ダイヤモンド社.
- 武田喜三 (1962) 「純酸素転炉について」鉄と鋼 vol.48, p.p.1085～1100.
- 通商産業省産業構造研究会 (1960) 『貿易自由化と産業構造』東洋経済新報社.
- 通商産業省重工業局編 (1960) 『鉄鋼業の合理化とその成果 < 第 2 次合理化計画を中心として >』工業図書出版
- 土井襄 (1966) 『転炉製鋼法』日刊工業新聞社.
- 日本鋼管 (1962) 『日本鋼管株式会社五十年史』日本鋼管.
- 日本鉄鋼協会 (1982) 『わが国における酸素製鋼法の歴史』日本鉄鋼協会.
- 日本鉄鋼協会 (1993) 『戦後復興期におけるわが国鉄鋼技術の発展』日本鉄鋼協会.
- 日本鉄鋼連盟 (1959) 『戦後鉄鋼史』日本鉄鋼連盟.
- 日本鉄鋼連盟 (1969) 『鉄鋼十年史 昭和三十三年～昭和四十二年』日本鉄鋼連盟.
- 日本鉄鋼連盟 (1981) 『鉄鋼十年史 昭和四十三年～昭和五十二年』日本鉄鋼連盟.
- 三井太信 (1955) 「大型電炉および酸素上吹き転炉の経済性」鉄鋼界 1955 年 7 月号, p.p.12～26.
- 湯川正夫・岡庭慶次 (1963) 「LD 転炉の未燃焼ガス回収装置の開発とその効果」鉄と鋼 vol.49, p.p.1829～1839.
- 米山喜久治 (1978) 『技術革新と職場管理』木鐸社.
- リン, レオナード・H (1986) 『イノベーションの本質』東洋経済新報社.
- Jaffe, Adam B. (1989) “Real Effects of Academic Research,” *American Economic Review*, vol.79, p.p. 957～969.
- Meyer, J. R. and G. Herregat (1974) “The Basic Oxygen Steel Process,” in L. Nabseth and G. F. Ray eds., *The Diffusion of New Industrial Process*, Cambridge University Press.
- Oster, Sharon (1982) “The Diffusion of Innovation among Steel Firms : The Basic Oxygen Furnace,” *The Bell Journal of Economics*, vol.13, p.p.45～56.
- Zucker, Lynn G., Michael R. Darby, and Marilyn B. Brewer (1998) “Intellectual Human Capital and the Birth of U.S. Biotechnology Enterprises,” *American Economic Review*, vol.88, p.p. 290～306.