

学籍番号:CD131010

技術選択の理由

— 日本鉄鋼産業における溶融還元製鉄技術(DIOS)研究開発を事例に —

How Technological Choice is Made
: A Case Study of Direct Iron Ore Smelting Technology
in the Japanese Steel Industry

一橋大学大学院 商学研究科
博士後期課程 経営・マーケティング専攻
金 成美

謝 辞

私が日本の大学院に進学することを決めたきっかけは、韓国から交換留学生として日本に来た時に、経営史という科目の存在を知ったことであった。韓国の大学では経営史の講義がないため、このような分野があることは、韓国の大学を卒業した私にとって大きな衝撃であった。これまで経営学部学生として様々な授業を履修しながらも、それが一つの企業の中でどう結びついているのか、全社的に見て各々の経営判断が本当に妥当なものだといえるのかという疑問は、大学を卒業するまで消えることがなかった。この消えることのない問題意識が、私を再び日本に導いたのである。

一橋大学大学院で鉄鋼産業を研究しようと思った理由は、これから経営史の学者として生きていくために、最も基本となる産業であると考えたからである。「産業の米」とも呼ばれる鉄鋼産業を研究することで、そこから様々な産業につながる手がかりが見つかるだろうと思った。さらに、韓国を代表する電子産業や自動車産業等を背後で支える鉄鋼産業が、大きな役割を果たしていることも挙げられる。また、世界に誇る鉄鋼会社が韓国に存在することは、私にとって、とても魅力的なことであった。そして、日本で学ぶ韓国人として、日韓両国を繋ぐ研究がしたいと思ったことも、鉄鋼産業を選んだ大きな理由であった。

本論文は、このような理由から鉄鋼産業の歴史をひたすら探ってきた研究の結果である。私は、修士課程において、韓国の鉄鋼産業の成立と韓国企業で世界最初に実用化した溶融還元製鉄の歴史を研究した。日本の経営資源(ヒト、モノ、カネ、情報)を取り入れて成立した韓国の鉄鋼産業が世界で初めて新技術を実用化した歴史を研究したことは、逆に言えば、日本にも同様の技術が存在し、しかもナショナルプロジェクトとして行われたにもかかわらず実用化しなかったのはなぜか、という問題意識を与えてくれた。一つの技術をテーマに、日韓の技術選択が異なる形で行われた過程を探ることによって、技術が確立されるためには、技術そのものだけではなく様々な要因が影響を与えるということ、技術の確立を理解するためには長期的な視点を持って分析しなければならないということを学ぶことができた。本論文では、日本鉄鋼産業における新製鉄技術を分析することに集中したが、今後は修士論文の分析と繋げて日韓両国の鉄鋼産業における技術選択を比較することも考えている。また、そこで得られる理論的考察が他の産業にどう適用できるかを検討し、学問的な貢献ができることも望んでいる。

本論文執筆に当たり多くの方々にお世話になった。この場を借りて感謝の意を表したい。

最初に、指導教官である米倉誠一郎先生に心からお礼を申し上げたい。米倉先生は、研究を進めていく中で、しばしば混乱し方向性を見失っている私を叱咤激励するとともに、貴重な示唆を何度も与えて下さった。また、研究だけでなく、留学生の私をいつも暖かく見守って下さり、精神的にも支えて頂いた。米倉先生は、私にとってかけがえのない指導教官であり、日本にいる父のような

存在であった。心から尊敬できる先生のもとで研究ができたことは、私の人生で最も大きな宝物である。私も、将来は米倉先生のように暖かい心を持ち、指導力に優れ、カリスマ性で世界を圧倒できるような研究者、教育者になりたいと思っている。

青島矢一先生にも、懇切丁寧に指導して頂き、大変お世話になった。青島先生のゼミに参加したことは、歴史研究を主とする私にとって大きな挑戦であった。私は単一事例の複雑な絡み合いに苦戦していたが、青島先生の理論的考察や定量分析の簡潔な論理展開は憧れであった。また青島先生に同席させて頂いた企業インタビューの時には、インタビューの進め方やその結果に対する考え方について学ぶところが多く、本論文を完成させる上で大きな力になった。青島先生のように鋭い感性を持つ研究者でありたいと思った。

島本実先生にも、博士課程最後の半年間に多くのことを教示して頂いた。2016年10月の経営史学会で発表した後、島本ゼミに参加させて頂き、それまで見落としてきたところ、気がつかなかったことなどを、様々な観点から指摘して頂いた。米倉ゼミの大先輩である島本先生には、研究の指導だけでなく、いつも勇気づけられた。大学院の最後に島本ゼミに参加できたことは、私にとって本当に幸せなことであった。

また、一橋大学の拠点事業であるIMPP(Innovation Management Policy Program)でお世話になった江藤学先生、軽部大先生、北野泰樹先生、清水洋先生、延岡健太郎先生にもイノベーションリサーチセミナーを通じて鍛えて頂いた。実力不足である私を忍耐強く導いて頂いた諸先生方に心より感謝を申し上げたい。

日本の大学に在籍しながらも、母国のKim Yungrai先生、Lim Dalho先生にはいつも精神的に支えられてきた。Kim先生が亡くなられる前に、私の博士論文をお届けできなかったことは本当に悲しいことであるが、先生が常に話されていたように、日本と韓国の架け橋となるために一生を通して努力していきたいと思っている。

大学院時代を通じて素晴らしい諸先輩や同僚に恵まれた。

伊藤輝美さんには、修士論文と博士論文の日本語を添削して頂いた。伊藤さんは大学で理工系を専攻し、エンジニアとして長年勤めていた経験もあり、日本語だけではなく技術や社会科学の分野についてもアドバイスして頂き、本論文執筆中にも何度も励まして頂いた。心より感謝を申し上げたい。

生稲史彦さん、川合一央さん、星野雄介さん、堀峰生さんには、毎年の米倉ゼミ合宿で多くのアドバイスを頂いた。私が、修士課程入学の時から今日に至るまで、いつも暖かく見守って下さった諸先輩方にも感謝の意を表したい。

米倉ゼミの金東勲さん、中尾杏奈さん、青島ゼミの伊東幸子さん、谷口諒さん、猪股優史さん、高田直樹さん、王文さん、島本ゼミの中村智彰さん、平野貴士さん、Thi Xuan Tho Phamさん、孫暮雨さんは、いつも私を優しく応援して下さいました。国境を越えてゼミという場で出会った貴重な縁は、

留学生の私にとって家族のような存在であった。今後ともこの縁を大切にしていきたいと思っている。

私は博士課程の間一橋大学イノベーション研究センターの 2 階にある研究室を使わせていただいた。そのためイノベーション研究センターの事務室や研究支援室の皆様、IMPP 事務室の皆様にもいつも助けられ、励まされていた。心より感謝を申し上げたい。

本論文の執筆に際し、他の学校の先生方や企業の方々にインタビューできたことは、資料収集に困難を極めていた私には大きな救いであった。心からお礼を申し上げたい。

私の大学院生活を経済的に支えてくれたのは、韓国の国立忠北大学発展基金財団、大塚敏美育英奨学財団、とうきゅう留学生奨学金財団であった。私が経済的な問題に悩むことなく、研究に没頭して博士論文を完成させることができたのは、これら諸財団のご支援の賜物である。心から感謝を申し上げたい。

最後に、私の大学院生活を陰ながら応援し、暖かく見守ってくれた母国の家族への感謝の言葉を記すことをお許し願いたい。

항상 저에 대한 지지와 격려를 아끼지 않으며 제가 꿈을 향해 나아갈 수 있도록 도와주신, 한국에 있는 가족과 친구들에게 깊은 감사를 전합니다. 사랑합니다.

2017 年 2 月 吉日

金 成 美

目次

序章 問題の所在	1
はじめに	1
第1節 考察対象としての DIOS プロジェクト.....	5
第2節 先行研究.....	18
1. 鉄鋼業に関する先行研究	18
2. 技術の社会的構成理論	25
第3節 資料関係.....	28
第4節 全体の構成	30
第1章 日本における溶融還元製鉄技術研究開発の背景と歴史	32
第1節 DIOS 前史	32
1. 高炉を使わない製鉄法	32
2. 欧米における 1970～1980 年代の溶融還元製鉄技術	35
3. 日本における DIOS プロジェクト以前の溶融還元製鉄技術	37
4. 特許出願数で見た溶融還元製鉄法	43
5. まとめ	46
第2節 DIOS 小史.....	47
1. 開発の背景.....	48
2. プロジェクトのはじまり	52
3. 開発目標	53
4. 組織構成	54
5. 開発経緯	58
6. プロジェクトの結果.....	81
7. まとめ	88

第2章 日本鉄鋼産業の環境変化(1980年～2000年)	90
第1節 外部環境	90
1. オイルショックと鉄鋼産業	91
2. プラザ合意による円高と鉄鋼産業	95
3. 鉄鋼合理化計画	101
4. まとめ	111
第2節 技術環境:DIOSの競合技術(既存技術)の発達	113
1. 高炉の微粉炭吹込み技術(PCI)	114
2. SCOPE21	120
3. まとめ	144
 終章 分析と結論	 146
第1節 本論の要約	146
1. DIOSの誕生	147
2. 高炉技術の改良改善の展開	148
3. 鉄鋼合理化計画の推進	150
第2節 分析	152
第3節 理論的考察	165
第4節 結論と本論文の限界	172

図表目次

図 1 粗鋼見掛消費量推移(日本, アメリカ, 中国, インド)	2
図 2 2020 年銑鋼プロセス像	14
図 3 溶融還元製鉄に関する特許出願件数(アメリカ特許庁)	44
図 4 溶融還元製鉄に関する特許出願件数合計(日本特許庁)	46
図 5 研究開発組織(1988 年 4 月)	55
図 6 溶融還元製鉄法の基本フロー(1988 年 4 月)	59
図 7 DIOS プロジェクトスケジュール	60
図 8 低燃料比(800kg/t 以下)の操業成立範囲	61
図 9 DIOS 法概念図	65
図 10 溶融還元製鉄法と高炉法の比較	82
図 11 主要鉄源プロセスの生産能力と初期投資額	85
図 12 高炉法と DIOS 商用設備のレイアウト比較(300 万トン規模)	87
図 13 DIOS とその他製鉄プロセスの SO_x と NO_x 排出量	88
図 14 通関レートおよび輸入原油・原料炭の価格推移	93
図 15 海外原料炭・一般炭の価格推移(CIF)(1988-2000)	94
図 16 粗鋼生産量推移(1971 年～1990 年)	96
図 17 鉄鋼輸出入量(粗鋼換算)	98
図 18 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)①建設	99
図 19 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)②四輪車生産	99
図 20 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)③新造船受注量	99
図 21 日本鉄鋼業の売上高営業利益率推移(1980～1990)	101
図 22 日本の粗鋼見掛消費量	109
図 23 5ヶ国の粗鋼見掛消費量	110
図 24 日本の対中国鉄鋼輸出量(1985-1995)	111
図 25 高炉銑トンあたりの平均燃料使用量	117
図 26 SCOPE21 と現行炉(稼働中のコークス炉)との生産性比較	137
図 27 要素組合せ試験設備フロー	138
図 28 SCOPE21 の最終プロセスの概要	140
図 29 DIOS と高炉技術の関係	156
図 30 高炉技術と鉄鋼合理化計画の関係	157
図 31 DIOS と鉄鋼合理化計画の関係	158
図 32 DIOS と外部要素との相互作用	159
図 33 一貫製鉄の流れ	164

図 34 技術課題解決のプロセス	166
図 35 既存技術の発展	167
図 36 破壊的イノベーション理論	170
表 1 アンケートに見る 2020 年におけるプロセスの革新	12
表 2 アンケートにみる主な技術課題	13
表 3 鉄鋼首脳と通産大臣の懇談内容	17
表 4 川崎製鉄法と CIG の特徴	41
表 5 エイジ・ストラクチャー①コークス炉（製鉄会社分のみ）（1989 年末）	51
表 6 エイジ・ストラクチャー②焼結炉	51
表 7 エイジ・ストラクチャー③高炉	51
表 8 DIOS 研究開発委員会の委員会別役割	56
表 9 DIOS 実施委員会の室別役割	56
表 10 要素研究内容と実施場所	67
表 11 DIOS と高炉の比較	83
表 12 DIOS と高炉の純所要エネルギー比較	84
表 13 1986～1987 年鉄鋼大手の合理化計画	102
表 14 戦後日本鉄鋼業の歩み	104
表 15 第 5 世代日本鉄鋼業に向けての研究開発計画	105
表 16 1990 年の高炉設備休止計画異動状況	106
表 17 1993 年鉄鋼大手各社の合理化計画	106
表 18 1987 年と 1993 年の鉄鋼合理化計画内容	107
表 19 1994 年鉄鋼大手の合理化計画	107
表 20 1994 年鉄鋼大手の合理化計画の内容	108
表 21 コークス技術発展の経緯（1978～1994）	128
表 22 SCOPE21 開発スケジュール	135
表 23 主要設備の概略仕様	139
表 24 試験内容	139

序章 問題の所在

はじめに

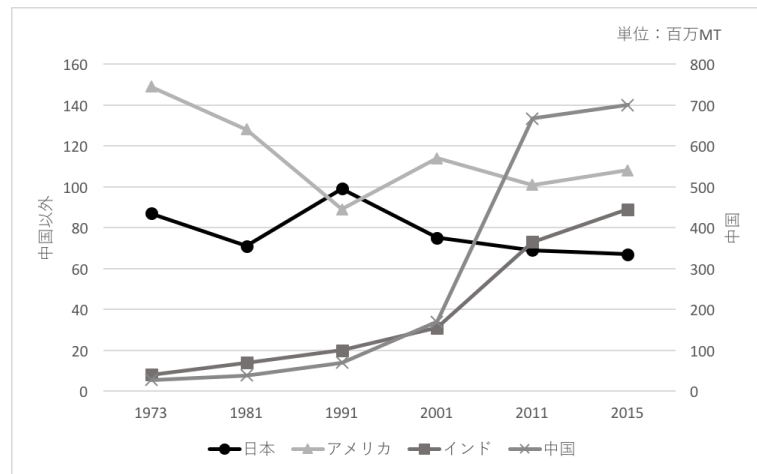
高炉による銑鉄の製造は 100 年以上の歴史を持ち、高炉技術は銑鉄製造および銑鋼一貫製造にとって最も効率的であると信じられてきた¹。戦後日本の経済発展においても、鉄鋼産業の果たした役割は大きく、その発展を可能にしたのは高炉製鉄法を中心とした大型一貫製鉄体制が導入・普及されたことが明らかにされている²。その意味で、高炉技術は日本鉄鋼産業の基幹技術であり、今後も重要な役割を果たし続けていくと予想される。

しかしながら、欧米や日本のような先進国では鉄の需要が減少傾向にある。鉄鋼需要を示す指標の一つである粗鋼見掛消費量(生産+輸入-輸出)は、図 1 で示すように 1973 年以降は減少傾向である。日本の場合、1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて内需拡大政策が実施され、いわゆるバブル経済期を迎えていたため、一時増加していたが、その後再び減少傾向となっている。

¹ 日本で初めてコークスを使用して銑鉄を製造する大型高炉が導入されたのは 1894 年(明治 27 年)のことである。この時旧英式大型炉を導入したが、同式が英国で初めて成功したのは 1709 年アブラハム・ダービーによる[川崎, 1982, pp. 4-5]。

² 戦前と戦後の鉄鋼業のあり方で最も大きな変化は、戦前は国営企業日本製鉄と日本鋼管のみが高炉による銑鋼一貫生産を行い、他の鉄鋼メーカーは平炉や電炉による製鋼生産を行うという棲み分けがあった。しかし、戦後は民間各社が高炉による銑鋼一貫生産体制を整え、熾烈なシェア争いに変化した。それが国際競争力のある日本鉄鋼業を作り上げたのである[Yonekura, 1995], [米倉, 1999]。

図 1 粗鋼見掛消費量推移(日本, アメリカ, 中国, インド)



出所:Steel Statistical Yearbook[World Steel Association, 各年]³

高炉による銑鋼一貫製鉄生産の大きなメリットの一つは、大量生産による規模と価格競争力の確保である。しかし、規模の経済で利益を得られたのは、先進国が経済発展をしていた時代のことであり、現在は中国やインドなどがその状況にある。むしろ、先進国では少量多品種に対応できるフレキシブルな生産体制や省エネルギー性・環境親和性が求められはじめているのである。

本研究では、20 世紀を席卷した高炉による大容量銑鋼一貫製鉄プロセスに対して、先進国のニーズに合わせた少量多品種しかも環境制約や省資源に強い新技術が出現、脚光を浴

³ MT とは Metric Tones の略称であり、MT=1000kg である。アメリカやイギリスで使われる long ton や short ton と明確に区別するためには、単にトンではなく MT と書く。

びつつも、結局実用化されなかったプロセスを考察しながら、技術選択のあり方を多面的に考察する。

具体的には、日本鉄鋼産業における製鉄技術研究開発のナショナルプロジェクトであった「熔融還元製鉄技術研究開発(Direct Iron Ore Smelting; DIOS)」の歴史を考察・分析する。同プロジェクトは、高炉が持つ課題(高品位コークスの資源制約、柔軟な制御の困難性、コークス炉の寿命問題、小型・小ロットの対応不能など)を解決する新しい製鉄技術として計画された。しかし実際には、同技術が日本の鉄鋼産業において採用されることはなかった。DIOS は、日本鉄鋼連盟と石炭エネルギーセンターが主導した製鉄技術のナショナルプロジェクトの中で唯一の「高炉を使わない製鉄技術」であったため、DIOS プロジェクトは高炉プロセスを代替するものとして大きな期待を抱かせるものであった。しかし、結局代替候補から除外され、実用化されることはなかった。日本では実用化はされなかったが、1992 年から 2004 年にかけて同様の技術を開発した韓国の POSCO は 2008 年に浦項製鉄所内に 150 万トン/年規模の実用工場を建設した⁴。本論文の対象は日本における熔融還元製鉄技術の研究開発の歴史分析

⁴ 韓国の POSCO は、1992 年から 2004 年まで熔融還元製鉄技術(Fine Ore Reduction Process: FINEX)の開発した。1992 年にオーストリアの VAI 社と技術提携で同技術の研究開発を開始した後、1996 年から独自に 15 トン/日のモデルプラント、1999 年 150 トン/日のパイロットプラント、2003 年 60 万トン/年のデモンストレーションプラントと研究開発を続け、2008 年 150 万トン/年の実用プラントを建設したのである。同技術は、低品位石炭と粉鉱石を利用し、コークス・焼結工程を省略して銑鉄を生産する技術である[Lee, 2010]。

であるため、韓国の実用化事例は詳しく取り上げないが、溶融還元製鉄技術が実用化技術として可能性を持っていたことを、韓国の事例から伺い知ることができる。また、韓国において同技術が実用化された時に、当時浦項製鉄 CTO (Chief Technology Officer) だった Kang Changoh は「日本の DIOS 法技術開発など様々な関連技術開発動向をモニタリングした時に、同技術が実用技術としての可能性を持つものであると確信した」と言っていた [Lee, 2010, p.164]。本研究は、このように実用化可能性を持っていた DIOS が日本の中では選択されなかった歴史過程を考察・分析するものである。

DIOS の登場の背景には、1980 年代中期以降の鉄鋼生産をめぐる外部環境の変化によって、銑鉄製造の将来は高炉技術から脱高炉技術（高炉を使わない技術）にシフトしていくことが想定されたことがあった。この変化には、技術、資源、設備寿命といった企業内部の要因のみだけでなく、オイルショックやドル安・円高といった外部要因も大きく関係していた。このような経済情勢下で、DIOS（脱高炉技術）の研究開発が推進されたのであった。高炉の抱える課題解決は、高炉保有企業、特にそのリーディング・カンパニーにとっては死活問題であった。また、新技術の選択に関しては、リーダー企業とフォロワー企業に戦略的相違があるだけでなく、鉄鋼メーカーとコークス製造会社の関係、生産全体におけるバリューチェーン問題、鉄鋼連盟や政府の政策など様々な要因が錯綜していた。したがって、DIOS プロジェクトへの参加企業には、推進派もあれば消極派もあった。

本研究では、DIOS 盛衰の歴史を多角的な視点から分析し、同技術が選択されなかった要

因を経時的に追跡することによって、いかにして既存技術の課題が克服されていったのかを確認する。この一連の作業の意味は、新しい技術が出現した時に従来の技術に依存する既存企業はどのように対応し、どのように既存技術を発展改良していくのかを見ることにある。この歴史から見えてくることは、これまでの既存技術体系を破壊してしまうような、いわゆる「破壊的イノベーション (disruptive innovation)」の出現は、むしろ既存技術の課題解決を焦点化し、漸進的な改良技術 (incremental innovation) を加速化する可能性があることである⁵。この点については、結論で詳しく論ずることとする。

第1節 考察対象としての DIOS プロジェクト

本節では、DIOS というナショナルプロジェクトを考察の対象にする理由を提示するために、DIOS や新製鉄技術の学術論文および業界誌などの文献において同技術が開発当時に極めて高く評価されていたことを指摘する。

DIOS プロジェクトは、鉄鋼連盟の主導の下で 8 年間にわたり約 150 億円の資金を投じ、国内大手鉄鋼 8 社が参加したナショナルプロジェクトであった。また、開発当時には今後の活用が大いに期待される技術であると認識されていた。しかし、これだけの予算と時間を費やし

⁵ クリステンセン(1997)はこうした新技術の破壊的側面について考察を行った[クリステンセン, 1997]。しかし、破壊的技術は破壊的故に既存技術を逆に強化する可能性もあるのである。

て推進されたプロジェクトであることにもかかわらず、そこには二つの謎がある。

第一の謎は、このプロジェクトに関して、一般市民がアクセスできる情報が極めて限られていることである。日本鉄鋼協会の論文集である『鉄と鋼』でさえ、このプロジェクトや溶融還元製鉄技術に関して執筆されたものは少数に過ぎなかった⁶。その上、DIOS 関連の論文著者も少数に限定されており、プロジェクト成果や事後的評価に関して多少の記載はあるものの、プロジェクト実施当時の状況を詳細に知ることはかなり難しい。また、それら文献のほとんどは世界における溶融還元製鉄技術の普及や研究開発の進捗などの内容が多く、DIOS プロジェクトに焦点を合わせた記述は一部のみである⁷。その上、DIOS プロジェクトに関する公的文書も手に入れることができなかった。その反面、DIOS の次の製鉄技術ナショナルプロジェクトであった SCOPE21 に関する文献は学術論文であれ、公的文書であれ DIOS に比べて非常に入手しやすい。このように手に入れることの難しい DIOS や溶融還元製鉄技術に関する文献を調べるために、いくつかの論文データベース(CiNii, Google Scholar, J-GLOBAL)を使用した⁸。そ

⁶ [宮崎, 1992], [片山, 1993], [福井, 1996], [松尾他, 1996], [北川, 2002]

⁷ 上記の『鉄と鋼』に掲載された DIOS や溶融還元製鉄論文の中で、溶融還元製鉄全般ではなく DIOS プロジェクトに焦点を合わせたものは、[福井, 1996], [松尾他, 1996], [北川, 2002]のみである。

⁸ CiNii(Citation Information National Institute of Informatics):国立情報学研究所(NII)が運営する学術論文や図書・雑誌などの学術情報データベース
Google Scholar:論文, 学術誌, 出版物などの情報データベース
J-GLOBAL:科学技術振興機構(JST, Japan Science and Technology Agency)が運営する研究者情報, 文献情報, 特許情報, 研究課題情報, 機関情報, 科学技術用語情報, 化

の結果、溶融還元製鉄に関する書物は総計で 50 件あり、その中で、DIOS の研究開発に焦点を合わせたものは 39 件だった⁹。しかし、この中で、23 件は、『材料とプロセス』(18 件)、『石炭利用技術会議講演集』(4 件)、『西山記念技術講座』(1 件)と、学会や講演会の報告概要であり、これらの文献は、一般にアクセスすることが難しいものであった。その上、CiNii、Google Scholar ではこれら講演会、学会の報告概要は検索できないため、J-GLOBAL 以外のルートからはその存在すら確認することが困難であった。

文献の入手だけではなく、当時の状況に関するインタビューも困難であった。公開文書が少ないため、筆者はあらゆる手法を使って鉄鋼連盟、鉄鋼協会、企業関係者にアプローチし、当時の DIOS プロジェクトに関わった人物へのインタビューや資料を求めた。しかし残念なことに、インタビューに応じてもらうことはほとんどできなかった。そこで挙げられた理由は主に三つある。①DIOS プロジェクトは 20 年前に終了したプロジェクトであるため、インタビューに対応できる人が業界にほとんど残っていない。「それでは参考資料だけでも」ということで頂いたものは、北川(2002)と宮崎(1992)であり、これは鉄鋼協会の論文集『鉄と鋼』誌に掲載されているもので、インターネットでも入手できる資料であった。その上、宮崎(1992)は、溶融還元製鉄技術の全般的内容を扱うものであるため、DIOS の詳細を知ることは困難である。筆者は DIOS 関

学物質情報、資料情報等の総合的学術情報データベース

⁹ 溶融還元製鉄、溶融還元+DIOS、製鉄+DIOS で検索し、重複や無関係なものを削除。

連資料を業界団体、学会、企業を合わせて約 10 名前後の方々に依頼していたが、送られてきた資料のほとんどはこの二つの論文か北川の他の論文[北川 1996, 1999]であった。② DIOS 技術は失敗した技術であることから記録があまり残っていないため、聞き取り調査や資料の提供が難しいということであった。③DIOS プロジェクトや溶融還元製鉄に詳しい技術者があまりおらず、北川の論文以上の回答は困難とのことであった。ある企業に「溶融還元技術に関して調査している」とメールを送った時にゴミ処理用環境プラント資料が送られてきたことから、現在の鉄鋼業界では DIOS プロジェクトや溶融還元技術を用いた製鉄技術というものが直ぐに頭に浮かばないということの意味するものであろう。その後、溶融還元製鉄に関する質問を明確にして再度要請したところ、メールによる返答は既に公開されている DIOS プロジェクトの結果や評価であり、詳しい情報を聞き出すことはできなかった。ある企業関係者からは、「もうこの分野の技術専門家はいない」との返信もあった。

DIOS はわずか 20 年前に終了したプロジェクトであるのに、当時の DIOS 関係者が鉄鋼業界にいないのは何故だろうか。日本企業には終身雇用制度があるのに、どうして当時 30～40 歳代であった研究者が一人もいないのであろうか。たとえ、失敗した技術であってもナショナルプロジェクトである以上は、ある程度まとまった資料が保存されているはずであり、国の資金で実施されたプロジェクトの記録がほとんど残っていないのは何故だろうか。このように業界関係者へのアプローチをしているうちに、DIOS の謎はさらに深くなった。

第二の謎は、関連論文や関係者の少なさと裏腹の DIOS に対する初期段階の高い評価であった。数は多くないが、入手できた関連文献等を見ると、DIOS は技術的に高い評価を得ており、今後実用化の可能性がある」と記述されている。当時のフィジビリティスタディー（グリーンフィールド・ベース）においても経済性が高いと評価されていた〔日本鉄鋼連盟②, 1996〕。日本国内には高炉設備が数多く現存していることから、日本における実用化は不可能であったとしてもその技術を利用した海外展開の可能性もあった。事実、当時の記録でも、日本における全面的導入は難しいが、徐々に熔融還元製鉄技術へのシフトが予測されていた。例えば、北川(2002)は、次のように述べ、海外展開の可能性を見込んでいた。

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〔北川, 2002, p. 442〕。

また、鉄鋼協会『ふえらむ』誌も、以下の記載をして、実用化の可能性は肯定的に評価していた。

現在の高炉メーカーのエネルギー原単位は1万 9,200Mj/t であり、コークス比 398kg, 微粉炭比 155kg である。生産力的には現状の生産量を維持するには DIOS の方が投資額が高くなるが、所要エネルギーが 20%弱減少することからエネルギー効率を改善できると伝わっている。したがって、大型化による課題解決に進むよりも 10～100 万 t/年クラスの初期投資が少ない少量生産対応の鉄原製造プロセスとして汎用化されと考えられる(6,000t/day 規模の設備コストで高炉法と比較して 35%, 製造コストで 19%の削減可能, 4%位の省エネルギー, 約 5%CO₂ 排出量削減)。おそらく東南アジアなどでの新規設備に有用と思われる〔三浦, 1999, p. 26〕。

しかしながら、DIOS 技術の海外における実用化設備は確認されていない。他方、韓国で

2004 年に開発され、2008 年に実用化された溶融還元製鉄技術 FINEX の場合、中国、インド、イランなどへの海外展開を積極的に推進している。

こうした経緯から、DIOS プロジェクトに関する資料調査に拍車がかかった。そして、日本鉄鋼連盟で毎月発行していた『鉄鋼界』誌に、DIOS プロジェクトの当時の状況や情報が数多く記事として掲載されていることが分かった¹⁰。特に 1988 年から 1992 年の間には、DIOS 関連情報が集中的に記載されており、毎年 1 月に行われた新年社長座談会の記事には必ず DIOS プロジェクトに関する言及があった。その上、1996 年 3 月に DIOS プロジェクトが終了するまで、このプロジェクトに対して肯定的な評価や意見が数多く発言されていた。ここに DIOS 技術に対する当時の認識や評価を幾つか紹介する。1991 年から DIOS プロジェクト実施委員会の研究部長であった金森は、以下の通り、DIOS 技術は経済的にも環境的にも優位性を持つと記述している。

高炉法が溶融還元法に急激に変わるのではなく、コークス炉の寿命、エネルギー事情、環境問題の変化に応じながら、両者が両立、あるいは溶融還元法に徐々に変わっていくものと考えられる [金森 & 有山, 1995, p. 284]¹¹。

日本鉄鋼連盟は、DIOS 共同研究開発を主導した組織であるが、以下の評価をしていた。

¹⁰ 『鉄鋼界』誌は、2002 年廃刊されたため、現在は発行されておらず、同誌に辿りつくまでは DIOS を研究することが不可能だと思っていた。

¹¹ 本稿は製鉄産業における溶融還元法を考察するものであり、本稿で「溶融還元法」と表記したものは、「溶融還元製鉄技術」を意味する。

DIOS プロジェクトは、世界の溶融還元製鉄法の研究の中で最も大規模であった。一般的に Pilot Plant の次は Demonstration Plant (実証プラント)あるいは Prototype (商業プラントの原型)の段階を経て商業プラントに以降するとされているが、DIOS 法共同研究に傾注された努力と商業プラントの習練によって見込まれる可能性を考慮すればこの段階は不要となろう。[日本鉄鋼連盟②, 1996, p. 36]

後に DIOS に関して最も多くの公開論文や報告書を残した北川は、要素研究の 3 年間、高炉法を凌駕する目標達成の見通しを得て、パイロットプラントでは高炉代替プロセスとして導入するための条件を明確にするとともに、当プロジェクトは溶融還元炉と予熱・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し、実用上の諸課題を解決したと記述した。その上、高炉代替プロセスとして新規建設を想定した場合、DIOS 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した [北川, 2002]。

また、鉄鋼連盟が行った次のアンケート調査結果に、当時の研究者らが溶融還元製鉄技術をどう認識していたかが示されている [中島, 1990]。この調査は、1989 年 8 月から 9 月に日本鉄鋼協会・共同研究会調査部の構成会社 7 社とその技術者を対象に行い、1990 年 2 月に集計・解析したものである。このアンケート調査は、PART・A「2020 年頃における環境変化、鉄鋼共通テーマ」と PART・B「2020 年頃の鉄鋼製造プロセス別技術革新予想」で構成され、PART・A に技術者約 300 余名、PART・B に各社担当者が回答していた。

表 1 は、「2020 年におけるプロセスの革新」として溶融還元炉の実用化が達成されると期待されていたことを示したものである。

表 1 アンケートに見る 2020 年におけるプロセスの革新

プロセス		革新技術
製鉄	原料・予備処理	・新しいコークス製造法(超大型コークス炉等)の実用化
	高炉	・高効率高炉の稼働 ・ <u>長寿命化</u>
	溶融還元	・ <u>溶融還元炉の実用化</u>
製鋼	溶銑予備処理	・大量処理技術
	転炉	・高能率, 高歩留操業 ・コンピューター等による省力化
	スクラップ溶解炉	・スクラップ選別回収技術 ・新多量スクラップ溶解炉の出現
	二次精錬	・多機能化の実現 ・高速処理技術 ・高粉体吹込精錬技術および高純度化技術
	連続 casting	・タンデム精錬技術 ・連铸機の多様化 ・品質評価技術
圧延	ホット	・完全連続圧延技術 ・材質等の制御技術 ・無人運転
	コールド	・チャンスフリー, 小ロット多サイズ製造技術 ・ユーザーと製造工程とのオンライン化
	条鋼	・材質予測制御技術 ・インライン表面処理
	形鋼	・高寸法精度圧延技術 ・直接圧延技術
	鋼管	・無欠陥溶接技術 ・高寸法精度圧延技術 ・各種計測制御技術
	厚板	・直接仕上圧延 ・材料等計測制御技術 ・メーカーとユーザー間の対話システム
表面処理		・新メッキ技術 ・計測制御技術
複合材料		・各種接合技術

出所: [中島, 1990, p. 47]

注: 下線および太字設定は筆者金による

その上, 表 2 のように, 当時の技術者や関係者は, 溶融還元製鉄技術に対し経済性を目指した開発が必要と認識しながらも, 2000 年頃には大規模設備が実用化できると考えていた。

表 2 アンケートにみる主な技術課題

大項目	重要項目	課題	実現 予想	規模	備考
社会環境の変化	・地球環境対策(CO₂) ・省エネルギー ・オンライン材質予測及び材質検査技術 ・無人化工場の実現	・バイオテクノロジー等による回収技術および省エネルギーによる発生量削減技術	◎	◎	共通分野
		・環境・資源対策に対応した新製造技術の開発	△	△	共通分野
		・プロセス冶金技術, 高機能センサー, AI 等活用	△	△	共通分野
		・高機能センサーや知能ロボット等の開発	○	○	共通分野
技術環境の変化	・<u>溶融還元</u> ・新溶解法 ・<u>耐火物寿命の延長</u> ・工程の直結化, 連続化 ・新鑄造法の実現(薄連続鑄造技術, レオキャストイング等) ・超伝導応用技術 ・製鉄所の情報化 ・鉄鋼メーカーとユーザー間データベースの共有化	・ <u>経済性を目指した開発が必要</u>	△	◎	製鉄分野
		・スクラップ溶解に際して, C, CO 等の有効利用技術	◎	◎	製鋼分野
		・ <u>高炉・コークス炉等の寿命延長対策</u>	○	○	製鉄分野
		・小ロット対応, 高品質化対応および高生産性対応技術	△	△	製鋼・圧延分野
需要構造の変化	・スクラップ選別, 不純物元素除去・分離技術	・凝固制御技術, 表面寸法制御技術および大量生産技術の開発	○	○	製鋼分野
		・磁場を利用した鍛錬効果や電磁攪拌に応用	○	△	共通分野
		・AI, 高速情報通信等の導入	△	○	製鋼・圧延分野
		・メーカー, ユーザーの個性に応じたシステム化とデータベースの共有化	◎	◎	製鋼分野
需要構造の変化	・スクラップ選別, 不純物元素除去・分離技術	・自動選別, 洗浄化技術の開発	◎	◎	製鋼分野

出所: [中島, 1990, p. 49]

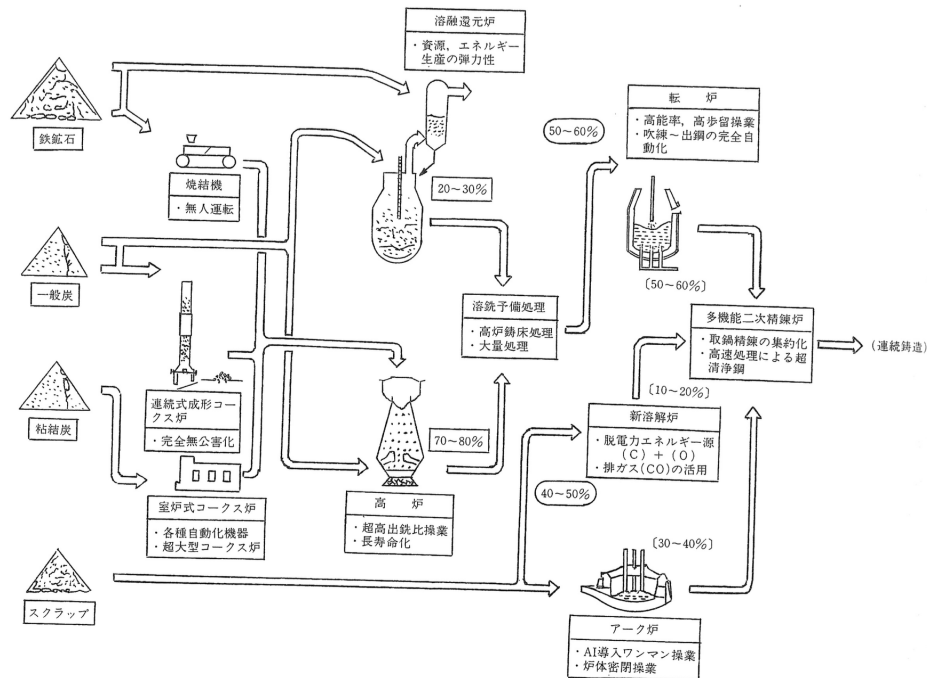
注 1: △は 2000 年頃実現予想, ○は 2010 年頃実現予想, ◎は 2020 年頃あるいはそれ以降実現予想.

注 2: ◎は規模が「大」, ○は規模が「中」, △は規模が「小」を表す.

注 3: 下線および太字設定は筆者金による.

このアンケート結果を基に, 図 2 に示す「2020 年銑鋼プロセス像」が描かれた. 図 2 から, 製銑工程において溶融還元炉が導入され, 20~30%の溶銑が製造されると予想されていたことがわかる.

図 2 2020 年鉄鋼プロセス像



出所: [中島, 1990, p. 46]

溶融還元製鉄技術に対する期待は業界内だけではなく、政府機関からの支援も大きいものであった。このことはナショナルプロジェクトなので当然なことかもしれないが、金銭的援助や政策支援に伴い、ほぼ半期毎に行われていた鉄鋼首脳懇談会や 1987 年設けられた基礎素材産業懇談会などでも多いに議論されていた。

まず、1987 年設置された基礎素材産業懇談会の内容や当時のインタビュー記事を見ると、溶融還元製鉄技術の研究開発の開始当時の期待を確認することができる。基礎素材産業懇談会とは、1987 年 3 月に基礎産業局長の私的諮問機関として設置されたものである。この懇談会の鉄鋼小委員会は同年 6 月に「新世代の鉄鋼業に向けて」という中間報告を作成した。

ここでは三つをあげて新世代鉄鋼業のあり方を提言しているが、それに関する特集インタビューで通商産業省基礎産業局長鈴木直道(当時)のコメントから、溶融還元製鉄技術の開発に対して、政府側でどのように期待が寄せられていたかを確認できる。

中長期的な鉄鋼業の展望については、報告書では大きく3点を上げています。第1は、鉄そのものの高付加価値化、それを報告書ではファインスティール化といっております。(中略、筆者)第2は、素材革命の中での重要な役割という点であります。鉄鋼の生産工程には、多くのハイテク技術が駆使されています。よく鉄鋼各社のトップの方々が、鉄鋼業は技術のコンポジットであるといわれておりますが、私も素晴らしい点をついていると思います。(中略、筆者)第3点は、生産プロセスの問題です。素材の高機能化と同時に、素材に対する需要ニーズはますます多様化していくことになりますが、これに伴い従来のような少品種大量生産方式ではなく、多品種少量生産機能・システムというものが、今後の鉄鋼業の生産技術上のポイントになっていきます。報告書でもこの点をより重視してフレキシブル・マニファクチュアリング・システムを鉄鋼業の中に確立すべきことを強調しているわけです。このフレキシビリティというのは、そもそも機械産業で使われた表現であり、これを大量生産メカニズムでフレキシビリティをとり入れにくいとみられている鉄鋼業に実現しようということであり、発想としては画期的であると考えています¹²。同じ生産ラインから多様な素性、形状、用途を持った製品が同時に順次加工されてくるということをイメージしているわけで、鉄鋼業が需要構造の多様化に如何に柔軟に対応していくかという大変重要な課題です [通商産業省基礎産業局長鈴木直道, 1987, p. 4]。

インタビューの中で鈴木は3点目のフレキシブル・マニファクチュアリングをより重視しており、その具体的内容として

将来的に求められているフレキシブル・マニファクチュアリング・システムをより有効に機能させていくという観点からも、次世代製鉄法といわれる溶融還元製鉄法の開発が急務であるし、ファインスティール化を進めていくためには半凝固加工プロセスの開発が非常に重要なテーマとなります。こうした前向きの技術開発については、通産省としても積

¹² 下線は筆者金による。

極的に応援していく所存であります〔通商産業省基礎産業局長鈴木直道, 1987, p. 6〕¹³.

と溶融還元製鉄の開発が必要であると語っていた.

また, 通産大臣が変わる毎に鉄鋼首脳との懇談会が開かれていたが, 1988 年から 1993 年までのほとんどの同懇談会において溶融還元製鉄に関する要望事項を伝えていた. 表 3 は, 各月『鉄鋼界』の国内トピックスに掲載された鉄鋼首脳と通産大臣の懇談に関する記事から, 鉄鋼業界が通産大臣に求めた要望事項を要約したものである.

¹³ 下線は筆者金による.

表 3 鉄鋼首脳と通産大臣の懇談内容

開催日	通産大臣	日本鉄鋼連盟会長	日本鉄鋼業界からの主要要望事項
1988.9.9	田村元	武田豊	・内需型経済の継続 ・退職給与引当金の繰入限度額の特例および賞与引当金の持続・存続 ・溶融還元製鉄法の共同研究の推進, 支援
1989.12.14	松永光	齋藤裕	・内需主導型の景気拡大持続と高齢社会に備えた社会資本整備・充実 ・消費税込着と法人税率引き下げ ・CO₂による地球温暖化問題対応 ・溶融還元製鉄法の開発への一層の支援
1990.4.16	武藤嘉文	齋藤裕	・内需主導型経済構造定着と景気拡大 ・高齢化社会に備えた社会資本整備・充実 ・地球温暖化問題への公平な対応 ・溶融還元製鉄法の早期実用化のための公的支援拡大
1991.3.11	中尾栄一	齋藤裕	・内需中心景気持続のための機動的経済運営(内需中心景気拡大, 為替レート安定化) ・詳細な土地利用計画等を含めた総合的, 整合性のとれた土地政策の一環としての土地税制実施と地価税強化反対 ・気候変動防止のための公平かつ実効ある国際協力枠組みづくり, 鉄鋼業における省エネルギー推進への支援 ・次世代の鉄鋼業を担う技術である溶融還元製鉄法, 新製鋼プロセス共同開発への一層の支援
1991.12.2	渡部恒三	齋藤裕	・内需中心景気持続のための機動的経済運営 ・法人臨時特別税の廃止, 地価税導入に対する法人税の減税実施, 歳出削減への努力など安定的税収の回復 ・一層の省エネルギー推進支援 ・溶融還元製鉄法および新製鋼プロセス研究開発への一層の支援
1993.2.22	森喜朗	齋藤裕	・新年度予算の早期成立と昨年度に続く公共事業投資の前倒しを期待, 住宅減税, 設備投資減税の実施, 個人消費促進策としての所得税減税の実施 ・鉄鋼貿易の国際的な秩序回復(主にアメリカの日本に対するダンピング・マージンに関して) ・環境基本法の制定, CO₂ 税等への慎重な取り組み ・地価税の抜本的見直し等税制改革の推進 ・溶融還元製鉄法, 新製鋼プロセス等の次世代製鉄技術の開発への一層の支援

出所:[鉄鋼界, 各月]の国内トピックスを参考に筆者金作成

1988年から1993年にかけて行われた6回の懇談において、溶融還元製鉄法の研究開発への支援を求めていた。このように、鉄鋼業界が毎回の首脳懇談において溶融還元製鉄法の重要性をアピールしていたことから、同技術への関心が極めて高かったことが推測できる。通商産業省にも同技術に関する情報が渡っており、政府としてもその重要性を認識していた。

上述の通り、DIOS 技術に対する当時の高い評価や期待とは違って、同技術は日本の中で高炉を代替するどころか一基の実用化工場も建設されなかった。そして、DIOS を「失敗した技術」といいながらも、その「失敗」の理由を明確に記載したものは見当たらない。このため、DIOS という実用化されていない技術プロジェクトに焦点を当てる必要がある。

第2節 先行研究

1. 鉄鋼業に関する先行研究

鉄鋼業の経営学的考察において、大型一貫製鉄の成立とその時高炉が果たした役割に関する研究は数多くあるものの、高炉技術が主流技術として継続的に使用される理由に関する考察はほとんど行われていないことを指摘する。本研究では DIOS という新技術プロジェクトの分析を行うが、このことは高炉が抱えている課題に直面した時にどのようにして生き残ることができたのかを検証する一つの試みでもある。

リン(1986)は、1950年代までまだ純酸素上吹き転炉(LD 転炉)が確立される以前の平炉やベッセーマ/トーマス転炉の時代からどのように LD 転炉の時代に切り替わったのかに関する

歴史を日米比較によって説明した。当時、平炉が主流の製鋼技術として使い続けるだろうと主張していたアメリカの鉄鋼産業に比べて、日本の方が LD 転炉の導入を先に遂行し、大型鉄鋼一貫製鉄体制を整えた。それが日本鉄鋼業の成功を収めるようになったという歴史を明らかにした[リン, 1986]。

川崎勉(1987)は、古代から 1970 年代までの日本鉄鋼産業を概観し、1970 年に八幡製鉄と富士製鉄が合併して新日本製鉄(以下、新日鐵)が成立するまでの歴史を記述した¹⁴。同研究は、年代ごとの日本経済の変化とそれに伴う鉄鋼産業の発展を描き、それを原料、市場、技術、企業といった要素に区分した上で戦後日本の鉄鋼産業の成立を網羅している[川崎, 1987]。

リン(1986)と川崎(1987)の著書は、日本鉄鋼産業の成立や大型一貫製鉄の導入により、日本の鉄鋼産業がどのように発達したのかを示す貴重な研究である。しかしこれらの研究は、一貫製鉄設備が導入され、日本鉄鋼産業が世界の鉄鋼産業をリードするようになるまでの歴史を記述したものであり、その後高炉の改善や発展が行われた時代までの歴史は含まれていない。

十名(1996)は、日本鉄鋼業の生産システムを明らかにした。同書は、鉄鋼生産システムを、

¹⁴ 新日本製鉄は 2012 年に住友金属工業を吸収合併し、社名を新日鐵住金株式会社と変更したが、本稿では新日鐵と表記。

生産技術システムと労働編成から分析し、機会設備体系や工程編成、コンピューター、原材料といったハードウェアの面と、モノの動かし方や機能に関わる技術標準、作業標準、応用ソフト、機能、ノウハウなどのソフトウェアの面に分けて生産技術システムを記述している。また、職務や作業組織、従業員配置など職場編成の面を考察する労働編成を分析し、生産技術システムとの関連について考察した[十名, 1996]。同研究は、戦後日本の大型一貫製鉄設備が導入されるまでの過程を描いた川崎やリンの研究とは違って、大型一貫製鉄が導入された後の日本の鉄鋼産業を説明している。その過程で、日本の鉄鋼技術の変遷についての考察も含めており、技術開発や新技術の登場などについても触れている。しかしそれは、新技術の紹介程度にとどまっており、なぜ高炉技術が主流として使用し続けられているかに関する考察は行われていない。

伊丹(1997)は、日本鉄鋼業が衰退産業であるとの見解に対して、日本の鉄鋼産業は成熟しているが、衰退ではないと主張した。そこで、日本の鉄鋼産業が衰退しているように見える理由は、オイルショック以前の日本鉄鋼産業は、量も価値も驚異的に拡大した時代であることに対して、オイルショック後には、量の微減と価値の拡大の時代であり、それは産業として大きな構造調整が行われたことであると述べた。そこで、日本の鉄鋼産業が世界一の鉄鋼産業であり続けられる理由として、主に三つの要因を挙げている。それは、①鋼材の高級化、②技術革新による工程の効率化・自動化、リストラによる設備の集約、人員削減で実現したコストダウン、③安定供給や多品種鋼材の供給、確実な納期管理などのサービスの充実である[伊丹,

1997]. しかし、同書の説明はほとんど製鋼技術やさらにそれより川下のサービスに関するものであり、高炉技術など製鉄工程の発展に関する説明はなされていない。これは、高炉製鉄技術は変わらないことを前提としているからであると思われる。同書では高炉技術が如何にして主流技術としてその役割を担っているかに関する説明はあまりなされていない。

米倉(1992, 1994, 1999)は、戦後日本の高度経済成長を牽引した鉄鋼産業の成立を分析した。同研究では、日本鉄鋼業発展の要因を産業政策、企業家精神、企業間関係という側面において考察した。特に川崎製鉄が新技術を用いて大規模の一貫製鉄所を導入したことが、その後の日本鉄鋼産業の構造変化に与えた重大な影響を川崎モデルとして抽出し、それに伴って重工業、家電産業、自動車産業の大きな発展が遂げられたことを明らかにした。その過程で最も重要な出来事は、日本製鉄の解体と川崎製鉄の成立であると述べている。また、川崎重工から川崎製鉄の分離と川崎製鉄における大型銑鋼一貫製鉄所の建設という川鉄モデルの成功には、西山弥太郎という当時の社長が大きな役割を果たしていたと主張する[米倉, 1992, 1994, 1999]。

上岡(2005)は、高度成長期直前の 1950 年代前半の鉄鋼業の投資行動を検討した。同書では、戦後日本鉄鋼業が大型一貫製鉄を導入し目覚ましい発展を遂げたのには、戦前から積み重ねてきた日本鉄鋼産業のキャッチアップ努力が戦中期にも維持され、戦後になって近代的一貫製鉄所が成立したのは突然のことではなく、戦前からの発展の過程で生み出されたと述べている。戦後日本鉄鋼産業が急激に発達した 15 年間に 3 つの時期に分けて、敗戦後の

復興期を第1期(1945～1950)、韓国戦争によるブームで蓄積された資本と国家的支援に助けられ第一次合理化計画が行われた第2期(1950～1955)、日本経済の高度成長とともに行われた第二次合理化の第3期(1955～1960)とした。その中でも第2期の第一次鉄鋼合理化期を詳細に分析し、富士製鉄、川崎製鉄、八幡製鉄が一貫製鉄所を建設した時期に関して説明した[上岡, 2005]。

米倉(1992, 1994, 1999)と上岡(2005)の研究は、リン(1986)や川崎(1987)の研究と同様に、戦後日本鉄鋼産業における大型一貫製鉄所の導入やそれがもたらした経済発展に焦点を当てたものである。

川端(2005)は、1970～2000年代初頭にかけての日本鉄鋼業を企業間関係の側面から分析した。上記で取り上げた他の研究が日本鉄鋼産業の一貫製鉄導入による驚異的な発展や生産システムの分析、戦略的成功に焦点を合わせていたことに対して、同研究では企業間関係の主要な特徴を一貫企業間の協調的寡占と同質的競争として捉えた。日本の鉄鋼産業は1970年代半ば以降鉄鋼需要減少と大型一貫製鉄所建設の終了後に、輸入鋼材の侵入を牽制しコスト競争力を確立するために、企業間協調行動を行ったのである。このことによって大手一貫製鉄企業は価格競争を回避したが、その代わりに、各社におけるコスト削減と製品開発をめぐって激しく競争したのである。日本の大手一貫製鉄企業は、類似の購買・生産・販売プロセスを保有していたため、同質的競争関係になったのである。川端は、このような企業間関係が一貫企業の研究開発や生産能力にどう作用したのか、またその能力が企業間関係に

媒介されてどのように経營業績に結びついたか説明した。そしてそのような企業間関係の変質・崩壊・転換を日本の鉄鋼産業がどのように再構築したのかを JFE の誕生や新日鐵・住友金属・神戸製鋼の提携といった、統合・提携戦略を用いて説明した。川端は同書で、日本鉄鋼産業における研究開発や設備投資に関する考察も含めており、その中で高炉の代替技術として開発された DIOS に関して言及し、一貫企業の技術政策は保守主義に傾斜したと主張し、このような保守主義は短期的には合理的かもしれないが、長期的には生産コストや環境コストを高める恐れがある。またこれは、理論的可能性だけではなく、戦後アメリカ鉄鋼業の歴史的教訓でもあり、十分な注意が払われるべきであると指摘した [川端, 2005, pp. 101-143]。しかし、同書の分析対象は 1970～2000 年の鉄鋼一貫企業の企業間関係がもたらした影響であり、新技術に関しては、その紹介と懸念を表したことに過ぎない。

藤田他(2014)は、戦後日本鉄鋼産業の成立と発展を大きく概観し、韓国・中国鉄鋼産業の躍進により影響され、その競争力を失いつつあることを指摘した。その後、日本の鉄鋼産業に再び光は射すのかと問いかけ、日本の鉄鋼業が生き残るためには需給・競争力・環境の三点における問題を解決しなければならないと指摘した。中国や韓国の鉄鋼企業と比べて、日本鉄鋼企業の得意分野である高級品・特殊鋼製品をリーズナブルに提供することで輸出を促進させ、技術革新による原料面と販売面のコストダウンを図ること、省エネルギーのさらなる推進がその解であると主張している。同書の中には著者たちによる「高炉一貫製鉄所は優れているのか」という問いに対する討論のまとめが収録されており、そこで高炉の限界や新しい市

場の登場による新技術の必要性などが議論されている [藤田, et al., 2014]. 同書は, 戦後日本の鉄鋼産業を網羅し, 近年の課題や話題も取り上げ, 高炉技術の限界と新技術の可能性について記載している. このような議論によって新技術への注意喚起が必要であるという問題意識を与えているが, 高炉の限界があることと新技術の可能性を紹介するだけでは, なぜ高炉技術が日本の製鉄技術の主流を担い続けられるのかに関する詳しい考察は不可能である.

以上のように, 戦後日本の鉄鋼産業は目覚ましい発展を遂げ, それが日本の産業発展に多く貢献してきたことは様々な研究によって説明されてきた. また, 日本の鉄鋼産業の発展の裏には大型高炉一貫設備が大きな役割を果たしており, それを可能にした成功物語や日本の鉄鋼産業が 1970 年代以降世界トップの座を占め続けている理由に関する研究も多くある. しかし, それを可能にしている「高炉」というものがこれほど長い間「最も効率の良い製鉄法」として主流技術であり続けていることに対する説明はあまりなされていない. すなわち, 一貫高炉設備が成立した背景や, 高炉が可能にしたものについては説明されているが, その後高炉がどのように主流技術として使用され続けているかに関する説明が欠けているのである.

第 1 節で述べた二つの謎のように, 日本ではナショナルプロジェクトとして溶融還元製鉄技術 DIOS, すなわち高炉を代替するような新技術が積極的に開発された時期があった. その上, 同様の技術が韓国で実用化された実績もあり, DIOS にも実用化の潜在性があったことは明ら

かである。しかしこのような試みがあったことにもかかわらず、日本ではその実用化が行われておらず、高炉技術が主流を担い続けている。多くの産業において新技術が旧来技術を代替するような現象が行なわれている中で、鉄鋼産業では高炉法が 100 年以上の歴史の中で主流技術として使用され続けているのである。

本論文では、既存の鉄鋼産業研究ではあまり注目されなかった新技術、特に熔融還元製鉄(DIOS)を詳しく分析する。DIOS は、高炉による大容量製鉄プロセスを新しい技術で代替しようとした一つの試みであった。しかし同技術はナショナルプロジェクトとして選定され、大きく注目を浴びていたことにもかかわらず実用化技術として選択されなかった。本論文では、DIOS が日本国内のどの企業においても実用化されなかった理由を明らかにすることを目的とする。なぜなら、新技術への積極的な挑戦が存在したこと、それにもかかわらず実用化されなかったことを説明することは、高炉がその代替技術を制圧し、主流技術として使用され続けたという説明の可能性を提示するからである。すなわち、DIOS が実用化されなかった背景を考察することは、高炉が製鉄技術の主流技術として使用され続けられる理由を明らかにする一つの鍵にもなり得るのである。

2. 技術の社会的構成理論

DIOS は実用化されなかった故に、実際に実用規模の工程になった時の効率性や経済性を十分に説明することが困難である。DIOS プロジェクトの中でパイロットプラント研究やフィジ

ビリティースタディー (FS) が行われ、グリーンフィールドにおける実用可能性が検証されたとはいえず、実際の性能は不確実性を含むものである。例えば、東京工業大学の小林教授は、DIOS の寿命に関して、

DIOS が何年もつかというのは分からないですね。高炉も何年持つのかというのを考えたというより、結果的に 30 年使って、30 年もちました、40 年もちましたという風になるからですね¹⁵。

と、その不確実性について語っていた。

選択されなかった技術と既存技術を「技術的」にだけで比較することは不可能である。ここで行われるべき分析は、実用化の可能性を多く持っていた技術の出現にもかかわらず、既存技術の使用を続けることを選択した技術以外の要因を検討することである。このような考察を可能とする理論として、バイカーら[Bijker, et al., 1987]の「技術の社会的構成理論」を取り上げることができる。そのために本節でバイカーの議論について概略する。

バイカーらは、技術と社会学の相互作用の重要性に焦点を当て、特に、科学の社会性及び技術の社会性という、社会構成的分析を行った [Bijker, et al., 1987, pp. 11-44]。彼らによれば、技術の成功がまだ説明できない時、これらの困難に対処する効果的方法は、社会構造として理解することである。

技術の社会的構成論は、人工物が個人によって発明・革新されても、技術は社会的関係

¹⁵ 筆者金によるインタビュー調査：小林能直氏，東京工業大学 科学技術創成研究院 教授，2015 年 5 月 29 日

によって判断されるものであり、それを確立するためにはその技術を取り巻くバリューチェーンや政府などの社会構成員が関与すると主張する。そのため、「開発の成功」自体を説明することではなく、それが確立される過程を説明しなければならないとする。

この理論は 3 つの段階で構成されており、それは①解釈上の柔軟性 (Interpretative flexibility)、②柔軟性の閉鎖 (Closure mechanisms)、③閉鎖メカニズムの社会文化的環境に関連づけること (The wider context) である。解釈上の柔軟性とは、人工物に対する解釈はそれと関係する参加主体間の相互作用によって形成されるということである。柔軟性の閉鎖は、各参加主体間の合意が現れ、技術が確立されるメカニズムである。この閉鎖メカニズムを経ることで、なぜある技術は「消滅」し、一部は「生き残る」のかという理由を明らかにすることが可能となる。閉鎖メカニズムは、修辭的閉鎖 (Rhetorical closure) と問題の再定義による閉鎖 (Closure by Redefinition of the Problem) という二つの方法で説明される。まず、修辭的閉鎖は、人工物の問題を「消滅」させることを意味する。そのため関連社会グループが「問題が解決されていると見なす」ように誘導する。例えば広告などがそれである。次に、問題の再定義による閉鎖は、人工物が持つ解決すべき重要な問題を異なる観点から提示することによって、関連する社会的グループから合意を導き出すことである。第 3 段階の (The wider context) は、人工物の技術的内容をより広範な社会政治的環境に関連付けることである。バイカーらは関連社会グループの社会文化的・政治的状況は、その規範と価値を形作り、結果として人工物に与えられる意味に影響を与えると主張した。

ここでバイカーらによる技術の社会的構成理論を用いた理由は、製鉄の主流技術を確立することに影響を与えた多様な要因が存在することを明らかにし、技術は技術だけで決まらないことを説明するためである。

DIOS の事例では、DIOS という技術に対する解釈が業界のリーダー企業、フォロワー企業、政府などにおいて異なる意味を持っており、その意味が社会経済環境の変化と高炉技術の発展により、課題が再定義された。その結果、DIOS が技術の選択から除外されるという合意に至ったことを見せてくれる。

第3節 資料関係

ナショナルプロジェクトにもかかわらず、DIOS の開発経緯に関しては公開されているまとまった報告がほとんど見当たらない。そこで DIOS プロジェクトを主導した日本鉄鋼連盟によって発行されていた、月刊誌『鉄鋼界』の記事を追跡することにより、DIOS プロジェクトの全対象を把握することとした。また、同誌には、当時行われた各種イベントやプロジェクトの進行過程が当時の視点で記載されている。学術誌や技報による文献は、技術的内容が中心になっており、事後的な技術評価になっているため、その技術が研究開発された背景や過程に関して確認することは困難であるが、他方で『鉄鋼界』で確認できない技術的詳細を知ることができる。

分析の期間は、DIOS プロジェクトが 1988～1996 年にかけて行われたことから、その前後

の動きを把握するために 1980 年～2000 年までとしている。このことによって溶融還元製鉄法がどのように注目を集め、国家プロジェクトとして企画され、そしてどのように終了したのかを追跡し確認できる。

それ以外に、論文データベース(CiNii, Google Scholar, J-GLOBAL)を使用し、DIOSに関する学術雑誌、講演集、機関誌、企業技報、経済雑誌などの資料を把握した¹⁶。その結果、溶融還元製鉄および DIOS に関する書物は総計で 50 件あり、それらの書物を全て確認した¹⁷。同データベースからは、DIOS 関連書物以外に SCOPE21 に関する資料も把握し、確認した¹⁸。SCOPE21 に関する書物は、総計 57 件であった。

外部環境分析のためには、通産資料出版会の資源エネルギー年鑑各年、資源エネルギー庁石炭部監修のコール・ノート各年、日本鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会編の鉄鋼統計要覧各年、日本鉄鋼連盟の鉄鋼受給統計月報(日本鉄鋼連盟 HP より)、World Steel Association の Steel Statistical Yearbook 各年(World Steel Association HP より)などによる統計資料を使用した。また日本鉄鋼連盟『鉄鋼界』の各年 5 月号には各年の鉄鋼業界の動向と統計情報がま

¹⁶ 前掲データベース

¹⁷ 学術雑誌 10 件、講演集 26 件、機関誌 10 件、企業技報 3 件、経済雑誌 1 件
内 DIOS 関連 39 件(学術雑誌 8 件、講演集 25 件、機関誌 5 件、企業技報 1 件)
ただし、同データベースで検出されなかった『鉄鋼界』誌における DIOS, SCOPE21 に関する言及が多数あり、それは 1980 年から 2000 年までの『鉄鋼界』誌を全巻確認した。

¹⁸ 学術雑誌 42 件、機関誌 7 件、講演集 8 件

とめられているので活用した。それ以外に、溶融還元製鉄の研究開発の世界的流れを把握するために特許データベースである Thomson Innovation を使用した。同データベースは、国際特許情報と業界の知的財産 (IP) 分析ツールを組み合わせた統合ソリューションである。

DIOS と SCOPE21 が業界内外でどれくらい注目されていたかを確認するために、国内主要新聞データベース(朝日新聞聞蔵ビジュアル、日経テレコン 21、毎索、読売新聞ヨミダス歴史館)を使用した。

文献では確認できない部分を補うためにインタビュー調査を行った。DIOS に直接かかわった人へのインタビュー調査は不可能であったが、同技術の技術的詳細や評価を聞くために金属工学および材料工学の学者へのインタビューを行った。また、DIOS の競争技術として調査した次世代コークス製造技術 SCOPE21 に関する意見を聞くために、SCOPE21 ナショナルプロジェクトの幹事会社であり、同技術を始めて実用化させた新日鐵の担当者および製鉄所のエンジニアへのインタビューも行った。それ以外に、溶融還元製鉄技術とは少し異なるが新しい製鉄技術として開発された直接還元鉄製造技術を積極的に推進していた神戸製鋼所の元エンジニアへのインタビューを実施した。

第 4 節 全体の構成

本論文の序章においては本研究の課題と目的を提示し、先行研究の分析を行った。特に DIOS プロジェクトに注目する理由を明らかにするために、同プロジェクトに関する文献や資料

の紹介を詳細に行った。

第 1 章では, DIOS というプロジェクトにつながる一連の技術の流れを紹介する. そのために第 1 章第 1 節では, DIOS 開始前に世界の鉄鋼産業において溶融還元製鉄はどのように評価されていたのか, また日本ではどうであったのか概観し, それを前史としてまとめる. 第 2 節では, DIOS プロジェクトの技術内容や推進過程を詳細に記述する.

第 2 章では, 本稿の課題である「技術選択」が単に技術上の良し悪しや, 経済合理性だけで決定しないことを立証するために, 当時の鉄鋼業を取り巻く社会経済情勢や既存の対抗技術(高炉技術)についての分析を行う. 特に, 序章及び第 1 章で述べた DIOS に関する当時の期待感やプロジェクト完了後における高い技術評価にもかかわらず, DIOS が実用化に至らなかった理由を, 外部環境と技術環境の二つの側面から考察する. 外部環境においては主に 2 度のオイルショックと 1985 年のプラザ合意およびバブル崩壊後の円高の進行を取り上げた. このような社会経済環境の変化に日本の鉄鋼業界がどのように対応したのかに関して 1987 年と 1993 年の鉄鋼合理化計画がどのように行われていたのか比較することで提示する. 技術環境の変化に関しては, 1980 年代半ばから 1990 年代半ばにかけて生じた高炉の課題に対する高炉技術の改善努力を考察する. 特に資源制約およびコークス炉寿命到来に対応するために行われた技術開発として, PCI の導入および SCOPE21 研究開発を取り上げて考察する.

終章では, DIOS プロジェクトが企画された理由を確認し, 「DIOS の誕生, 高炉技術の改良

改善の発展、鉄鋼合理化計画の推進」という 3 つに分けて DIOS の実用化が見送られていく過程を要約する。この三つを用いて DIOS 技術が選択されず、高炉技術が主流を担い続けることになった理由を解明する。最後に、理論的考察と結論を導出する。

第 1 章 日本における溶融還元製鉄技術研究開発の背景と歴史

本論文は、DIOS という有望な新技術の開発が進められたにもかかわらず、実用化に至らず、高炉が製鉄の主流技術として継続的に使用される理由は何かを明らかにすることである。そのため、DIOS とはどのようなプロジェクトであったのかを分析する。

本章では、DIOS というプロジェクトにつながる一連の技術の流れを見る。第 1 節では、1970 年代後半から国内外の鉄鋼産業において脱高炉製鉄法が脚光を浴びるようになり、そこから DIOS プロジェクトが必然的に生まれたことを示す。また第 2 節では、同プロジェクトの推進者が、同技術が次世代の製鉄技術を担うものと確信して積極的に取り組んでいたことを説明する。さらに、プロジェクト終了時点で DIOS 大きな可能性を秘めた技術として捉えられており、現在一般に言われているような「失敗のプロジェクト」ではなかったことを確認する。

第1節 DIOS 前史

1. 高炉を使わない製鉄法

日本を含む世界の鉄鋼業界において高炉を使わない製鉄法の研究開発は、最近始まったわけではない。溶融還元製鉄法でいうと、その最も古いものとされるのは、1930 年代にロー

タリーキルンを利用し、小規模に実施された Basset 法や Stürzelberg 法がある [樋谷, et al., 1983]. 日本で高炉を使わない技術として、熔融還元製鉄法が注目され始めたのは 1980 年代のことである。それ以前までは熔融還元製鉄法より、直接還元鉄製造法の方がより多く研究開発されていた。直接還元鉄製造法は、天然ガスを分解した還元ガス(水素と一酸化炭素との混合ガス)を用いて、鉄鋼石を個体のまま還元することにより、還元鉄を製造する技術である。この還元鉄は鉄屑と同様に電気炉鋼製造用の鉄源として利用される [藤木, 1982]. しかし、天然ガスはコストが高く、一部の限定された地域でしかメリットを持たないため、石炭を利用する熔融還元製鉄法が注目されるようになった。

本研究では、日本鉄鋼産業における高炉を使わない製鉄法、その中でも、熔融還元製鉄法研究開発の歴史を追う。高炉法は長い鉄鋼製造の歴史の中で目覚ましい発展を遂げてきた。しかしながら、その最も大きな課題である原料の事前処理(焼結・コークス工程)問題、資源制約の問題、操業を柔軟にできない問題などは未解決のまま残されていた¹⁹。その課題を解決すべく、高炉を使わない様々な技術が国や企業を跨いで研究開発された。

DIOS(Direct Iron Ore Smelting)プロジェクトは、日本で熔融還元製鉄法を本格的に研究

¹⁹ 日本の製鉄所では、必要な全エネルギーのうち、粉状の鉄鉱石を焼き固める焼結製造工程で約 10%、高品質の粘結炭を使用するコークス製造工程で約 17%を消費する。資源制約の問題と省エネルギーの視点から、世界に豊富に産出する低品質炭と粉状の鉄鉱石を可能な限りそのまま使用できる鉄精錬法の開発が求められていた。

開発するために組織された共同研究事業であり、通商産業省の石炭利用技術振興費補助金を受けて国内鉄鋼大手 8 社、石炭技術研究所および鉄鋼連盟が共同で推進した²⁰。

1980 年以降、日本鉄鋼連盟の機関誌『鉄鋼界』で初めて溶融還元製鉄法に関する記事が記載されたのは 1983 年 6 月のことであった。それは「新製鉄法の開発と展望」というタイトルで、川崎製鉄技術研究所製鉄研究室の槌谷他により書かれたものである。「新製鉄法の開発と展望 [槌谷, et al., 1983]」では 1970 年代の 2 度にわたる石油危機以降製鉄プロセスの見直しが活発化し、省エネルギー、省資源、環境保全の改善を中心とする製鉄工程が注目されていると記述している。その中でも、ほとんどの研究開発が低品質、安価な資源の利用や歩留向上を主体としていることを指摘し、プロセス自身の革新ではないことを問題点としてあげながら、プロセスを革新するような新製鉄技術の一つとして溶融還元製鉄法について述べている。

槌谷他は高炉の問題点として、次の指摘をしている。

高炉はその機能を十分に果たすために、一定粒度範囲で、しかも強度の強いコークスと鉬石を必要としている。したがって、粘結炭のコークス化設備と粉鉬の塊成化設備を必要とし、資源の有効利用、省エネルギー、環境防止設備の面で不経済を生み出している [槌谷, et al., 1983, p. 47]

この記事が書かれてから、『鉄鋼界』には 1984 年 [林, 1984]と 1985 年 [成田, 1985]に続

²⁰ 日本の溶融還元製鉄法共同研究プロジェクトは DIOS または DIOS プロジェクトで表記し、それ以外は、溶融還元製鉄法、溶融還元製鉄技術を使用する。

けて「新技術解説」が新日鐵および神戸製鋼所の研究者により記載された。この三つの記事とも高炉を使わない製鉄技術を話題としており、その中でも溶融還元製鉄法を主要内容としている。特に 1983 年と 1984 年に川崎製鉄と新日鐵の研究者によって書かれた二つの記事では、高炉を代替する技術として溶融還元製鉄法を検討し、世界における同技術の概要および日本鉄鋼各社における同技術の研究開発を紹介している²¹。これらの記事から DIOS プロジェクト開始前から世界の鉄鋼企業において溶融還元技術の研究開発が行われていたことが確認できる。以下に、当時研究開発が行われていた溶融還元製鉄法について簡単に紹介する。

2. 欧米における 1970～1980 年代の溶融還元製鉄技術

1970～1980 年代に欧米の鉄鋼各社で研究開発されていた溶融還元製鉄法を年度順で見ると、1971 年スウェーデン Stora Kopparberg および ASEA による ELRED 法、1972 年スウェーデン Boliden 社による INRED 法、また同年スウェーデンの SKF 社による Plasmasmelt 法、1977 年西ドイツの Korf-stahl および Vöest-Alpine による KR 法(その後 COREX と名称変更)、1970 年代末西ドイツ Krupp 社の COIN 法などがある [ニークビスト, 1986]。これらはい

²¹ 高炉法においては、高炉の熱効率・反応効率を高めるために、鉄鉱石・原料炭はそれぞれ、焼結鉱・塊コークスに加工して使用される。高炉プロセスにおける少ない消費エネルギー、高い生産性は、高品質の焼結鉱・塊コークスに負うところが多い。これは、高品位の鉄鉱石や原料炭ならびに高水準の焼結・コークス技術に基づくもので、中長期的には、これらに依存しない新しい製鉄法の開発が期待される場所である (林, 1984)。

ずれも商用化には至らなかったが、欧米を中心に研究開発されていた溶融還元製鉄法は、日本の鉄鋼業界にも影響を与え、当時の鉄鋼業界では溶融還元製鉄技術は大きな話題の一つであったことが確認できる。

1988 年に DIOS プロジェクトが開始した時期に行われた『鉄鋼界』主催の対談で、当時の川崎製鉄社長の八木は「ヨーロッパでも動き始めていますし、わが国としても急いで取り組む必要があるのではないのでしょうか」と発言していた [日本鉄鋼連盟④, 1988]²²。

溶融還元製鉄への高い関心は当時の国際会議からも伺うことができる。1967 年に設立された国際鉄鋼連盟 (International Iron and Steel Institute: IISI, 現世界鉄鋼協会 World Steel Association) は、創立以来、毎年「年次総会」を開催していた。このシンポジウムでは、毎年テーマを選定し議論や情報交換などを行い、パネル・ディスカッションでは、経済社会環境を含めて鉄鋼産業における重要課題について討論していた。テーマは3～5件が選定されており、その内容が毎年 11 月の『鉄鋼界』に掲載された。創立総会から 2000 年までの各テーマを調べると、1970 年以降、同会議では資源、エネルギー問題がほぼ毎年選ばれていた。また、製鉄技術に焦点を当ててみると、1972 年に技術革新をテーマに大型高炉の最新技術の進歩が取り上げられて以降、1973 年に直接還元技術、1976 年に非粘結炭の製鉄利用、1979 年にコ

²² 通商産業省基礎産業局長 鈴木直道、川崎製鉄社長 八木靖浩による。

ークス・焼結鉱技術, 1985 年にコークス, 石炭, 鉄鋼, 1990 年製鉄関連最新技術, 1993 年鉄鋼最新技術, 1996 年溶鋼製造新技術, 2000 年の高炉・転炉法における新技術が選定されていた。特に 1990 年と 1993 年には, 熔融還元製鉄技術に関する議論が行われ, 同技術が話題になっていたことを示している[鉄鋼界, 各年]。

また, 1990 年から 1995 年にかけて不定期に 5 回の日米熔融還元技術交流会(1990 年と 1991 年にはアメリカのピッツバーグ, 1992 年は日本の東京, 1994 年ピッツバーグ, 1995 年東京)が開催された。出席者は, アメリカ鉄鋼協会から直接製鋼法計画部のプログラム・ディレクターなど, 日本からは日本鉄鋼連盟熔融還元研究開発委員会の委員長や研究部長などであった。同交流会では, 両国が取り組んでいる類似の技術課題に係る研究について情報交換などを行っていた。このように, 熔融還元技術という特定技術に焦点を合わせた日米会議が行われたことから, 同技術が脚光を浴びていたことが確認できる[鉄鋼界, 各年]。

3. 日本における DIOS プロジェクト以前の熔融還元製鉄技術

ここでは 1970 年代から 1980 年代の日本で研究開発された熔融還元製鉄法について紹介する。川崎製鉄では「粉鉱熔融還元精錬法」が研究開発されていた²³。これは, 粉状の鉄鋼

²³ 川崎法(XR:Excellent Kawasaki Smelting Reduction)では, 予備還元鉱石流動層を, 熔融還元には炭材流動層を組み合わせている。熔融還元炉に羽口を二段に設置することが特徴であり, この上下の羽口間距離と上下各羽口から吹き込む微粉炭と O₂リッチ空

石と低品質の一般炭を可能な限りそのまま使用するという考え方に基づいた製鉄法の基本原理を確立したものである。この技術は、鉄だけでなく合金鉄の製造にも応用できる汎用性の高いものであり、1970 年代初頭から川崎製鉄千葉技術研究所に内径 0.4m、炉内有効高さ 2.4m の実験炉を設置して高炉法に代わるフレキシビリティの高い新製鉄プロセスの開発が行われていた [槌谷, et al., 1983]。

日本とスウェーデンの共同研究は、スウェーデンの RIT (Royal Institute of Technology, 王立工科大学) と Swerea MEFOS (北欧鉄鋼共同研究所) が実施した石炭ガス化を目的とした実験研究実績 (実験室規模から 6 トン試験転炉) を踏まえて 1982 年から 1984 年まで行われた。スウェーデン側は鉄浴式石炭ガス化法を、日本側 (神戸製鉄所, 新日鐵, 日本鋼管が参加) は鉄浴式溶融還元法をそれぞれ分担した [日本鉄鋼連盟原料部②, 1988]。このプロジェクトは CIG (Coal Iron Gasification) と名付けられ、日本側はプロセス設計, 主要設備概念設計および経済性の検討を行なった。この作業を通じて、鉄浴式溶融還元法に関する技術の全体像が明らかにされ、この方法が中長期的にみて有力な新製鉄法となる可能性が見出され、その後の研究開発課題が明確化された [林, 1984]。

また、住友金属で開発されていた SC 法は、予備還元にはシャフト炉を、溶融還元には高炉下

気量を変化させることにより炉内状況の調節が容易にできる。なお予備還元鉄は上段羽口から供給される [日本鉄鋼連盟原料部②, 1988]。

部に似たコークス充填層炉を組み合わせたもので、コークスは高炉とは異なり低強度のものが使用できた [日本鉄鋼連盟原料部②, 1988].

それ以外にも熔融還元製鉄とは少し性格は異なるが、神戸製鋼所は高炉を使わない直接還元鉄に関する研究開発を実施していた.

上述のように、欧州、日本において、DIOS プロジェクト開始前から熔融還元製鉄技術について研究開発が行われていた. 日本における研究開発を詳しく見てみると、その研究開発の背景や目標には多くの共通点があった.

川崎製鉄の粉鉱熔融還元精錬法は、省資源、省エネルギーおよび環境保護の観点から、低品質で埋蔵量が多い原料およびエネルギーを加工度の低い状態で使用でき、環境汚染物質を発生しないこと、副生物質が原料やエネルギー源として利用できることなどを目標にしていた [槌谷, et al., 1983]. 一方、CIG は、IEA (International Energy Agency, 国際エネルギー機関) の計画に沿って、鉄鋼業の省エネルギー化を目指した共同研究であった [日本鉄鋼連盟原料部②, 1988]. 高炉法の省エネルギー化という視点から熔融還元製鉄技術が模索されていたことは、川崎製鉄の研究開発目標と一脈相通するものである. 高炉法においては、高炉の熱効率や反応効率を高める目的で鉄鉱石および原料炭をそれぞれ焼結鉱および塊コークスに加工して使用する. 高炉プロセスにおける省エネルギー化と高い生産性は、高品質の焼結鉱や塊コークスに負うところが大きい. もし焼結、コークスの二つの工程を省略し、鉄鉱石や一般炭を粉状の状態で直接使用できれば、省エネルギーと安価な原料の利用が可能に

なるのである [林, 1984]. このように各企業において, 省エネルギーの実現, 低価格, 低品位原料の使用, 環境保護といった共通の目標が追求されており, それは海外の鉄鋼企業においても同様であった.

次に, プロセスの構成にも一連の共通点が見られていた. 川崎製鉄のプロセスは, 流動層型予備還元炉と充填層型溶融還元炉の二つの部分で構成されていた. 粉状の鉄鉱石を直接流動層還元炉で予備還元し, その高温の予備還元鉄石を直接低品質コークスの充填層からなる溶融還元炉の羽口に吹き込んで溶融還元するというものであった [槌谷, et al., 1983].

CIG の場合, 上底吹き転炉を用いた鉄浴の中に, 粉状の半還元鉄, 石炭, 石灰石を炭素と共に直接吹き込み, 約 1,500°C の高温の鉄浴中で, 半還元鉄の最終還元ならびに石炭のガス化および炭素の鉄浴中への溶解が短時間で行われ, 溶銑と副生ガスがつくられる. このように, どちらも予備還元と溶融還元という二つの部分に分けて構成されていたという共通点を持つのである.

表 4 に川崎製鉄と CIG プロジェクト(日本側)の研究開発による溶融還元製鉄技術の特徴を示す. 両法とも, 粉鉄, 粉炭の使用が可能であり, 時間および工程の短縮が図れ, 副生物質の再利用を行い, 環境保護や省エネルギーの面で優れているなどの共通点を持つ.

表 4 川崎製鉄法と CIG の特徴

特徴	川崎製鉄法	CIG
資源の有効利用	① 粉鉱のまま使用,塊成化などの事前工程が不要	① 堅型炉に必要な塊コークスまたはペレット加工が不要で, 粉状の鉄鉱石と石炭が使用可能
工程速度向上	② 塊より粉体の方が単位重量当たりの表面積が大きいので,化学反応や加熱などの時間短縮が可能な上, 品質の均一な生成物が可能	② 高温の鉄浴中の反応速度は極めて大きくコンパクトな反応炉が可能
工程省略	③ 鉄鉱石を焼結鉱などに加工する工程が省略でき,粉状の鉄鉱石をそのまま使用するので省エネルギー型であると同時に, 加工工程に付随する SOX と NOX の発生を抑制可能	③ 堅型炉のような鉱石の軟化・溶融ゾーンが無いので,良好なプロセスの制御が可能
副生ガス発生量低減	④ 溶融還元炉からの高温排ガス中は,大量の CO ガスを含み,予備還元炉で顕熱の回収や CO の再利用が可能	④ 副生ガス発生量の増減,用途に応じたガス組成変更の自由度が大
一般炭使用可能	⑤ 充填層型溶融還元炉の採用により,高炉の半分以下の炉高となり,低強度のコークス使用が可能. また, 送風羽口から粉状一般炭の吹込みができるので,コークス使用量の削減も可能	⑤ 工程内で使用する電力・蒸気・酸素などのユーティリティ使用料は大きい,これらの一次エネルギーは全て一般炭で対応可能

出所: [林, 1984] [槌谷, et al., 1983]をもとに作成

最後に日本で研究開発されていた溶融還元製鉄技術に関する実用化の課題について述

べる。川崎製鉄の場合は, 以下のように指摘されていた。

実用化のための課題は, 収率と品質を確保し, 原単位の低減と安定操業の可能な技術確立することである。そのためには, 予備還元炉および溶融還元炉への鉱石, 炭材, 酸素などの最適な供給, 吹き込み技術および溶融還元炉と予備還元炉の有機的な結合技術が重要である [槌谷, et al., 1983, p. 53]。

一方, CIG も, 以下のように規模拡大とコスト削減などの面で共通する課題を抱えていた。

溶融炉本体についての耐火物およびスケールアップの問題があげられよう。周辺技術としては, 溶融還元炉の高温・含塵ガスからの効率的で経済的な顕熱回収および副生ガスの処理, 回収方法ならびに, 回収蒸気, 副生ガスを動力源とする電力, 酸素の低コスト製造がある [林, 1984, p. 76]。

このように国内外の各企業は, 多くの共通点を持つ溶融還元製鉄技術の研究開発に取り

組んでいた。1988 年, 通商産業省基礎産業局長の畠山襄と溶融還元研究開発委員会委員

長の八木靖浩(川崎製鉄社長, 当時)は, 溶融還元製鉄法に関する対談を行っており, 八木

委員長は以下のように語っていた.

この溶融還元法というのは非常に夢のある開発だと思います. 私どもの千葉製鉄所に玩具みたいな小さな溶融還元炉の試験プラントがありますが, 設備としては結構嵩高いんですよ. これに予備還元の設備を付け加えると数十メートルという高さになりそうです. (中略, 筆者)まともにやっても 1 日 10 トン程度しかできません. ですから, 実際工業ベースに乗せるには日産何百トンの規模にまで行かないと物になりませんので, あれはまだ試験管みたいなものです. (中略, 筆者)各社独自の方式を提案されていますが, 考えは同じです. 要するにわざわざコークスを作らずに生の石炭を使い, 鉄鉱石も直に粉鉱を入れて銑鉄を製造しようというわけです. したがって, 溶融還元はイニシャル・コスト的にも, ランニング・コスト的にも確かに面白いといえますが, ただ, 現在の高炉法のように技術的に完全に確立されたところまで行くには, スケールアップだけでも簡単にはいかない. しかし, 長い間の高炉法に対する一つの挑戦という意味で非常に面白い. それだけに技術的に夢のある開発ではないかと今から楽しみにしているんです. 勿論, 開発ですから思わぬ問題が起こってくるとは思いますが, だからこそ開発の意義があるわけです. [日本鉄鋼連盟①, 1988, p. 3]

また, 甲斐幹(日本鋼管社長, 当時)は 1988 年の日本鉄鋼連盟の社長座談会で, 「溶融還元については, あまりにも物が大きいので, ある意味で共同研究というスタイルで取り組んだほうが効率的だと思います. とにかく研究の話題には事欠かないんじゃないでしょうか [日本鉄鋼連盟③, 1988, p. 9]」と述べていた.

それまで日本鉄鋼連盟と石炭エネルギーセンターによる銑鉄技術の共同研究事業としては, 「連続式成型コークス(FCP)」の実績があったが, 同研究は昭和 53 (1978) 年から 9 年間にわたり研究開発が進められ, 昭和 61 (1986) 年度末に終了した. これに引き続く溶融還元製鉄法の開発計画は, 昭和 63 (1988) 年度より 3 年間の予定で予想技術の研究を進め, その上

で日産数百トン規模のパイロットプラントを建設し、操業試験を行うものであった〔日本鉄鋼連盟②, 1988〕.

以上のように、1970 年代から 1980 年代には多くの国、企業において脱高炉技術の開発が行われていた。日本国内の高炉会社も溶融還元製鉄技術の開発を実施していた。本章で取り上げた川崎製鉄による粉鉱溶融還元精錬法や日本企業3社(新日鐵, 神戸製鋼所, 日本鋼管)がスウェーデンと共同で開発した CIG, 住友金属の SC 法以外にも多くの研究が行われていた。

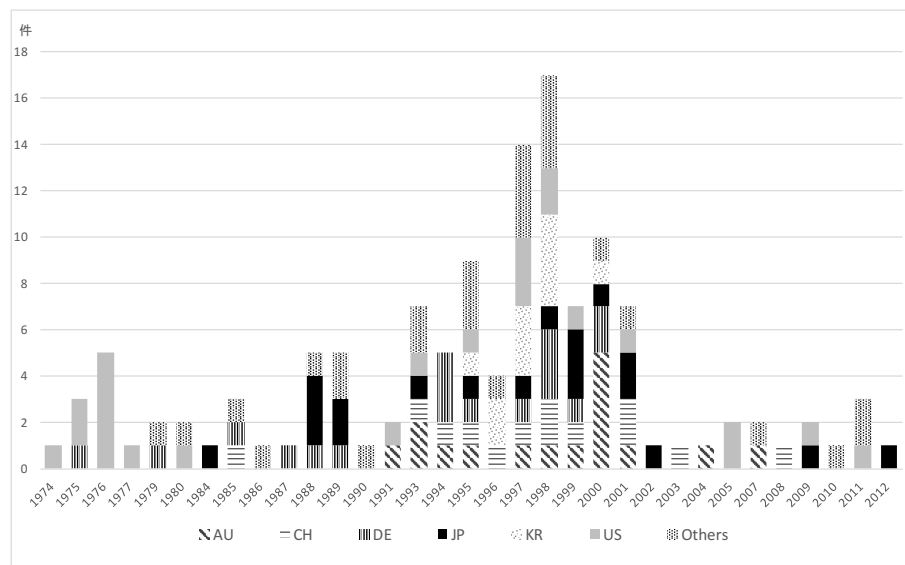
4. 特許出願数で見た溶融還元製鉄法

当時の溶融還元製鉄技術の研究開発がどの程度注目されていたかは、同技術に関する特許出願件数を調べることによって部分的に確認することができる。溶融還元製鉄の特許出願件数を確認するために、DIOS プロジェクトで出された特許権を確認し、IPC (International Patent Classification, 国際特許分類)を特定し、それを含む特許出願データを収集した²⁴。その中から、「溶鉱炉によらない銑鉄の製造 (IPC:C21B11/00)」を含む特許を選出し、出願年と出願国で示したものが図 3 である。

²⁴ DIOS の特許 (IPC): B65G54/04 (パイプまたはチューブを通して、物質を気力でバラ輸送するもの; エアスライド), C21B11/00 (溶鉱炉によらない銑鉄の製造), C21B11/02 (低シャフト炉によるもの), C21B13/00 (直接法による海綿鉄または溶鋼の製造), F27B15/02 (流動層炉の特有の細部, 付属物または装置), F27B15/10 (空気またはガス供給装置の配置)

図 3 から分かるように、溶鉱炉によらない銑鉄製造技術の特許出願数は 1974 年からアメリカで少しずつ現れ、1998 年まで増え続けたが、その後急激に減少した。件数で言えば、アメリカ 24 件、日本 19 件、ドイツ 17 件、オーストラリア 16 件、中国 13 件、韓国(韓国&オーストラリアを含む)11 件である(件数が多い順)。出願が 1990 年代半ばから 2000 年代初頭に集中しているのは、日本同様他国も、この同時期に同様の研究開発が活発に行われていたと推測できる。

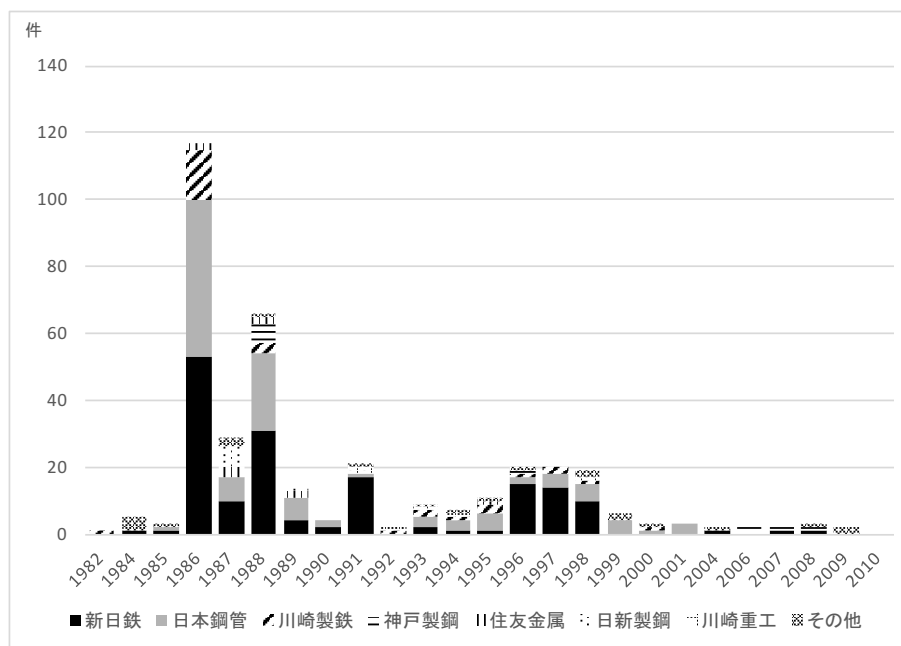
図 3 溶融還元製鉄に関する特許出願件数(アメリカ特許庁)



データ出所: Thomson Innovation, 2015. 7. 8 確認, アメリカ特許庁に出願された, IPC C21B11/00 を含む特許. 総 129 件. 出願年 1971.01.01~2013.01.01.

それでは, 日本特許庁に出願された特許はどのような様相を見せていただろうか. 図 4 は, 図 3 と同様, IPC で Thomson Innovation のデータを使って日本特許庁に出願された特許件数を調べたものである. このグラフから, 1980 年代中期から 1990 年代初頭にかけて日本特許庁に溶鉱炉によらない銑鉄の製造技術 (IPC:C21B11/00) の特許申請が急増していることが分かる. この時期は, DIOS プロジェクトが開始される直前 (DIOS:1988~1996 年) であり, 日本国内において関連技術への関心が高いものであったことを示す. 特に, 新日鐵と日本鋼管の特許件数が非常に多かったのは, その後に DIOS プロジェクトの幹事会社が日本鋼管, その後のナショナルプロジェクトである SCOPE21 の幹事会社が新日鐵であることから, 製銑技術のナショナルプロジェクトのその後の展開に影響を与えたと考えられる.

図 4 溶融還元製鉄に関する特許出願件数合計(日本特許庁)



データ出所: Thomson Innovation, 2015. 7. 8 確認, 日本特許庁に出願された, IPC C21B11/00 を含む特許. 総 129 件. 出願年 1971.01.01~2013.01.01, 全 372 件

また, 日本特許庁に出願された溶鉱炉によらない銑鉄の製造技術を出願国別(筆頭権利者国県コード基準)でみると, 日本 360 件, オーストラリア 7 件, ドイツ 3 件, 韓国とスウェーデンが各1件であった.

5. まとめ

以上, 1970~1980 年代に高炉を使用しない製銑技術に対する関心が高まったことを文献および特許権出願数などの資料により確認した. 日本国内でも各企業により多くの研究開発

が行われ、その技術内容は類似するところが多く存在していた。このことにより、スケールアップやコスト削減の面で研究開発が行き詰っていた同技術の研究開発を共同プロジェクトとして発展させていくようになったのである。

その結果が 1988 から開始した溶融還元製鉄技術の共同研究プロジェクト DIOS である。同プロジェクトは、高炉技術の課題を解決するものであり、安価な石炭を使用し、また鉄鉱石のまま利用できるという意味で銑鉄製造コストが大幅に削減できる上に、生産弾力性にも優れていることから、夢の次世代製鉄技術と言われていた。本章で確認したように、DIOS プロジェクトが日本のナショナルプロジェクトとして推進されたことは、国内外の鉄鋼産業の技術研究開発の動向から見て必然的なものであったと考えられる。このような背景により、DIOS プロジェクトは、日本鉄鋼産業における重要な技術開発案件として、総額約 130 億円（その後 150 億円に増額）、うち最初の要素開発の段階が約 30 億円でスタートした。

第 2 節 DIOS 小史

日本鉄鋼連盟は 1988 年度より 8 年間の計画で通商産業省の石炭利用技術振興費補助金を受け（補助率 2/3）、高炉 8 社（川崎製鉄、神戸製鋼所、合同製鉄、新日鐵、住友金属工業、中山製鋼所、日新製鋼、NKK）の参加により「石炭直接利用製鉄技術」（日本鉄鋼連盟内の呼称）、別称「新溶融還元法」（DIOS: Direct Iron Ore Smelting）の共同研究を開始した。研究の推進母体は 1989 年発足した「溶融還元研究開発委員会」（初代委員長：八木川崎製鉄

社長)である。本章では開発の背景、開発の経緯、そして研究開発終了までの歴史を鉄鋼連盟の月刊誌『鉄鋼界』で公開された情報を中心に調査を行った。それ以外に、鉄鋼協会の学術雑誌である『鉄と鋼』、鉄鋼協会の講演集『材料とプロセス』など学術誌および各企業の技報などの文献を参考にした。DIOS プロジェクトを主導し、各種イベントや報告を記述していた『鉄鋼界』の記事を追跡することにより、DIOS プロジェクトの全対象を把握することが可能となる。一方、学術誌や技報による文献は、技術的内容が中心になっており、その技術が研究開発された背景や過程に関して確認することは困難であるが、『鉄鋼界』で確認できない技術的詳細を見ることができる。本章では、なるべく当時の資料に基づいて、当時の姿が把握できるように、当事者の人名や企業名、肩書きなどを表記し、組織活動の詳細や技術の詳細も含めることを試みた。このことによって、筆者が同技術プロジェクトを調査するにあたって直面した資料入手やインタビュー調査の難しさを踏まえて、今後筆者を含む同技術を調査する研究者が各企業や機関にアプローチする時に少しでも手がかりになることを期待する。

本章での考察によって、DIOS の全体像を確認し、当事者にとっては溶融還元製鉄技術が将来の製鉄技術を担うものとして大きな技術的可能性と期待の下で行われていたことを明らかにする。

1. 開発の背景

溶融還元製鉄の研究開発が行われるようになるまでは①様々な外部要因(第2章第1節

参照)が影響を及ぼしていたが、前節の「DIOS 前史」で少し触れたように②既存の製鉄技術が抱えていた問題も大きな要因の一つであった。ここにその詳細を概略する。

1988 年当時、コークス炉は、「高炉による製鉄法の最大の癌」ともいわれ、大きな課題となっていた [日本鉄鋼連盟⑤, 1988]。製鉄法の主流は高炉法であり、大量生産方式の効率化を追求した結果、その規模がますます大型化し、1980 年代以降は高炉 1 基で 1 万トン/日の生産量に至っていた。しかし、高炉法は固体とガスの交流移動層反応装置(シャフト炉)であり、通気性確保のためにコークスと焼結鉱(30%位までの塊鉱石)を使用するので、①高炉本体以外にコークス、焼結の両工場が必要である。それに加え、②コークス製造には強粘結炭(高品位の原料炭)を必要とするなどの資源的制約も存在する。また、③生産量の大幅な調整や休止、再開が難しいことも高炉が抱える大きな課題の一つであった [日本鉄鋼連盟 原料部②, 1988]。1980 年代頃には更に、日本鉄鋼業界を悩ませる新たな問題が発生しつつあった。それは、④コークス炉の設備寿命が約 30 年で、そのリプレースに莫大な設備投資が予想されていたことであった。「何とか今のコークス炉の寿命が来る前に」という危機感に切迫していた時期でもあった [日本鉄鋼連盟⑤, 1988]。

そのため、コークスを使用せずに銑鉄を作ろうという発想で考案されたものが熔融還元製鉄法であった。焼結工場とコークス工場が不要で、一般炭を使用でき、生産調整が容易で、小規模でも経済的な製鉄法の開発が注目されるようになったのである。

また、日本経済の構造変化が進み、中長期的にみて鉄鋼生産拡大は難しいと想定され、

日本鉄鋼業の国際競争力を確保していく上からも、10年後の製鉄設備のリブレース時期には、高炉法に競争できる新製鉄法の開発・実用化が強く期待されていたのである〔日本鉄鋼連盟原料部②, 1988〕。1989年1月の鉄鋼界新年社長座談会で甲斐幹日新製鋼社長(当時)は、コークス炉や焼結炉の展望と当時の状況について以下のように述べていた。

今から10年か12～13年しますと、コークス炉の寿命が来るように思います。ちょうど2000年ごろになるでしょう。その時、コークス炉を作るとなると大変お金がかかるし、本当に大丈夫かなあという感じがいたします。また、焼結設備にしても、あれが高炉を発展させたことは事実ですけども、いつまでも焼結でやっていかなければいけないものか、ペレットをうまく使うようなことはできないのかと思ってみたりするわけです。そうすると、熔融還元をある程度活用できるようになるのではないかと。相当お金はかかるが、これはどうしても日本としては避けて通れない。何とかしてプロセスを開発していかなければいけないのではないかという思いがこのごろ非常に強いわけです〔日本鉄鋼連盟, 1989, p. 10〕。

コークス炉や焼結炉の寿命問題は、当時の設備エイジ・ストラクチャーを見れば容易に理解することができる。

表5～7は、1989年末のコークス炉、焼結炉、高炉のエイジ・ストラクチャーを示す。当時、コークス炉の寿命は35年と考えられていたため、コークス炉設備能力は2000年まで対応可能であるが、2005年以降は能力不足になると考えられていた。すなわち、15年以内に、コークス炉の設備更新が必要となり、巨額の投資が見込まれ、柔軟な生産構造を実現可能とする投資・開発が避けられないと考えられていた。つまり、2005年までに、熔融還元炉方式の開発を完成させ、高炉用コークス量の消費を2,600万トン程度とすることが望まれていたのである〔足立, 1989〕。

表 5 エイジ・ストラクチャー①コークス炉(製鉄会社分のみ)(1989 年末)

経過年数 (年)	公称能力 (t/d)	炉団 数
0～9	8,793	5
10～19	75,879	31
20 以上	23,998	13
計	108,670	49

出所: [足立, 1989, p. 39]

表 6 エイジ・ストラクチャー②焼結炉

経過年数(年)	有効面積(m ²)	基 数
0～9	2,701	8
10～19	6,237	22
20 以上	627	4
計	9,565	34

出所: [足立, 1989, p. 39]

表 7 エイジ・ストラクチャー③高炉

経過年数(年)	内容積(m ³)	基数
0～4	45,114	14
5～9	45,772	16
10 以上	23,754	7
計	114,640	37

出所: [足立, 1989, p. 39]

なぜ溶融還元技術だったかという点、同技術の反応論的な有利性、従来の固体還元速度よりも一桁上の反応速度であることが解明されていたためである(表 4, 本稿 p.44 参照)。また、転炉を使用した製鋼反応の中で熱バランスを調整するために、冷却剤として鉄鉱石を入れており、炉の操業で溶融還元、すなわち鉄石から直接鋼までの工程が十分成り立つことが経験されていた。したがって、ある鉄浴という反応の場を使って鉄石から溶銑を作ることが可能であることが既に判明していた。それ故、実操業規模での溶融還元をベースにした製鉄法は可能との考え方から、日本でも溶融還元法の研究開発に踏み出せる技術的背景が存在していたのである [木村, 1989]。

2. プロジェクトのはじまり

1987 年から DIOS 法の共同研究開発が少しずつ具体化し始めた。溶融還元プロセスは次世代技術として大きな可能性を秘めており、弾力的な操業ができることから、需給変動と多様な最終製品ニーズへ対応する圧延、加工部門への鉄源供給設備として有利性を持ち、さらに安価な粉鉱、一般炭が直接使用できるとの見通しが出てきたのである。また、中小高炉リプレース時の高炉代替設備としての可能性もあり、1990 年に実用化可能と期待されていた。それ故、最初は高炉溶銑の補完的役割として小型炉を稼働させ、21 世紀に入って徐々に大型化し、最終的には高炉を代替する可能性があると言目されていた [戸田, 1987]。

こうして、1988 年から DIOS プロジェクトが本格的に始まった。共同プロジェクトの形態を取ったのは、主に二つの理由があった。まず、資金の問題があった。第 1 章第 1 節の DIOS 前史で述べたように、共同研究の前から各企業は技術開発を実施しており、設備の形状は異なるものの、その目的や理論、技術的特徴などが類似していた。各企業は、自社で開発の方向づけをしたとしても、実用化に向けて実証プラントを建設し、種々の研究課題を解決するために巨額な資金が必要であった。特に、1980 年代初頭から半ばにかけては円高の影響で鉄鋼需要が減少し、鉄鋼業界は不況状態であったため、多額の投資を必要とするリスクの高い新技術研究開発は一企業では困難と判断されたのである [日本鉄鋼連盟①, 1988]。次に、溶融還元製鉄技術とは、溶銑を作る製鉄業の根幹技術である。この考えから、日本鉄鋼業界は、最初から大量生産を前提に、高炉代替技術として考えていたため、国をあげて取り組む共同

研究にする必要があると判断した。そのため技術調査に莫大な費用がかかり、また様々な知見と広範な知識を構築する必要があることは明らかであった [木村, 1989]。これらの理由から、日本鉄鋼業界は一つのナショナルプロジェクトとして溶融還元製鉄技術の研究開発を進める必要があると結論づけたのである。

3. 開発目標

プロジェクト開始当時の目的は、実機の概念設計とフィジビリティスタディー (Feasibility Study; FS) であった。そのためにはパイロットプラント (Pilot Plant)²⁵ による研究と、バックアップ研究が必要であった。製鉄所は立地条件によりエネルギーや原料などが相異し、操業条件も異なることから、数モデルを考えて概念設計と FS を行う必要があった。研究は、規模と反応に分けて、各社が分担して行った。そのため、要素研究の次にパイロット形態研究、バックアップ研究が計画されたのである [木村, 1989]。

初期段階の実機設備は、高炉の当時の平均規模 5,000 トン/日で計画され、一般炭を使用し、鉄鉱石も直接装入できるため、操業費が現行高炉法に比べて 10～15%程度安くなるとシミュレーションされていた。パイロットプラントの規模はスケールアップを考慮してその 10 分の1、すなわち 500 トン/日程度で検討されていた。

²⁵ パイロットプラント (Pilot Plant) とは、実機とベンチ (Bench Scale Plant) の中間規模の設備設備をいう。

DIOS プロジェクトの最終目的は、実機のプロトタイプおよび FS であったが、当初から同研究開発結果に対する期待は高かった。研究部長だった木村は次の様に述べていた。

当然われわれは FS を行っていくわけですが、今まで要素研究、その他で調査した結果では、これはフィージブルになるという期待がわれわれの中では非常に強い。もちろん、いろいろ詰めなければならない点はありますけれども、要素研究の結果もどんどんいい方になってきて、とにかく致命的にだめだという話はないのですから……。そういう意味では、非常に明るい話だと思っております。プロセス自身成立する見込みは非常に強くなってきたと言えます [木村, 1989, p. 48]

しかし、コークス炉は、高炉に供給する役割以外にも、コークス・ガス発生源としての役割も果たしており、コークス炉を省略した製鋼法の開発のみでは問題解決にならないと判断されていた。一貫製鉄所においては、ガス利用も含めたトータル・バランスで、最も経済的なコストで生産を行う必要があった [足立, 1989]。

4. 組織構成

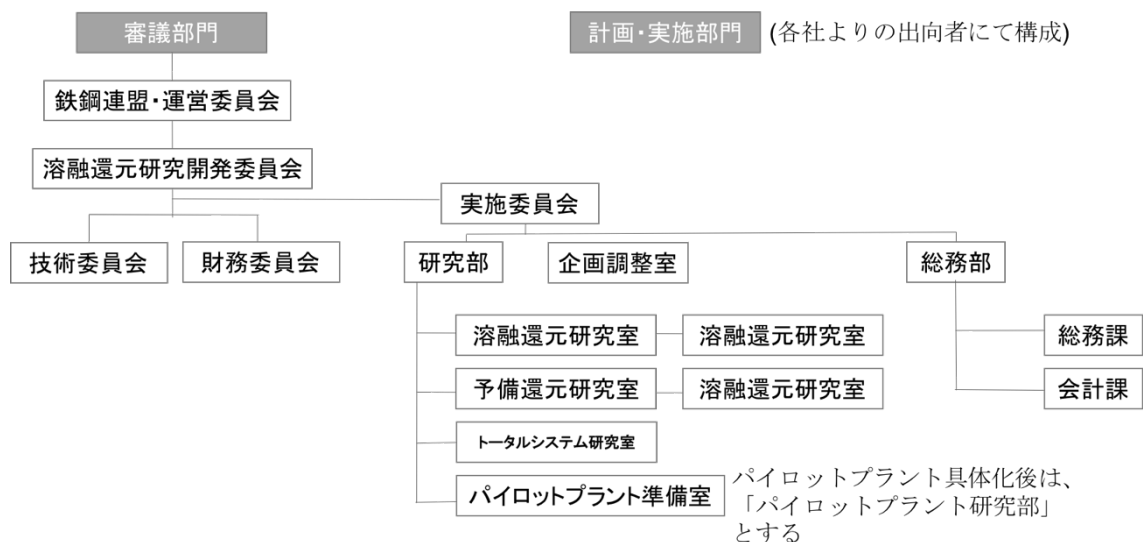
DIOS プロジェクトは、1988 年1月、日本鉄鋼連盟・運営委員会において鉄鋼連盟内に共同研究組織の母体となる「溶融還元研究開発委員会」(初代委員長:八木靖浩川崎製鉄社長、当時)の設置が承認され、同年度に本格的活動開始に向けて、検討が始まった。予算総額は、約 130 億円、そのうち要素開発は約 30 億円であった。初代委員長の八木靖浩川崎製鉄社長(当時)は以下の通り委員会の独立性が重要であることを述べた [日本鉄鋼連盟①, 1988]。

各社独自の方式を提案されていますが、考えは同じです。要するにわざわざコークスを作らずに生の石炭を使い、鉄鉱石も直ぐに粉更を入れて銑鉄を製造しようというわ

けです。(中略, 筆者) 確かにまだどれが一番いいかという事もわかりませんし, しかもパイロットプラントを一体何トンにするか, 要素研究によって決まってくる問題もありましよう。パイロットプラントの規模を一度に何十倍に大きくするのはやはり難しいですから, 今回どうなりますか。また, 従来の高炉法の操業技術をベースとした判断も必要になってくると思います。とにかく技術のスタッフの皆さんには, 各社の政策という立場ではなく, 本音で技術上の議論をしていただければ, 代替落ち着くところへ落ち着くと思いますよ [日本鉄鋼連盟①, 1988, p. 4].

図 5 は DIOS プロジェクトの研究開発組織である。研究開発委員会には, その下部機構として, 審議部門としての技術委員会および財務委員会, 実施部門としての実施委員会が設置された。実施部門には, 川崎製鉄, 神戸製鋼所, 合同製鉄, 新日鐵, 住友金属工業, 中山製鋼所, 日新製鋼, 日本鋼管の国内鉄鋼 8 社が参加した。

図 5 研究開発組織(1988 年 4 月)



出所: [日本鉄鋼連盟 原料部①, 1988]

研究開発委員会は、溶融還元製鉄技術の研究開発に関する業務を統括する役割を担っ

ていた。委員会別の委員長と役割を表 8、実施委員会の室別役割を表 9 にまとめた。

表 8 DIOS 研究開発委員会の委員会別役割

	委員長(所属)	役割
技術委員会	中川一 (新日鐵常務取締役)	・研究開発委員会を補佐 ・研究開発委員会の諮問事項の審議, 答申 ・事業の計画・推進, 成果の評価などに関して, 実施委員長からの提案を審議・調整
財務委員会	廣瀬幸敏 (神戸製鋼所常務取締役)	・研究開発委員会を補佐 ・研究開発委員会の諮問事項の審議, 答申 ・経理処理, 資金計画, 決算に関して, 実施委員長からの提案の審議, 調整
実施委員会	竹内久彌 (住友金属工業常務取締役)	・共同研究参加会社からの出向者によって構成 ・研究計画の立案・研究の調整, 評価 ・共同研究参加会社のうち研究実施会社の研究実施部門と協働して研究を遂行

出所: [日本鉄鋼連盟 原料部①, 1988]より筆者金作成

表 9 DIOS 実施委員会の室別役割

	役割
研究部長	研究全体の統括
企画調整室	全体計画の立案, パイロットプラント・イメージの検討, 調整業務
溶融還元研究室	溶融還元(含炭材流動層)研究の立案, 調整および評価
予備還元研究室	予備還元(含石炭乾留)研究の立案, 調整および評価
トータルシステム研究室	シミュレーション, 情報管理
パイロットプラント準備室	要素研究設備のチェック, パイロットプラント設備検討(パイロットプラント具体化後は, パイロットプラント研究部とする予定)

出所: [日本鉄鋼連盟 原料部①, 1988]より筆者金作成

このほかに研究部は、研究実施機関として現地研究室を持ち、1988 年 4 月時点で、予備還元の研究は千葉、溶融還元の研究は炭材流動層を研究する千葉、大型鉄浴炉を研究する堺、プロセス改善研究としての鹿島および上下一貫プロセスを研究する福山の各製鉄所に設置が計画された。これら現地研究室長には、研究部の予備還元、溶融還元研究室の室員となり、現地研究実施部門と密接な連携を持って研究を推進した。

要素研究を踏まえたトータルシステムは、各実験を依頼した部署から出てくるデータをもとに、全体系としての組み上げを検討することであり、これは DIOS チーム内部の研究部が行った [木村, 1989]。

特に研究部門を出向者で構成したこと的主要狙いは、八木靖浩委員長が述べた通り、出身会社の枠を超えて、純粋に技術的な観点から検討を十分に加え、より良いプロセスを構築することであった [日本鉄鋼連盟 原料部①, 1988]。

溶融還元製鉄技術の研究は、DIOS 委員会のみではなく、他の研究会においても関連研究が行われた。1990 年 6 月通産省は、鉄鋼設備を更新する際の新設備技術導入の可能性や既存設備の最適メンテナンス対策を確立することを目的に、同省基礎産業局製鉄課長の諮問機関として「鉄鋼設備技術研究会」を 7 月末に発足させることを決定した。6 月 15 日には、参加各社(高炉大手 6 社、特殊鋼、普通鋼電炉メーカー 10 数社および日本鉄鋼連盟、日本鉄鋼協会、金属系材料研究開発センターの関係 3 団体)は現状の問題点を集約することを目的に第 1 回準備会を開催した。第 2 回準備会は、7 月上旬に開かれ、その後の検討内容

をとりまとめた。

この研究会設置の背景には、鉄鋼業がコークス炉、連铸、圧延機械等の設備更新時期を迎えていたことがあった。1970 年と 1971 年に導入した設備の一部は老朽化にも拘わらず、円高不況で、部分改修にとどまった。このため新旧設備が混在し、短時間に、効率的かつ生産ラインを止めずに補修するメンテナンスおよび延命化技術の確立が最重要課題となっていた。研究会は通産省と鉄鋼業界が進めてきた一連の研究体制（ファインスティール化、FMS 化、溶融還元製鉄法、AI 化等の新製鉄技術開発）の一環として取り組むものであった。同研究会の製鉄分野で、コークス炉や焼結炉、および高炉設備の延命化対策など、さらに製鋼分野では、電気炉を主体にした既存設備の延命化、メンテナンスなど設備毎に共通する課題についても検討が行われた〔日本鉄鋼連盟②, 1990〕。

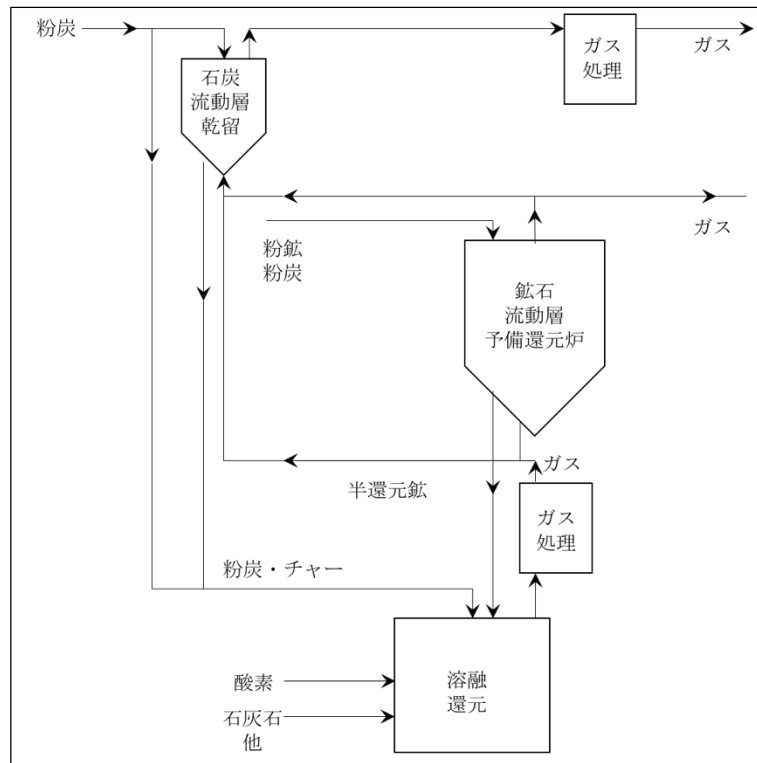
5. 開発経緯

5. 1. 研究設計

DIOS の研究開発は最初 7 年計画で開始された。概念設計と FS のため、前半の 3 年間は要素研究、後半の 4 年間がパイロット設計研究で構成されていた。

各企業は、DIOS 共同研究が始まる前から技術開発を行っていた。各企業における研究を踏まえて、共同委員会が最初に構想したのが図 6 の溶融還元製鉄法基本フロー（1988 年 4 月当時）であった。

図 6 溶融還元製鉄法の基本フロー(1988 年 4 月)



出所: [日本鉄鋼連盟 原料部②, 1988, p. 20]

基本フローは、溶融還元炉、予備還元炉、および石炭乾留炉で構成されるシステムが特徴であった。溶融還元炉の形式は鉄浴と炭材流動層を並行研究することになった。予備還元炉と石炭乾留炉はいずれも安価な微粉鉬と微粉炭を使用するため流動層方式を採用した。石炭乾留炉は石炭中揮発分の除去とタール等の回収を目的としていた。副次的効果として、多炭種対応を期待していたのである [日本鉄鋼連盟 原料部②, 1988]。

このように DIOS プロジェクトは、各企業が既に行った溶融還元製鉄技術の基礎知識を鉄鋼連盟主導で集約し、共同研究を行ったものである。各企業の技術をもとに研究を進めるた

め、初期段階では、各企業が保有する技術の確認と課題を共有し、最先端技術に基づいて

設計してパイロットプラントを政府の援助のもとで建設することを望んでいたのである。

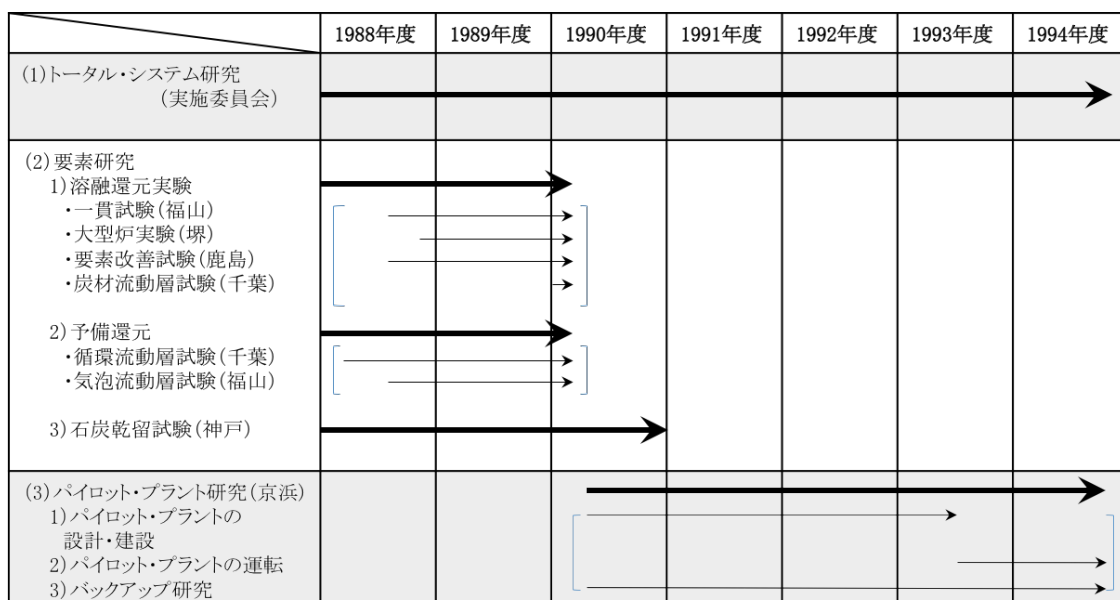
5. 2. 研究推進

DIOS の研究開発は、1988 年開始と同時にトータルシステムの研究を行い、そこで得られ

た成果をもとに各要素技術を参加各社が分担して推進した。図 7 は DIOS プロジェクトのスケ

ジュールである。

図 7 DIOS プロジェクトスケジュール

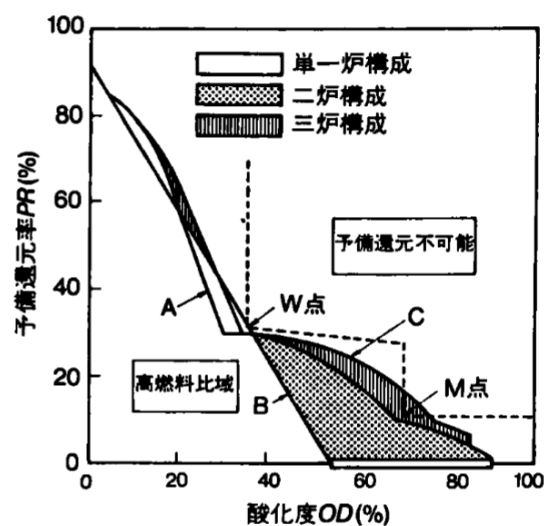


出所:1989 年石炭技術研究発表大会論文集の図を [溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991, p. 56]で引用したものを基に作成

5. 2. 1. トータルシステム研究²⁶

最初のトータルシステム研究では、数学モデルを作成し、物質および熱バランスの計算を行った。この研究は、シミュレーションと情報管理を担当としていたトータルシステム研究室が実施し、研究者は各社からの出向メンバーにより構成されていたので、各社の研究成果をもとに次の段階に進めるための研究であった。図 8 は各社のラボテスト結果を集約したものである。

図 8 低燃料比(800kg/t 以下)の操業成立範囲



出所：[徳田, 1993, p. 43]

²⁶ 以下の記述は、[溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991], [徳田, 1993, p. 43]を参考に行っている。

A 曲線は二次燃焼 (Post Combustion) 後の排ガスによって予備還元炉内で起る還元反応の予想線であり, この曲線より下が可能領域とされた. B 直線はそれぞれの予備還元率を持った還元鉱石を, 溶融還元炉内で石炭原単位 800kg/溶銑 t で溶解可能な限界を示しており, この線より上が可能領域であった. この両者が同時に成立する条件下で, 溶融還元炉と予備還元炉が直結状態で稼働可能になり, 両線で囲まれた部分の条件下で二次燃焼率 5~20%と 35%以上の2カ所が存在する. C 線は溶融還元炉排ガスに石炭粉を吹込み, ガス改質を行った時の関係を示している. ガス改質可能な量だけ A 線を右にずらした形で示され, 成立範囲は拡大している. 予備還元率が 0%であっても二次燃焼率の高いところでは成立の可能性があった. ここで確認された成立範囲のもと以下 3 つの可能な組み合わせが概説された.

① 1 段法

溶融還元炉のみで全てを直結させるものであるが, 二次燃焼率 55%以上のところでのみ成立し得る方法であった. すなわち溶融還元炉で発生する CO ガスを二次燃焼させて CO₂ にし, その時の発生熱を高率で鉱石に伝達する(この時の熱の有効利用率を着熱効率という)場合にのみプロセスは成立すると予想された. したがって, 1段法の主たる課題は高二次燃焼と高着熱効率の同時達成であった.

② 2 段法

溶融還元炉で発生したガスを利用して, 鉱石の予熱と予備還元を行い, 全体の効率向上を図るものである. 二段法では, 溶融還元炉の発生ガス量と予備還元炉の必要ガス量が一致

する必要がある。石炭比 800kg/t 以下の条件で成立する範囲を図 9 に示したが、1 段法に比べ二次燃焼率が下方にずれた領域で成立しうる。また低二次燃焼・高予備還元率の領域にも成立の可能性は残されている。

③ 3 段法

溶融還元炉頂ガス温度は 1,600℃を超えるが、このガスを利用する予備還元炉の必要温度は 800～850℃が最適であり、一致しない。2 段法ではこの顕熱を蒸気で回収するが、3 段法ではガス改質 ($\text{CO}_2 + \text{石炭中揮発分} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) を行い、予備還元率を高めようとするもので、図 8 の A 線をガス改質可能量だけ右方にずらしたことになる。

以上 3 つの基本型をベースとし、二次燃焼 20～60% の範囲で変化させ、操業諸原単位を推算した。また、設計費など固定費も推定して、全コストを試算した。その結果、副産物控除後の溶銑コストは各プロセスとも大差なく、高炉法の 5～10% 削減が期待できた。下工程供給エネルギー量は各プロセスで大きな差があるが、日本の一貫製鉄所では 1～2Gcal/t の範囲にあるので、製銑工程以外は現状のままの形態を踏襲することとすると、2 段法及び 3 段法の二次燃焼 40～60% 程度の操業が下工程へのエネルギー供給上有望な領域となる。

この前提条件で、DIOS プロジェクトは推進することとなった。〔溶融還元研究開発委員会実施委員会, 1991〕

5. 2. 2. 要素研究

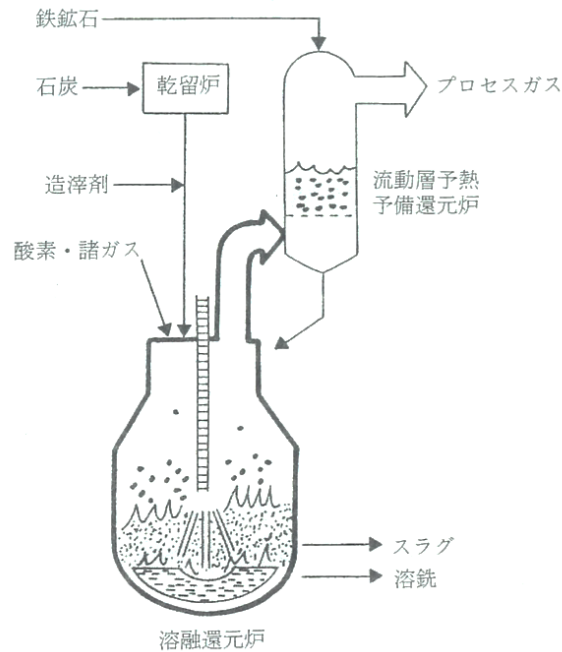
(1) 要素研究の設計²⁷

トータルシステム研究所が行ったシミュレーションをもとに、1988 年 10 月から NKK・福山製鉄所で要素研究が開始した。同年 11 月には住友金属工業・鹿島製鉄所の試験が始まった。また、同年 11 月末には委員会事務局が大手町から九段に移転し、独立した研究プロジェクトとして体制を整えた。実施委員会研究部長だった木村は、「自前の会議室が一室取れたことだけを見ても、このプロジェクトが一つのチームとしてうまく作動している証拠である」と述べている [木村, 1989].

1989 年度は、「要素研究」の公式開始年度として、溶融還元、鉬石予備還元、石炭乾留、およびトータルシステムの各研究が実施された。1989 年 4 月に図 9 で示す DIOS 法の概念図が公開された。

²⁷ 以下の記述は、[木村, 1989]を参考に記述している。

図 9 DIOS 法概念図



出所：[木村, 1989, p. 45]

DIOS プロジェクトは前半の 3 年間に要素研究, 後半の 4 年間にパイロット研究で計画されていた。要素研究では, プロセスを構成する三つの要素(溶融還元炉, 流動層予熱予備還元炉, 乾留炉)を重心に研究が行われた。

第一に, 溶融還元炉の基本的考え方は転炉技術に由来するため, 溶融還元炉は転炉型をしていた。転炉型を採用することによって, 鉄浴の中に鉄鉱石を入れて, 鉄鉱石から直接鉄まで還元が進むことが判明していた。溶融還元製鉄においても同様の反応が起こるとは限らなかったが, 研究を重ねながら改善していくこととした。

第二に、予備還元炉は、「溶銑を作るプロセス」そのものであり、「高炉代替設備」と考えられていたため、図 9 に示す予備還元炉の形状となった。高炉代替の視点からプロセス全体を考える時、単純に溶銑ができるという話ではない。なぜなら、高炉は、溶銑を作ると同時にエネルギーを転換するからである。したがって、溶融還元は「エネルギー面でも高炉に置き代わるもの」でなければならず、単に鉄鉱石を溶かすのみではなく、エネルギーの有効利用も一つの命題であったのである。鉄鉱石を鉄浴の中に入れて還元すれば、鉄浴から莫大なエネルギーが逃げてしまい、エネルギー過剰になる。したがって、その過剰なエネルギーを系内(鉄を還元するプロセスの中)で使い、プロセスの効率を上げると同時に、系外に流出するエネルギーを減らさなければならなかった。そのために図 9 の予備還元炉が生まれたのである。エネルギーをクローズド・サイクルで使う、換言すれば、鉄浴から出てきたガスを予備還元炉の中に入れ、そのガスで鉱石をあらかじめ還元することで、鉄浴の生産性(t/h)も上昇し、効率も上がる。予備還元炉と鉄浴炉との負荷調整によってエネルギーバランスをとり、エネルギー供給能力も高炉に代わり得るものにする考えであった。そこから、予備還元プロセスが必要になったのである。当時、ヨーロッパでも同種の技術開発が行われていたが、この辺の考え方は西ドイツやスウェーデンとは基本的に異っていた。

最後に、乾留炉とは、石炭の処理炉である。鉄鉱石を鉄浴の中で溶かす原料として、炭素と酸素が必要となる。当時炭素を一番手短に入れる方法は石炭であったが、石炭をそのまま入れると鉄浴の中での反応効率が落ちてしまう。そのため、石炭は若干の前処理をした方が、

鉄浴の溶融還元炉の反応を考えると、効率の高い炉になるのである。また、タールの有効利用のためにも乾留炉は必要であった。乾留炉でタールを取り、チャーを鉄浴炉に入れて鉄浴炉の反応効率も上げるプロセスを考えたのである。その後、要素研究を進め操作方法を改善していくと、チャーを使わなくてもかなりの効率まで鉄浴炉内の反応を上げることができることが判明したため、図 9 では乾留炉が若干小さくなっている。

このように、DIOS プロジェクトの要素研究は「高炉を代替するもの」を前提に、「高炉技術で得た技術や知識」を基に行われていた。その後各要素は、トータルシステム研究の結果、表 10 のように、各社が分担して研究を行うこととなった。

表 10 要素研究内容と実施場所

研究内容	実施場所
2段法上下一貫試験	NKK・福山
大型鉄浴溶融還元試験	新日鐵・堺
鉄浴溶融還元高二次燃焼試験	住友金属工業・鹿島
循環流動層予備還元試験および 炭材流動層溶融還元上下直結試験	川崎製鉄・千葉
気泡流動層予備還元試験	NKK・福山
石炭添加ガス改質試験・基礎	神戸製鋼所・神戸
石炭添加ガス改質・大型試験	新日鐵・堺

出所：[溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991]をもとに作成

(2) 要素研究の推進

DIOS の元となる鉄浴炉の中での反応については、それまで各社において研究がかなり進められており、それぞれ実験設備も既に保有していた(第 1 章第 1 節 DIOS 前史参照)。鉄浴に関して実際に実験を行っていたのは NKK・福山製鉄所と新日鐵・広畑製鉄所の小型炉と堺製鉄所の大型炉、住友金属工業・鹿島製鉄所であり、川崎製鉄・千葉製鉄所では炭材流動層という転炉型とは違ったもので熔融還元の実験を実施していた。その中でも、新日鐵・堺製鉄所の大型転炉では、ベンチ、パイロット、実証機とスケールアップに伴い、エンジニアリング上、操業上の問題点の摘出を行った。NKK・福山製鉄所では、気泡型(バブル型)予備還元炉を設置した試験設備を保有していたので鉄浴と予備還元炉を結合した上下一貫の試験を行った。鉄浴だけの単独試験よりはるかに大きな制御要素が加わり、エンジニアリング上、操業上の問題を明確化できた。熔融還元炉試験の重点は、鉄浴炉の効率をいかにあげるかということであった。鉄浴炉の中の効率を上げることは、二次燃焼を行い、二次燃焼から生じた熱を効率良く鉄浴に与える、すなわち高二次燃焼、高着熱操業であり、この操業によって鉄浴炉の効率が決まると考えられた。堺製鉄所では、この高二次燃焼、高着熱操業を、大型炉の問題点として検証し、福山では上下一貫結合の状態で研究した。また、高二次燃焼、高着熱操業は、鉄浴から出る CO ガスをベッセルの中で燃焼させた時の熱を CO₂ ガスとして系外に出さないで、この鉄浴にフィードバックし、そのエネルギーを使って鉄鉱石を溶かすという視点から最適方法を探る必要があった。住友金属工業・鹿島製鉄所では、CO は酸素で燃やす

ために、石炭と酸素をどのように注入するのが高二次燃焼，高着熱操業に最も有利なのか力点を置いて研究を行った。

原料の前処理関係および石炭乾留の研究は神戸製鋼が担当した。

(3) 要素研究の結果²⁸

共同研究 4 年目の 1991 年は、要素研究の結果が順次発表された。

第一に、溶融還元部分の研究を行っていた住友金属工業・鹿島，新日鐵・堺，NKK・福山では、一般炭をそのまま使い，粉鉍はそのまま鉄浴に入れて石炭を燃焼して 90%程度の着熱効率で反応を進めるという当初予想の結果が得られた。また，川崎製鉄・千葉で実施していた炭材流動層方式は鉄浴式と少し異なる流動層で石炭を燃焼する研究を進めた [金森，1991]。溶融還元部分の要素研究は以下の 4 つであった [溶融還元研究開発委員会 実施委員会，1991]。

① 高二次燃焼率と高着熱効率の同時達成

福山では 5 トン浴の上一貫装置を加圧可能なものに改造し，圧力 2kg/cm²G 未満の範囲で試験し，加圧によりガス速度が低下し石炭歩留りが向上するとともに二次燃焼率および

²⁸ 以下の記述は，[金森，1991]，[溶融還元研究開発委員会 実施委員会，1991]を参考に行っている。

着熱効率が向上することを確認した。鹿島では、熔融スラグと石炭との接触を活発化することにより熔融還元反応速度の向上を図る着想で横吹き羽口によるスラブ浴攪拌実験を行った。堺では、熔融還元炉のスケールアップに伴う問題点の摘出と対策を主課題にして、生鉱石による熔融還元単独実験を行った。これら研究の結果、大型化に伴い二次燃焼率の大幅低下が懸念されたが、二次燃焼率および着熱効率ともに低下することもなく操業可能であるとの見通しを得た。

② 連続操業技術

DIOS 法は転炉技術をベースとしているため、出銑・滓作業をどのように行い操業の連続化を図るかが大きな課題であった。福山では高炉法と同様な方式(マッドガン・オープナー方式)による出銑・滓試験を加圧下の上下一貫連続操業中に実施し、出銑・滓量を制御する技術を確立し、長時間連続操業の目処を得た。

③ 一般炭使用技術

高揮発分炭でも高二次燃焼・高着熱効率が確保できており、使用対象と考えられ高揮発分炭は十分利用できる見通しを得た。また後述する石炭添加ガス改質後のチャーを熔融還元で使用するにより、さらに容易に対処できることが明らかとなった。

④ 耐火物損耗および炉体冷却技術

福山、堺および鹿島の鉄浴熔融還元試験では耐火レンガの材質改善に努力したが、損耗が大きく実用上問題であることが明白になった。1990 年度にはこの対策として、レンガの中を

貫通する細管に N_2 ガスを流し、レンガの温度を下げて、損耗を防止する N_2 ガス冷却レンガ試験を行った。結果は良好で、損耗量を数分の1にまで減らすことができた。しかしながら全面採用の場合、多量の N_2 ガスが必要となり、経済性に問題があるため、部分使用に留めるとの結論に達した。引き続き水冷パネルを耐火物替わりに使用する水冷炉体構造の試験が提案され、予備試験を経て、 N_2 冷却レンガと同様に堺の大型炉の一部分に張って実験された。結果は極めて良好なものであったが、損耗失の増大は避けられなかった。

第二に、予備還元部分の要素研究は、川崎製鉄・千葉の炭材流動層溶融還元炉の上部に設置した循環流動層と、NKK・福山の鉄浴溶融還元炉の上部にある気泡流動層とを並行して試験した。ガス発生炉である下部炉の特徴から前者は主に低酸化度域、後者は高酸化度域の試験を行った。パイロットプラントでは両者の特徴を組み合わせ細粒鉱は循環させ、粗粒鉱は気泡流動層となるような複合型とすることにした〔溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991〕。言い換えると、8mm 程度の粗いものから細かいものまで混在した鉄鉱石を、流動状態で予備還元するために、気泡式と循環式で実験し、800℃程度であれば粉鉱石が詰まることなく扱えることがわかった。これを溶融還元炉と接続することで溶融還元炉と一体に運転できることが明らかになった〔金森, 1991〕。以下に、予備還元部分要素研究の成果の概略を記述する〔溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991〕。

① 流動安定化技術

両流動層ともにスティッキングや付着などの流動化トラブルは発生しなかった。鉍石の分級は起るが、この時の挙動を利用して、粗粒と細粒に分け別々に扱う流動層が構築された。

② 還元ガス導入部構造

還元ガス中には $50\sim 100\text{g/Nm}^3$ 程度のダストが含まれているので、導入部のダスト詰まり対策が必要であった。千葉では、操業中に清掃可能な方式を考案し、効果をあげた。福山では水冷プレート型分散板方式が、付着防止に有効であることを確認した。また導入部からの落鉍を防止する条件も数値的に把握することができた。

③ 操業条件変動対応性

溶融還元炉の操業が変動した時も予備還元炉が安定してその変化に追従できるか否かは、全系の安定性に重要である。福山の上一貫試験では出銑・滓作業時の変動に対し、千葉では 10% のガス量を急減時の変動に対して、予備還元炉が全く問題なく安定操業できることを確認した。

④ 原料粒度に対する対応性

粒径 8mm 以下の粒度が使用できれば、輸入鉍石の全銘柄はペレット・フィードとシンターフィードのほぼ全量が使用可能となる。そこで千葉では粒径 5mm 以下、福山では粒径 8mm 以下で試験を行い、使用可能との結論を得た。しかし、還元反応に伴い粉化が進むので歩留り向上のために細粒の捕集効率を上げる必要があった。

第三に、ガス改質研究(乾留炉)である。溶融還元炉の排ガス中に石炭を添加し、その揮発分を CO_2 および H_2O に反応させて、ガスの改質、石炭の乾留およびガス温度の低下を図ろうとするものである。神戸では溶融還元ガスに相当するガスをボンベから供給・混合し、プラズマ・ヒーターで所定の温度に加熱した後、石炭粉を添加し、ガス改質効果を調べる基礎実験を行った。高温の酸化性ガスに吹き込まれた石炭は急速に乾留するため JIS 法の工業分析値で示される揮発値の 1.4 倍程度の揮発分が発生し、短時間(1~2 秒)でガス改質に寄与することを明らかにした。また必要石炭粒度、生成チャーの性状および残留タールなどに対する多くの知見を得た。堺では大型鉄浴炉上部に微粉炭を吹込み、ガス分析、温度測定などの結果からガス改質効果を把握するとともに、石炭吹込みノズルの設計に関する知見を得た[金森, 1991], [溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991]。

最後に、トータルシステムについては、1988 年に主な研究を行い、要素研究で得られた実験結果を取り入れて精度を上げていった。その中で大きな要素は石炭原単位であり、これは溶銑 1 トンに対し石炭をどのくらい使用するか、溶融還元炉の耐火物は溶銑 1 トン当たりどのくらい資金がかかるかということであった。石炭原単位は、当時の研究設備の規模が小さかったこと、あるいは堺の 100 トン浴のように大きくても、実機の目標値に到達することはできなかった。しかしながら、要素研究の条件では、石炭原単位は既に南アフリカ等で実用化されていた。直接還元鉄製造設備である COREX 並み、あるいはそれより大幅に少なくて済む実績が出て

いた。耐火物やそれを支える構造、あるいは冷却の仕組みについても研究を行っていた [金森, 1991]。

5. 2. 3. パイロットプラント研究

DIOS プロジェクトの折り返し点である 1991 年の技術自己評価は極めて高いものであった。当時の実施委員会研究部長であった金森は、『鉄鋼界』とのインタビューで「溶融還元は本当に成功するか、今の段階では、十分実用化できると言えるのか」との質問に対して次の回答をしていた。

研究は既に 3 年経ちましたが、実際に実験を始めたのは 1988 年 10 月ですから、正味の研究期間は 2 年くらいです。1 年半を経たところで、難しい課題が三つないし四つくらい浮き彫りにされてきて、ここ半年くらいでそれらを解決しようとしてきました。課題が絞られて、検討対象がはっきりしてきたということは、研究は非常に順調だと見ていただいていいと思います。もちろん、こういう規模の実験ですから、たくさんの研究者に参加していただいていますし、研究の中身は非常に濃いと思います [日本鉄鋼連盟①, 1991, p. 2]。

また、他国の溶融還元法の研究と比較して、「外国の研究より、一歩先んじている」と述べていた。アメリカは、日本の福山や鹿島と同様の規模の試験を、エネルギー省から補助率 77% 程度の援助を受けて、4 年計画で、総事業費 4,500 万ドルで実施しようとしていた。また、300 トンクラスの転炉を使った大規模な溶融還元の実験も行っていたが、日本と類似した規模の実験であり、日米の研究が一番盛んだと評価していた [金森, 1991]。

このように DIOS プロジェクトは技術的に可能性のあるものとして考えられ、他国に比べても

優れた設備で研究開発を行い評価されていたため、課題の早期解決と実機プラントの実現に対する期待は相当に高いものであった。1991 年から DIOS 委員会の委員長に濤崎忍（川崎製鉄社長）が就任し、次のように述べて DIOS の早期の実用化を望んでいた。

溶融還元製鉄法というのは、省エネルギー、省プロセスであるわけですし、同時に世の中の要求に対して多品種少量生産に対応するユニットとして、非常に将来性のある革新技术であると思っています。したがって、将来の製鉄所の中にはあのような設備が1ユニット、2 ユニットというふうに追加されていく姿になっていくのではないのでしょうか。ですから、なるべく早く開発したいのですが、なかなか簡単には参りませんで、実用化は2000 年になってしまう。これでは、時期が少し遅すぎるのではないかという気がしております。何とかスピードアップしたいと思っております。〔日本鉄鋼連盟①, 1991, p. 2〕

様々な期待の下、1990 年度からはパイロットプラントによる研究が始まり、NKK・京浜製鉄所内に約 500t/日規模の設置が決定された〔日本鉄鋼連盟①, 1990, p. 41〕。同年 7 月には溶融還元プロセスの概念図が新たに公開されたが、それは溶融還元、予備還元、および改質機能で構成されていた。

ベンチ（一部パイロット）スケールで得られた要素研究成果は、①予備還元炉と溶融還元炉の連結を行い、連続 3 日間の操業見通しを得た後に 10 日間の連続操業試験を計画した。②鉄浴式溶融還元は、設備能力 4t/h および 30t/h の溶融還元炉で試験を行い大型化の見通しを得た。③予備還元は、1週間の連続操業を延べ 4 回実施して連続操業が可能との見通しを得た。④ガス改質に関しては、1990 年後半より溶融還元炉排ガスの冷却と鉄鉱石の還元ポテンシャル上昇を同時に行うために実験が計画された。⑤トータルシステム研究は経済性とエネルギーバランスを検討し、コスト削減 10%、エネルギー消費低減 5～10%の可能性が期待さ

れた。エネルギー低減は主としてコークス、焼結工程の省略によるものであった〔日本鉄鋼連盟エネルギー対策委員会省エネルギーWG, 1990〕。粉鉱石は、流動層型予備還元炉において溶融還元炉の発生ガスを用いて 900～1,000℃にて還元率 10～30%で予備還元された後に一般炭と溶融還元炉に投入して溶銑を製造する。反応温度は約 1,500℃で、反応効率を高めるためこの系全体を 1.5～2 気圧に加圧することを考えた〔渋谷, 1990, pp. 34-43〕。

以上の要素研究を踏まえ、1991 年からパイロットプラント設備の設計に入り、1992 年と 1993 年に順次建設が進められた。パイロットプラントは、下部に溶融還元炉を配置し、ガス改質炉に接続し、その上部に予備還元炉を設置する構造であった。福山工場の要素研究設備はこれと似た構成になっていたが、パイロットプラントはこの 5～10 倍の規模になるのでスケールアップは重要な問題であり、要素研究と同じ挙動が可能とは限らなかった。もう一つの問題は長時間の連続運転で、要素研究では数日間しか稼働していなかったが、パイロットプラントでは1ヶ月程度の運転を計画していた。運転時間が短いと物質バランスや熱バランスが正確に把握できない問題があったからである。そこで、プラントを長時間稼働、原燃料や物質の原単位の精度をより高める研究や、設備大型化に係る技術の問題を検証する必要があった。このため、パイロットプラントでは1ヶ月の連続運転を行うことを目標とした。溶融還元法の大きな特徴の一つとして、フレキシブルな操業停止と再稼働が挙げられていたため、パイロットプラントにおいても運転操作容易性と経済性を生かすための研究が必要であった〔金森, 1991〕。

パイロットプラントにおいては、要素研究の各成果をプロセスとして組合せ、スケールアップして連続操業試験を行い、並行して進められるバックアップ研究の知見とも照らし合わせて、実機の概念設計およびフィジビリティスタディー (FS) を行うことであった。

パイロットプラントの初期計画を簡単にまとめると以下の通りである [溶融還元研究開発委員会 実施委員会, 1991, p. 62].

- ①設置場所:NKK・京浜製鉄所
- ②規模:500t/日 (21t/時) (実機の 10 分の 1 規模)
- ③形式:鉄浴溶融還元炉+流動層予備還元炉+鉍石予熱炉+石炭ガス改質炉
全系直結・加圧型(2kg/cm²G 未満). 必要により結合組合せ変更可.
 - a.鉄浴溶融還元炉: 堅型転倒可能(転炉型). 高さ 9.3m.
 - b.予備還元炉: 細粒・粗粒同時処理複合型流動層. 高さ 8~12m.
 - c.出銑・滓設備: マッドガン・オープナー方式
 - d.ダスト回収: ホット・サイクロン
- ⑤試験期間:1993 年度~1994 年度末(竣工:1993 年上期)
- ⑥研究開発費(設備費および試験費):100 億円

1991 年 5 月 21 日には DIOS パイロットプラントの起工式が、プラントが建設される日本鋼管の京浜製鉄所の扇島製鋼工場で行われた。当日には、通商産業省内藤正久基礎産業局長(以下肩書きは全て当時)および深沢資源エネルギー庁次長等、また高木石炭技術研究所理事長、須磨石炭利用総合センター副理事長等、鉄鋼連盟から溶融還元研究開発委員会の濤崎忍委員長(川崎製鉄社長)、三好副委員長(NKK 副社長)、植田連盟副会長を始

め同委員会関係者、NKK 関係者等が多数列席した。式典で、濤崎委員長は、「本日、パイロットプラントの建設に大一步を踏み出すことができたことは、誠に喜ばしい限りであり、これまでの要素研究等が所期の成果を収めたのも参加各社による共同研究の組織体制が大きな力となっている。溶融還元製鉄法は、アメリカ、欧州、オーストラリア等、各国で研究開発を競っているが、21 世紀に高炉法にとって代わることができるかが大きな関心ごとであり、このパイロットプラントの成否が日本の鉄鋼業の将来に与える影響の大きさを考えると、責任の重大さを痛感している」と挨拶した。また、内藤基礎産業局長は、「技術的困難を伴う研究開発を鉄鋼業界が一致団結して、力強く取り組まれていることに感銘を受けている。パイロットプラントによる研究が多大な成果を収め、21 世紀の鉄鋼技術として結実することを強く期待しており、通産省としても可能な限り支援していきたい」と祝辞を述べた。最後には、三好 NKK 副社長が「世界に先駆けてこの研究を完成させるため、今後とも政府の支援を得ながら参加各社の英知を結集していこう」と挨拶した〔日本鉄鋼連盟③, 1991〕。

このように、通商産業省および鉄鋼業界のリーダーが集まった起工式の様子を見ても、DIOS プロジェクトに対する関心がいかに高かったかが分かる。また、日本の鉄鋼業は世界の鉄鋼業をリードしていたこともあり、新技術開発に対しても世界に先駆けようとの意欲が窺われる。

起工式から約 2 年後の 1993 年 9 月 20 日にパイロットプラントの竣工式が行われた²⁹。その予算は 130 億円から 150 億円と 20 億円追加され、研究期間も 7 年から 8 年と 1 年間の延長が発表された。パイロットプラントは、約 70 億円をかけて建設されたもので、商業プロセスの 1/6～1/10 程度の規模となる日産 500 トンの能力を持つものであった。1993 年度下期から 1995 年度にかけて操業試験を行い、その目的は商業プロセスの経済性評価と実機の概念設計に必要な各種の技術データを収集することであった。具体的には、溶融還元炉の耐火物試験操業を 5 炉代・各約 20 日間、一部水冷試験操業を 4 炉代・各約 10 日間行うことであった。1993 年度には、2 炉代(第 1 炉代:1993 年 10～11 月に延べ 20 日間程度、第 2 炉代:1994 年 1 月～2 月に延べ 20 日間程度)にわたって運転し、設備特性の把握と運転の習熟を図るとともに、各操業条件下での技術データ等を得る計画であった。一方、1993 年当時、海外でもアメリカ(AISI 法)、欧州(CCF 法)、オーストラリア(HI smelt)等で独自に溶融還元製鉄法の研究が進められていたが、銑鉄日産能力 500 トンを擁する DIOS のパイロットプラントは世界最大級の規模を誇る研究設備であった。

竣工式は、パイロットプラントが設置された京浜製鉄所現地で行われ、式典には、通商産業省から細川基礎産業局長および市川資源エネルギー庁石炭部部長等、また弓削田石炭利用総合センター理事長、高木石炭技術研究所理事長等が参加した。また鉄鋼連盟からは

²⁹ 以下、竣工式に関しては[日本鉄鋼連盟②, 1993]を参照。

濤崎溶融還元研究開発委員会委員長(川崎製鉄社長)および三好 NKK 社長(同委員会副委員長), その他関係者が多数列席した。式典終了後, 製鉄所のアメニティ・ホールにて竣工式が開かれ, 関係者約 150 名がパイロットプラントの完成を祝った。濤崎委員長が挨拶に立ち, 「パイロットプラントの完成により 21 世紀の夢の製鉄技術に向けて第一歩を踏み出したことになるが, 溶融還元製鉄法の研究は世界各国で行われており, 我が国がこの競争に負けることはできない。参加各社の英知を結集し, 一層強固な協力体制により, 1 日も早く実用化プラントの設計が可能となるよう操業試験を積み重ねて欲しい」と呼びかけた。次いで細川基礎産業局長は「この技術は, 効率的な製鉄法であるとともに, 石炭の有効利用や地球環境問題の解決にもつながるだけに, 通産省としても今後でき得る限りの支援を行なっていきたい」と述べた。続いて, 弓削田石炭利用総合センター理事長の音頭による乾杯ならびに小島溶融還元研究開発委員会・実施委員長によるパイロットプラント設備紹介が行われた。この後さらに委員会 OB として, 初代技術委員長を務めた中川新日鐵・常任顧問および初代実施委員会委員長の竹内イケダ鋼板社長(元住友金属工業常務取締役)からもプロジェクトの成功を祈念する言葉が述べられ, 最後に三好 NKK 社長が「操業試験に際しては, 共同研究各社の力強い協力を得ながら, 当社として全力を挙げて取り組みたい」と挨拶した。

1993 年 10 月 4 日から銑鉄日産 500 トンのパイロット試験が開始された。11 月 30 日まで
の間全部で 15 回チャージの実験が行われ, その中, 11 チャージ目から 15 チャージ目まで

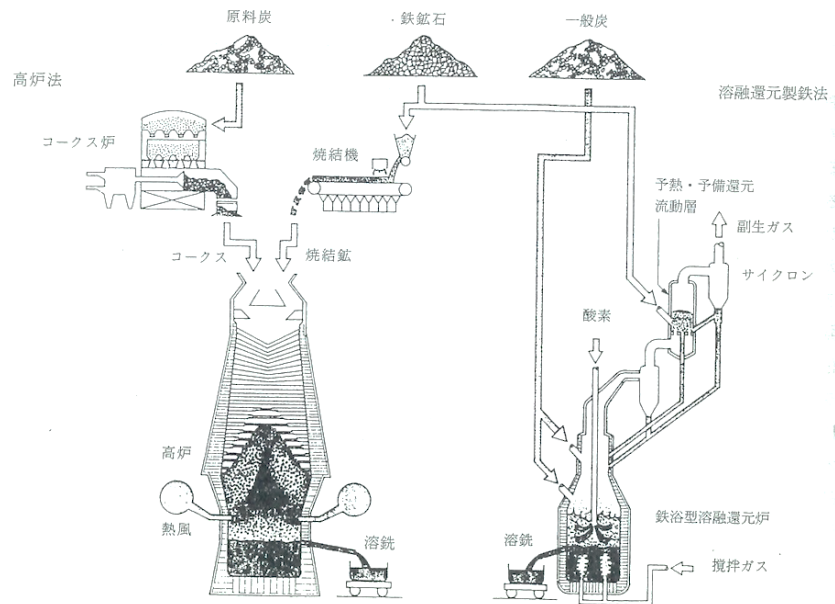
は、熔融還元炉と予備還元炉、予熱炉の三つを結んだ本格的な連続操業であり、順調に運転することができたが、出船口のところに一部想定以上の煉瓦の損耗が発生したため、一度操業を停止して1994年1月末から第1炉代を稼働した〔日本鉄鋼連盟①, 1994〕。同年1月～2月には145時間に及ぶ連続運転記録を達成した。このように実験を重ね、同年11月15日にはDIOS第5炉体の実験が完了した。試験は所期の目標をほぼ達成し、生産性、原単位、耐火物の寿命についても見通しを得た。水冷問題が課題として残ったが、設備の問題でもあり大きな障害にはならないと想定された。

6. プロジェクトの結果³⁰

日本鉄鋼連盟の下で鉄鋼8社の参加により1988年度から1996年3月までの8年間にわたり推進されたDIOSプロジェクトが完了した。パイロットプラント試験により、熔融還元法による溶銑生産技術を確立し、スケールアップに必要なデータを得ることができた。また、日産6,000トン(年産200万トン)のモデルにおいて、高炉法に対して、建設コスト約35%低減、溶銑製造コスト約20%低減、溶銑生産1トン当たりの石炭消費は高炉と同等レベルの730～750kg、純消費エネルギー3～4%削減、CO₂排出量4～5%削減が可能であるという検討結果を得た〔日本鉄鋼連盟①, 1997〕。DIOSと高炉法との比較を図10に示す。

³⁰ 以下の記述は、〔北川, 1996, 2002〕, 〔富浦, 1996〕, 〔日本鉄鋼連盟①, 1997〕を参照。

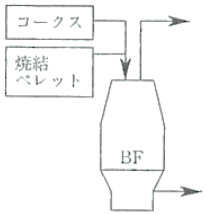
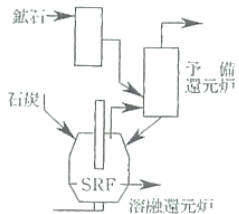
図 10 溶融還元製鉄法と高炉法の比較



出所: [北川, 1995, p. 28]

表 11 は溶融還元法と高炉法の比較を示したものである。高炉には焼結鉱とコークスが炉頂部から交互に層状に装入される。炉床からは高温の熱風を吹き込んでコークスを燃やし、発生ガスを層状の原料の間を通すことで焼結鉱を還元し、約 6～8 時間かけて銑鉄を製造する。

表 11 DIOSと高炉の比較

	高炉	DIOS
プロセス概要		
設備能力	350 万トン/年	15 万トン/年
形式	シャフト炉	流動床炉＋鉄浴炉
原料	焼結，ペレット	粉鉄石
還元剤	コークス，CO ガス	CO ガス，チャー
燃料	コークス（＋微粉炭） 熱風	石炭（一般炭） 酸素

出所：[富浦，1996]より修正作成

一方，溶融還元法は，溶融還元炉内の 1,500℃程度の高温銑鉄に鉄鉱石を添加することで，溶融状態で鉄鉱石を瞬時に還元して銑鉄を製造するプロセスで，還元に必要な炭素は石炭から供給され，必要な熱量は還元反応で発生する一酸化炭素(CO)を酸素(O₂)で燃焼して供給する．したがって，COを酸素で完全燃焼させる割合(二次燃焼率)が高いほど，鉄鉱石の還元反応量を増やすことができ，それだけ熱効率が良いことになる．また，溶融還元炉から発生する排ガスの熱エネルギーを利用して予備還元炉で鉄鉱石を予熱・予備還元した上で溶融還元炉に鉄鉱石を装入し，全体の熱効率を向上させている [北川，1995]．

表 12 DIOS と高炉の純所要エネルギー比較

		高炉	DIOS
原料		鉄鉱石	鉄鉱石
製品		溶銑	溶銑
純所要エネルギー量 (Gcal/tFe)		4.4	3.1～3.6
製鋼への 持ち込み熱量 (注)	炭素濃度 (%)	4.5	3～4
	温度 (°C)	1,350	1,350
修正所要エネルギー (Gcal/tFe)		3.8	2.5～3.1
その他鉄源としての特性		・鉄鉱石中の脈石成分は製錬過程 でスラグとして除去されている。 ・循環成分はほとんど含まない	

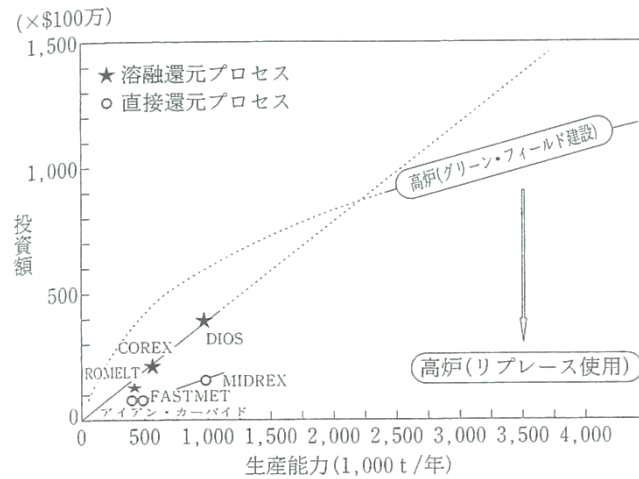
出所：[北川, 1995]より部分修正作成

注：含熱量および炭素の燃焼熱を算定した。

表 12 は、高炉と DIOS を純所要エネルギー量(燃料、電力、酸素などで消費したエネルギー量から回収エネルギー量を控除:鉄分1トン当たりで表示)の比較を示したものである。この計算では電力は 1kWh=2,388kcal(発電効率 36%に相当),酸素の所要電力は昇圧を含め 0.6kWh/Nm³とし、両鉄源の製鋼炉への装入温度と炭素濃度の評価を行い、修正所要エネルギーとしている。高炉は DIOS より純所要エネルギーが高く、製鋼への持ち込みエネルギーを考慮しても 20～30%程度上回る。また、高炉法では、製鉄下工程に 1.5～2.0Gcal/tFe 程度のエネルギーを供給して一貫製鉄所のエネルギーバランスをとるが、DIOS もこの前提で同様の開発を行った。都市型製鉄法として近隣地域へ電気と蒸気を併給し、製鉄所を含めた地域全体としてエネルギー消費を制御することも可能となる [北川, 1995]。

図 11 は、主要鉄源プロセスの生産能力と初期投資額の関係を示したものである。

図 11 主要鉄源プロセスの生産能力と初期投資額



出所: [富浦, 1996, p. 29]

図 11 から溶融還元プロセスの投資額は、粗鋼年産トン当たり換算で 250～300 百万ドルに相当することが判る。この投資額には、用地取得費、港湾・荷役・輸送等のインフラ投資は含まれず、また既存設備を流用することも考えていない。溶融還元プロセスに必要な酸素は、購入を前提とするため酸素製造装置の費用は含まれていない。ただし、既存の遊休設備を流用する場合はより安価な投資となる。粗鋼年産 350 万トン程度の規模の高炉・コークス炉・焼結機をグリーンフィールドに建設すると、約 10～12 億ドルの投資総額となるが、これと同規模の銑鉄を複数の溶融還元プロセスで賄うとすると、高炉法と同額あるいはそれ以上の投資が必要となる。すなわち、年産 300 万トンを超える需要がある場合には、高炉法は依然として有力な生産手段であると言える [富浦, 1996]。しかしながら、市場の規模、原料とエネルギー、

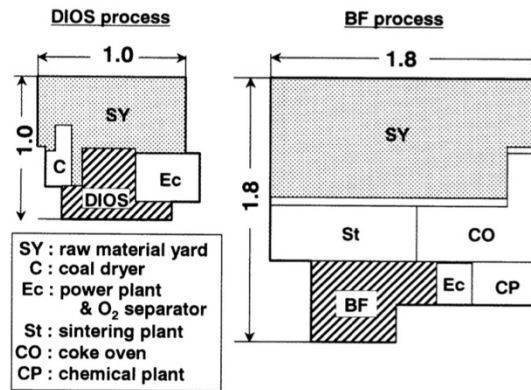
適正な技術・技術者・作業者の存在, 鋼材需要家や電気・機械などの関連産業の存在, 地域における規制の有無などを多面的に考慮し, 実用化を検討する必要があった.

パイロットプラント試験結果に基づいて, 高炉代替プロセスとして DIOS 商用設備の概念設計と経済性評価が実施され, 高炉法との比較が行われた. DIOS 商用設備1基当りの生産規模は日産 3,000 トンと設定され, 日産 6,000 トンおよび 9,000 トン規模の場合にはそれぞれ 2 基および 3 基の DIOS 商用設備が必要になる. 以下に概念設計検討の前提条件を示す [北川, 2002].

- 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合せ
- ③設備規模: 日産 3,000 トン, 6,000 トン, および 9,000 トン
- ④原燃料
 - 鉾石: 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(国内で使用する一般炭)
 - 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: 将来の技術発展を考慮

図 12 に日産 9,000 トン規模の高炉法と DIOS 商用設備のレイアウト比較を示す.

図 12 高炉法と DIOS 商用設備のレイアウト比較(300 万トン規模)



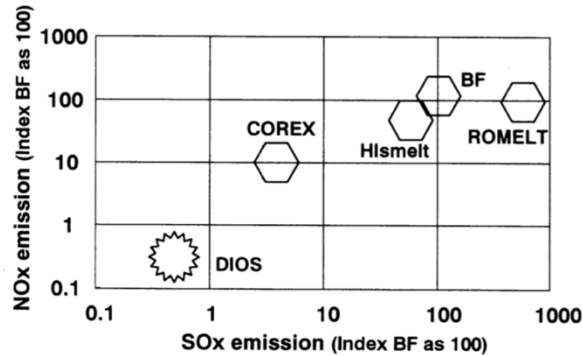
出所: [北川, 2002, p. 18]

原料ヤードの縮小が可能で、コークス工場、コークス炉副産物回収工場ならびに焼結工場の省略ができることから、敷地面積は高炉法の約 1/3 程度となる。ただし、DIOS は高炉規模の粗鋼生産量を達成するためには 3 基の商用設備が必要である。

DIOS 商用設備の石炭原単位は 730～750kg/t と推定され、日産 6,000 トン程度の場合高炉法と比較して設備費で 35%、製造費で約 20% の削減が可能である。また、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。当時の世界鉄鋼協会 (IISI) 技術委員会の検討結果では、DIOS の熱効率は開発を終えたプロセスの中で最も高い値を示していた。

DIOS は、石炭の揮発分を有効に利用可能で、原燃料の前処理段階を大幅に省略できることから高炉法より排出ガス量が 4～5% 削減できる。また、排ガス中から窒素酸化物 (NO_x) および硫黄酸化物 (SO_x) が検出されず、環境にも優しい有効なプロセスである。

図 13 DIOS とその他製鉄プロセスの SO_x と NO_x 排出量



出所: [北川, 2002, p. 18]

図 13 に高炉代替製鉄プロセスにおける窒素酸化物(NO_x)と硫黄酸化物(SO_x)の排出量の比較(高炉法を基準:100)を示す [北川, 2002].

7. まとめ

DIOS プロジェクトは約 8 年の歳月をかけて研究開発され、経済性および環境適合性において高炉法に優る製鉄法と評価された。日本の粗鋼生産量の伸びは飽和状態であるため、直ぐに国内に導入することは困難と判断された。しかし、世界的に鉄鋼需要の伸びが見込まれていたため、投資金額が少なく、海外の鉄鋼生産も可能な DIOS への期待は極めて高いものであった。また、日本国内でも徐々に普及していくと予想されていた。

溶融還元製鉄技術は国内外の鉄鋼業界で研究開発が行われた。日本ではナショナルプロジェクトとして新溶融還元製鉄技術(DIOS)が推進された。本節ではその歴史を記述した。

DIOS 推進の歴史で最も重要なことは、極めて高い注目と期待の下で、官民が協力して同プロ

ジェクトを積極的に推進したことである。

また、DIOS の基本的考えには、次の二点が前提条件となっていた。

- ① 溶融還元炉は転炉技術を転用すること
- ② エネルギー面でも高炉法に置き代わること

後に、この基本的考え方が「DIOS が実用化できなかった(されなかった)大きな要因」となるのである。

第2章 日本鉄鋼産業の環境変化(1980年～2000年)

第1章では、本論文の考察の主要対象である DIOS が開発されるまでの鉄鋼産業の動向、DIOS 技術内容およびその推進過程について説明した。第2章では、本稿の課題である「技術選択」が単に技術上の良し悪しや、経済合理性だけで決定しないことを立証するために、当時の鉄鋼業を取り巻く社会経済情勢や既存の対抗技術(高炉技術)について分析する。特に、第1章で述べた DIOS に関する当時の期待感やプロジェクト完了後における高い技術評価にもかかわらず、DIOS が実用化に至らなかった理由を、外部環境と技術環境の二つの側面から考察する。

第1節 外部環境

日本の鉄鋼産業は、鉄鉱石の輸入依存度が 99%以上、原料炭が 80%以上と、ほとんどの原燃料を海外に依存している。このため、為替や原燃料価格の変動に影響を受けやすく、DIOS プロジェクトも外部環境の変化に影響されていた。

特に、2度にわたるオイルショック、1985 年のプラザ合意による円高、それに伴う経済環境の変化は、DIOS プロジェクトの企画から終了まで様々な形で影響を与えていた。本節では、日本の鉄鋼産業に大きな影響を与えたマクロ経済の環境変化(オイルショック、プラザ合意、1980 年代後半の内需拡大政策)とそれに対応したミクロ経済の環境変化(合理化計画、技術発達)について分析を行い、DIOS プロジェクトとの関連性を明らかにするとともに、日本鉄鋼

産業の「設備の合理化・小ロット化」の取組みが DIOS プロジェクトにどのような影響を与えたのかを考察する。1987 年と 1993 年は、日本鉄鋼各社が合理化計画を発表した年であり、DIOS プロジェクトの研究開発の期間(1988 年～1996 年)に該当し、1994 年には SCOPE21 プロジェクトがスタートした年でもあった。

1. オイルショックと鉄鋼産業

原油と石炭を燃料として使用する鉄鋼産業は、2 度のオイルショックで深刻な影響を受けた。このため、日本の鉄鋼産業は、オイルショック後、コスト削減のために重油からコークスへ燃料転換を図る技術にシフトせざるを得なくなった。この燃料転換は、直ちに微粉炭吹込み技術(PCI)の導入に繋がる流れを形成する重要な要因の一つとなった。日本鉄鋼産業において溶融還元製鉄の重要性が高くなったのは、この資源制約が課題となった 1980 年代中期以降のことであった。

1970 年代初頭まで原料炭とほぼ同価格であった原油は、産油国の公示価格の引き上げにより上昇に転じた。1973 年 10 月と 1974 年 1 月の 2 度にわたる OPEC 産油国による原油価格の大幅な引き上げにより、輸入 CIF 価格(運賃保険料込みの値段)が急騰した。第 1 次オイルショック前には 1kl あたり 5,000 円台だった原油価格が一挙に 9,000 円台まで跳ね上がり、原油価格の高騰だけではなく、原料炭の価格も 1 年間で 2 倍以上に上昇した。そのため、原油と原料炭の価格格差はそれ以前と大きな変化はなく、相対価格は流体エネルギー(石油)

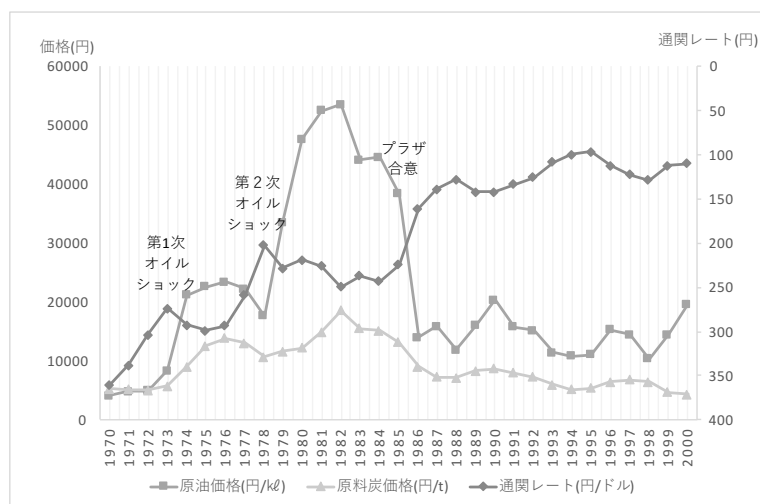
が固体エネルギー(石炭)に対して持つ優位性(ハンドリング, 貯蔵, 残滓)で十分に解消できると見られた [十名, 1996, p. 112].

その後 1978 年 12 月にイランの原油輸出が停止され, 1979 年 2 月にはイラン政変が勃発して第 2 次オイルショックが始まった. このような国外情勢変化の影響で 1978 年末から 5 年にわたる石油価格の段階的値上げが行われ, 図 14 で確認できるように 1978 年から 1980 年にかけて石油価格が 2 倍以上も上昇した³¹. 第 2 次オイルショックの時は, 第 1 次オイルショックの時と異なり, 石油価格の急騰に比べ石炭価格上昇はわずかであったため, 石油と石炭の価格差が 2 倍以上となったのである³². このように, 石炭価格が優位性を増すにつれて, 高炉の燃料は石油から石炭へと転換を余儀なくされた.

³¹ 原油輸入価格: 1978 年 17,627 (円/kℓ), 1980 年 47,629 (円/kℓ) [鉄鋼要覧各年].

³² 輸入原料炭価格: 1978 年 10,730 (円/t), 1980 年 12,280 (円/t) [鉄鋼要覧各年].

図 14 通関レートおよび輸入原油・原料炭の価格推移



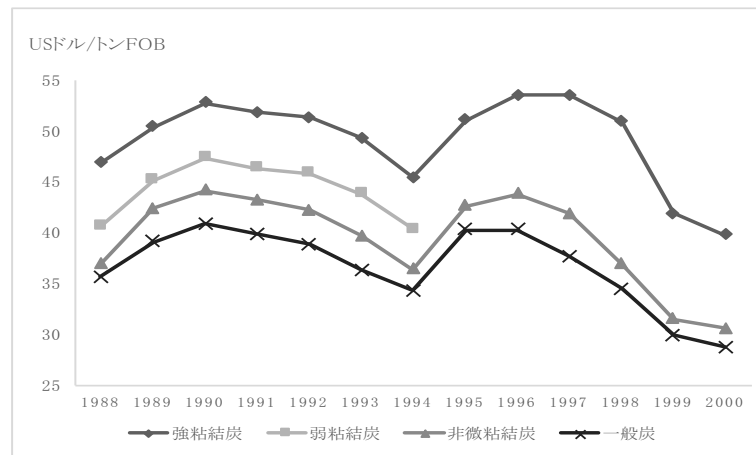
データ出所: [資源エネルギー年鑑編集委員会編, 2005], [コール・ノート, 各年]

注: 各年度の為替レートは輸入通関レートの12月単純平均

注: 為替レートは対ドル円であり, 円高推移を表現させるために第2Y軸を反転

上述の国際環境の変化により, 日本鉄鋼産業は高炉の燃料を重油吹込みからコークス装
入に切り替えるようになった。これがいわゆる鉄鋼産業の「オイルレス」操業の始まりであった。
しかし, 石炭を使用する場合には事前処理が必要なため, 石炭をコークスにする工程が不可
欠であり, これは燃料の「オールコークス化」を意味した。当時のコークス製造技術では一般炭
の利用は不可能で価格の高い強粘結炭を使用しなければならず, 高炉への微粉炭吹込み技
術(PCI)の導入を加速させた。PCI はコークス用強粘結炭(高品位炭)の代替として埋蔵量が
豊富で安価な非微粘結炭(低品位炭)が使用できる(図 15, 非微粘結炭は強粘結炭に比べて,
トン当たり 8~10 ドル安い) [野間, 1992]。このような背景から, 1981 年に初めて日本に導入
された PCI は急速に普及し, 1997 年には国内で稼働中の全高炉に導入されるようになった。

図 15 海外原料炭・一般炭の価格推移(CIF) (1988-2000)



出所:「AME Mineral Economics "Export Coal 2001"及びテックスレポート等より作成」を
[コール・ノート, 2003]から再引用

注: 1) 1995 年以降, 弱粘結炭は非微粘結炭に含む

2) 1997 年まではベンチマーク価格, 98 年以降はレファレンス価格を示す

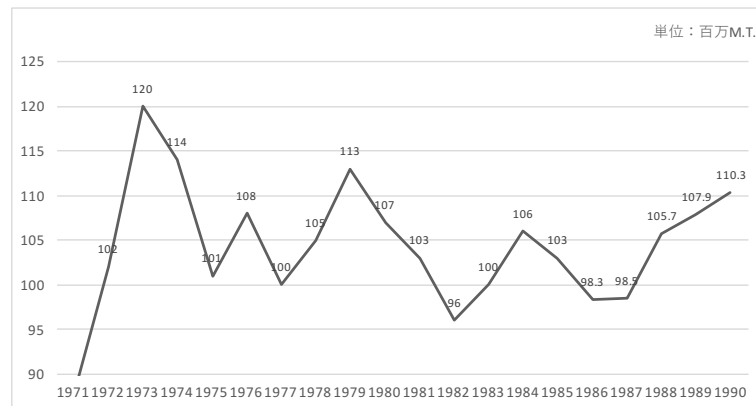
要するに, 原油価格の急騰は, 鉄鋼産業にオイルレス操業を引き起こすとともに石炭価格
上昇およびその確保の問題を招き, 再び価格競争力を獲得するために低品位の石炭利用が
求められた. しかし, 鉄鋼産業はコークス使用が不可欠であり, コークスの生産には高品位の
瀝青炭が必要であった. 鉄鋼産業は, 安価な低品位炭使用が求められる事業環境において
コークス生産が大きな制約となったので, この問題を解決するために ①低品位炭が使用可
能な高炉工程を開発する(PCI 技術, 同技術の詳細に関しては第 2 章第 2 節で記述する),
②コークスレスの銑鉄生産工程を開発するという, 二つの大型技術開発プロジェクトに取り組
むことになった.

2. プラザ合意による円高と鉄鋼産業

二度のオイルショックにもかかわらず、日本鉄鋼産業は粗鋼生産量と利益を維持するために努力してきたが、1985年のプラザ合意を契機に円高危機に直面した。プラザ合意後に急激な円高/ドル安が進み、1985年 224 円(為替レートは輸入通関レート単純平均)、1986年 160 円、1987年には 139 円、1988年 128 円と、3年間で約2倍に高騰した。第1次および第2次のオイルショックを経験しながら対ドル円為替レートは10年以上にわたり200円以上を維持してきたが、わずか3年で120円まで急騰したことにより日本経済は甚大な打撃を受け、鉄鋼産業も輸出低下と内需後退、採算悪化など、収益低下を余儀なくされた。日本経済は、第1次オイルショック以降、内需の成長率が民間消費、住宅投資、設備投資、政府支出のいずれにおいても低下したが、外需はプラスに転じ、「外需主導型」になっていた[古跡, 1987]。この外需主導型経済はプラザ合意後に大きな転換期を迎えることとなった。

鉄鋼産業に対する影響は、粗鋼生産量や輸出入の推移から確認することができる。まず、粗鋼生産量は、図16に示すように、1985年の1億3百万トンから1986年に98.3百万トン、1987年には98.5百万トンと2年連続で1億トン割れとなった。

図 16 粗鋼生産量推移(1971 年～1990 年)



データ出所: [鉄鋼統計要覧, 各年]

注: M.T. (Metric Tones)

日本の鉄鋼生産量は 1973 年に粗鋼生産量が頭打ちとなり、二度のオイルショックを経験しながらも、日本の粗鋼生産は1億トン以上の水準を維持してきた。1982 年に、一時、96 百万トンと1億トン以下になったが、翌年から直ぐに回復基調に戻った³³ ³⁴。その後粗鋼生産量が1億トン以下となったのは、プラザ合意による円高の時であった。当時、日本鉄鋼産業は、生産に対して直接輸出が 33%、自動車や電機製品等の間接輸出を含めると全体の 54%であり、

³³ 1982 年の鉄鋼生産は、前期までは前年の増勢傾向を示したが、後期は国内外の需要不振と在庫調整の遅れにより大幅な減産を余儀なくされ、粗鋼生産高の合計は 10 年ぶりに1億トンの大台を割った [日本鉄鋼連盟, 1983, p.7]

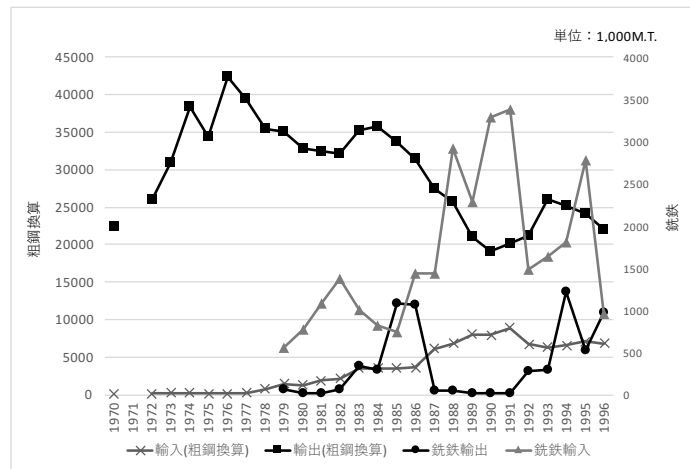
³⁴ 中国向けを中心に輸出増はあったものの、内需の低迷と大幅減産、新興国からの安値鋼材の輸入急増による国内市況の混乱、前年収益を支えたシームレスパイプの輸出量減少と価格下落等の影響で9月の中間決算は大幅な赤字となった。その年の後半は輸出の好調を持続し、内需にも好転の兆候が現れて生産も徐々に増勢に向かった [日本鉄鋼連盟, 1984, p.2]

円高は鉄鋼輸出減だけでなく、全般的な需要面への影響を与えた。その上、円高は短期間に大幅に変動したため、各企業はそれに対応する余裕がなく、衝撃の度合いが極めて大きかったのである〔日本鉄鋼連盟, 1986, p. 3〕。このように粗鋼生産量が減少する中で、円高は進む一方であったため、鉄鋼産業を含む日本の産業界はこの対策が急務であった。

図 17 に示すように、鉄鋼輸出量の激減からもその深刻さを確認することができる。鉄鋼輸出量(粗鋼換算)は 1983 年から徐々に減少傾向であったが、銑鉄の輸出量低下は更に顕著であった。プラザ合意が行われた 1985 年、先進諸国における鉄鋼需要の停滞と輸入規制の動き、韓国・台湾など中進製鉄国の輸出増加、原油価格の低下による産油国の外貨収入の減少、発展途上国の累積債務増大、第四四半期以降の円高・ドル安誘導策など厳しい環境に取り巻かれながらも、中国向けの銑鉄輸出が大幅に増加したことにより、輸出量は 1986 年まで維持されたが、1986 年の 107 万トンから 1987 年の 5 万トン台まで急落し、減少傾向は 1993 年まで続いた³⁵。

³⁵ 1986 年以降、中国の大型高炉(炉内容積 2,000 m³以上)数は 1981 年 3 基、1987 年 5 基、1991 年 6 基、1997 年 10 基、2001 年 14 基、2005 年 36 基と急激に増えた。

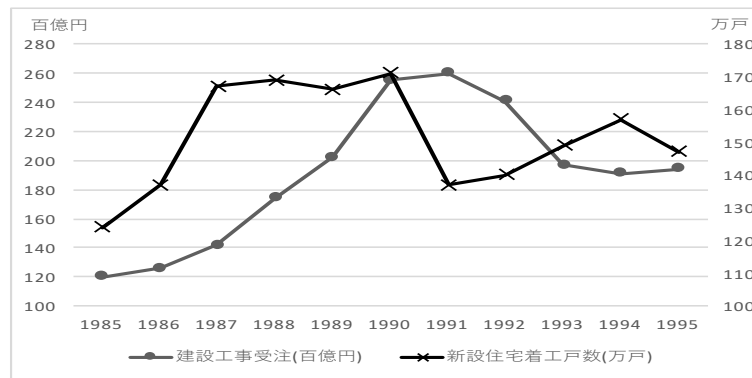
図 17 鉄鋼輸出入量(粗鋼換算)



データ出所:[鉄鋼統計要覧, 各年], [コール・ノート, 各年]

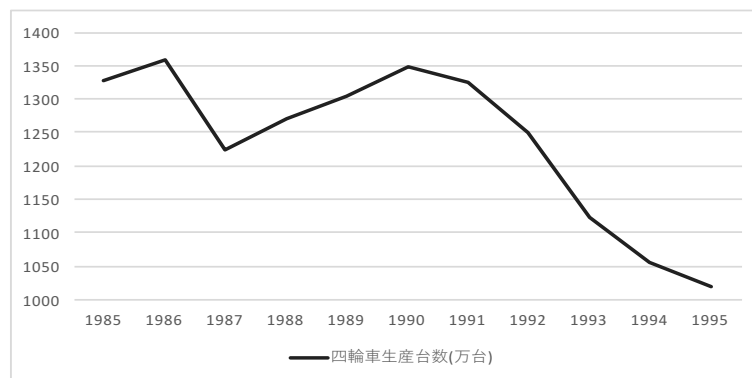
プラザ合意以降、日本経済が底を打ったのは 1986 年末頃であり、1987 年下半年以降から徐々に回復基調になったとみられる。この時期と相まって粗鋼生産量も 1980 年代後半から徐々に回復してきた。この景気後退と回復の過程で大きな役割を果たしたのは、在庫変動であった [斎藤, 1988]。1985 年の初めから対米輸出が伸び悩み、過剰な在庫が累積した。それを減らすための在庫調整が、景気後退の主な原因になったとみられる。その上、同年秋からの円高が景気後退下の企業経営を一層厳しくした。1986 年から 1987 年にかけて在庫調整が一段落したところで景気が回復過程に戻った。この景気回復は、①日本政府の内需拡大政策により国内需要が増えたこと、②中国や中近東向けの輸出が大幅に増えたこと、に支えられた。中でも、内需拡大を支えたのは住宅建設と公共事業であった。

図 18 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)①建設



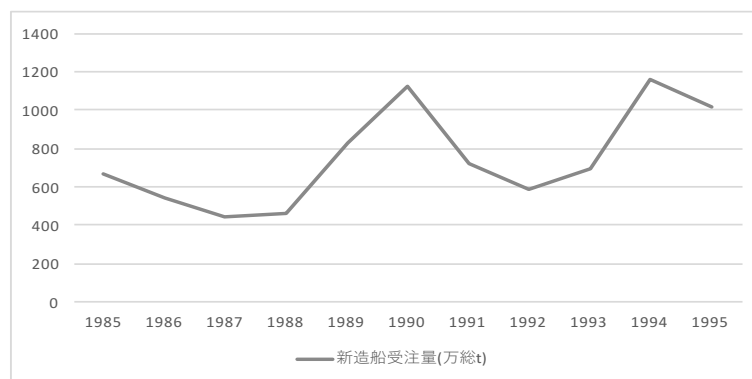
データ出所:[鉄鋼界, 各年]

図 19 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)②四輪車生産



データ出所:[鉄鋼界, 各年]

図 20 主要鉄鋼需要産業の生産動向(1985-1995)③新造船受注量



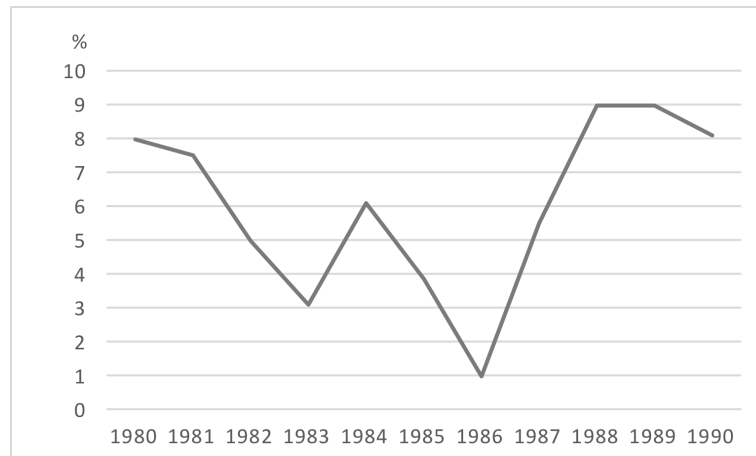
データ出所:[鉄鋼界, 各年]

図 18, 19, 20 は 1987 年から 1991 年にかけて日本の国内建設工事受注が急激に伸びていることを示す。公共事業に関しては、1987 年 5 月の緊急経済対策において 5 兆円に及ぶ大幅な追加が行われ [斎藤, 1988], その効果が 1987 年後半から現れるようになった。

上記図 18, 19, 20 で確認できるように、1988 年後半から需要が急激に伸びていることがわかる。この 1988 年から 1993 年まで続く需要拡大期が、日本のいわゆるバブル時代である。急激な冷え込みの直後に訪れた急激な経済成長により、その成長に目を惹かれがちだが、1985 年から 1988 年の間、日本鉄鋼産業は大きな危機感に陥っていたことを忘れてはならない。

図 21 は「日本鉄鋼業の売上高営業利益率の推移(1980～1990)」を示したものであり、1984 年に一時利益率が回復したものの、1987 年以降の内需拡大政策が始まる前まで減少局面にあった。このような危機に対応すべく、1987 年に大手高炉メーカーは次々と鉄鋼合理化計画を発表し、生き残りをかけて体質転換を推進した。次項では、この合理化計画とその変遷を記述して DIOS プロジェクトの社会経済的背景を明らかにする。

図 21 日本鉄鋼業の売上高営業利益率推移(1980～1990)



データ出所: 主要鉄鋼指標, 鉄鋼需給統計月報, 2016 年 10 月, 第 630 号, 鉄鋼連盟 HP³⁶

3. 鉄鋼合理化計画

プラザ合意による急激な円高の進行は、日本鉄鋼産業に新たな合理化計画の必要性を喚起させた。その理由は、①オイルショックによる円高は一過性のものであり、当時の日本はインフレ基調だったので円高の輸出価格への転嫁が可能であったが、プラザ合意を契機として発生した円高の時には、輸出価格への転嫁は不可能であった。また、②鉄鋼需要の減少に伴う大幅な減産と鋼材価格の低下が重なり、大幅な収益悪化に直面した [十名, 1996]。更に、③韓国、台湾など海外鉄鋼業の発展 の 3 点であった。

国内外の環境変化により、日本鉄鋼業は 1986 年末から 1987 年にかけて新たな中長期経

³⁶ <http://www.jisf.or.jp/data/tokei/index.html>(2016.10.21 確認)

営計画を相次いで発表し、合理化を推進した。この合理化計画は、1ドル 150 円を前提として、設備の集約、要員の削減を骨子としていた。

表 13 は、1986 年 11 月から 1987 年 3 月に鉄鋼大手各社が発表した合理化計画であり、この取組みとして ①設備のスリム化、②要員削減、③新規事業の展開を掲げて、強固な経営基盤の確立、製鉄事業の国際競争力の回復および新規事業（エレクトロニクス、バイオ等）への積極的な進出を図った。

まず、新日鐵は、1988 年下期から 5 基の高炉、5 基の焼結・コークス炉など製鉄工程を大幅に休止し、圧延設備や鉄源部門のスリム化を発表した³⁷。川崎製鉄は、1987 年上期から 7

表 13 1986～1987 年鉄鋼大手の合理化計画

発表日	企業名	計 画
1986.11.27	神戸製鋼所	経営合理化計画
1986.12.22	住友金属工業	改訂中期経営計画
1987. 2.13	新日鐵	中長期経営計画
1987. 2.14	川崎製鉄	鉄鋼部門の合理化
1987. 2.25	日本鋼管	中期経営計画
1987. 3. 3	日新製鋼	経営合理化計画

出所：[日本鉄鋼連盟①, 1987, p. 61]

³⁷ 室蘭 2 高炉（1989 年度下期）、釜石 2 高炉（1988 年度下期）、広畑 4 高炉（1989 年度上期）、堺 2 高炉（1988 年度下期）、戸畑 4 高炉（1988 年度上期）を休止。

基のコークス炉，焼結炉などを休止，日本鋼管，住友金属，神戸製鋼は高炉を各 1 基休止するなど設備のスリム化を図った³⁸。鉄鋼大手 6 社の合計では，製鉄工程だけで高炉 8 基，焼結 5 工場，コークス 6 炉の休止が計画された。

次に，要員については，1988 年までに川崎製鉄 5,300 人（鉄鋼部門），住友金属 6,000 人，神戸製鋼 6,000 人，1989 年末までに新日鐵 19,000 人（製鉄事業の要員），日本鋼管 6,000 人（鉄鋼部門），日新製鋼 1,700 人が削減された。

このような大幅な鉄鋼部門における人員削減に対応するために，新素材，非鉄鋼事業，エレクトロニクス，エンジニアリング分野などの新事業を展開した。

鉄鋼産業の合理化計画に関しては，1987 年 6 月に公表された通産省基礎素材産業懇談会『新世代の鉄鋼業に向けて』からも確認することができる。同報告によれば，日本鉄鋼産業の合理化計画の骨子は，①生産体制のスリム化と需要ニーズ対応の供給能力への再編，②鉄鋼事業の生産コスト削減による競争力強化，③成長性の高い事業分野への展開及びソフト技術を生かした多角化であった。更に，中長期的発展の方向を提示し，製品のファインスタイル化（製品の高度化），生産プロセスの FMS (Flexible Manufacturing System) 化，総合素材・総合システム産業を目標としていた（通商産業省基礎産業局 監修，1987）。ここで提示さ

³⁸ 第 3,4 コークス炉（1987 年度下期），第 3 焼結設備（1987 年度上期），第 2 製鋼工場（1987 年度下期），第 3 分堺工場（1987 年度下期），第 1 熱間圧延工場（1988 年度上期），厚板工場（1987 年度下期）を休止

れた中長期的発展の方向は、戦後の日本鉄鋼業の歴史から言えば、表 14 の第5世代と位置付けることができる。

表 14 戦後日本鉄鋼業の歩み

	特徴	普及
第1世代 (～1955)	- 小型高炉－平炉方式による生産 - 平炉の酸素製鋼化	- 平炉酸素製鋼 1948 神戸(尼崎) - 平炉鋼の割合 1955 年 86%
第2世代 (1956～1960)	- 高炉－転炉方式の確立 - 高炉の新增設・大型化 - 転炉の新增設 - LD 転炉法の導入(純酸素上吹転炉法, 平炉→転炉への転換)	1000 トン級(1300 m³) 高炉 1956 新日鐵(広畑) 1956～60 新設高炉数 10 基 1956～60 新設転炉数 13 基
第3世代 (1961～1972)	- 新鋭臨海一貫製鉄所の建設 - 大型・超大型高炉の出現 - 高炉の高温高压・酸素富化操業 - 転炉の大型化 - 大型連铸設備の導入 - 各種特殊精錬技術の導入	- 大型高炉 2000 m³級 1964 名古屋 3000 m³級 1969 福山 4000 m³級 1971 君津 (日本最大 1976 大分 5070 m³) - 大型転炉(340 トン/回) 1972 新日鐵(大分) - 臨海一貫製鉄所 新日鐵(名古屋 1964, 堺 1965, 君津 1968, 大分 1972) NKK(水江 1962, 福山 1967) 川鉄(水島 1967) 住金(和歌山 1961, 鹿島 1971) 神戸(加古川 1970) - 全連铸システム 1972 新日鐵(大分)
第4世代 (1973～1986)	- 省エネ化・連続化 - コンピューター化 - 連続铸造化の進展 - 連铸－圧延直結プロセスの導入 - 炉頂圧発電技術の導入 - CDQ 技術の導入 - 底吹転炉技術の導入 - プロセスのコンピューター化促進	- 連铸比率の向上 1973(21%)→1985(93%) - 省エネの進展(原単位) 1973(100)→1985(80) - 炉頂圧発電設備 1974 川鉄(水島) - CDQ 設備 1976 新日鐵(八幡) - 底吹転炉 1977 川鉄(千葉) - プロセスコンピューター設置台数 1980(556)→1986(1090)
新世代 第5世代 (1987～)	- ファインスティール化・FMS 化 - 溶融還元製鉄技術 - 半凝固加工プロセス - 高性能表面処理技術 - 全工程の AI 化 - 総合素材・総合システム産業化 - 新素材等の新分野への展開 - エンジニアリング, プロセス設計等	

出所: [通商産業省基礎産業局 監修, 1987, p. 151]

表 15 第 5 世代日本鉄鋼業に向けての研究開発計画

	事業名	年度	総額予算
ファインスティール化 (製品の高度化)	「金属間化合物」研究開発	1986-96	50 億円
	「超高温材料研究センター」の設立	1989-91	45 億円
	「半凝固加工プロセス」の開発	1987-94	30 億円
FMS 化 (柔軟な生産体制の確立)	「溶融還元製鉄法」の開発	1988-94	130 億円
	「技術研究組合国際ファジー工学研究所」設立	1989-94	51 億円
鉄鋼技術の活用による 新規需要開拓	「地下利用技術」の開発	1989-95	160 億円

出所：[通商産業省基礎産業局 監修，1987，p. 151]より作成

1989 年には、第 5 世代の日本鉄鋼業に向けて様々な研究開発が企画された。表 15 にその計画一覧を表す。この中に『「溶融還元製鉄法」の開発』が含まれており、その予算総額は約 130 億円で、他の計画と比べて高額であり、『「地下利用技術」の開発計画』に次ぐ予算規模となっていた。これが、日本鉄鋼産業における溶融還元製鉄技術 DIOS 国家プロジェクトの開始であった。

上記のように、1990 年代の粗鋼生産量を約 9,000 万トンと予想して積極的に推進した 1987 年の鉄鋼合理化計画であったが、政府の内需拡大政策により 1989 年末頃から鉄鋼需要は予想より高い水準を維持し、粗鋼生産量も 1991 年まで 1 億トン以上を維持した。このため 1987 年に次々と高炉の稼働中止を発表し、一度高炉を吹き止めたものの 1990 年に再び火入れを行う状況になった。表 16 に各社の「1990 年の高炉設備休止計画異動状況」を示す。

表 16 1990 年の高炉設備休止計画異動状況

会社	工場・炉号	炉内容積(m ³)	月日	異動状況
川崎製鉄	水島 1 号	2,156	1.11	3 次火入れ
			7.16	吹止め
			11.30	4 次火入れ
	3 号	3,363	2.28	吹止め
		4,359	6.19	3 次火入れ
新日鐵	堺 2 号	2,797	3.24	吹止め後廃止
住友金属工業	鹿島 1 号	3,680	8.30	吹止め
	2 号	4,800	1.11	2 次火入れ
	3 号	5,050	1.30	吹止め
			8.24	2 次火入れ
	和歌山 3 号	2,150	9.22	吹止め
日本鋼管	京浜 2 号	4,052	6.30	吹止め
	福山 4 号	4,288	2.22	吹止め
			6.19	3 次火入れ

出所：[日本鉄鋼連盟②, 1991, pp. 41-45]より作成

その後 1992 年にバブルが崩壊し、再びドル安/円高が顕著となり、これを受けて日本の鉄鋼大手各社は 1993 年に表 17 の合理化計画を発表したが、1987 年の合理化計画とは異なる
ところがあった。

表 17 1993 年鉄鋼大手各社の合理化計画

発表日	企業名	計 画
1993.3.10	日本鋼管	中期経営計画の策定
3.11	住友金属工業	新 3 ヶ年アクションプラン
4.21	川崎製鉄	第 2 次 5 年見直し計画
6. 1	神戸製鋼所	1993～1995 改正中期アクションプラン

出所：[日本鉄鋼連盟①, 1993, pp. 64-71] より作成

鉄鋼合理化計画は 1987 年と 1993 年で内容の面で異なるところがあった。1987 年には鉄鋼需要減少に備えて設備のスリム化を徹底したことに対して、1993 年には再び本業の製鉄部門強化策に集中するという態勢に戻ったのである。表 18 にその内容をまとめる。

その後 1994 年には高炉 4 社の合理化計画の見直しが行われ、新日鐵の合理化計画が発表された。表 19 に 1994 年に行われた鉄鋼大手の合理化計画をまとめる。

表 20 に 1994 年鉄鋼大手の合理化計画の内容を示す。この時は、多角化事業を再評価し選択をすすめ、本業の鉄鋼業に注力する方向に舵を切った。

表 18 1987 年と 1993 年の鉄鋼合理化計画内容

1987 年	1993 年
設備のスリム化	経営体質の改善
新規事業展開	鉄鋼部門力量強化及び事業部門の再編成
要員削減	要員削減

出所：[日本鉄鋼連盟①, 1987] [日本鉄鋼連盟①, 1993]より筆者金作成

表 19 1994 年鉄鋼大手の合理化計画

発表日	企業名	計画
1994.3.8	川崎製鉄	今後の収益改善と常識挑戦活動の進歩について
3.8	住友金属工業	リストラクチャリング計画について
3.8	神戸製鋼所	'93 年～'95 年中期計画のローリングについて
3.15	日本鋼管	事業構造の再構築に向けて
3.30	新日鐵	第 3 次「中期経営計画」(94～96)

出所：[日本鉄鋼連盟①, 1993, pp. 33-40]より作成

表 20 1994 年鉄鋼大手の合理化計画の内容

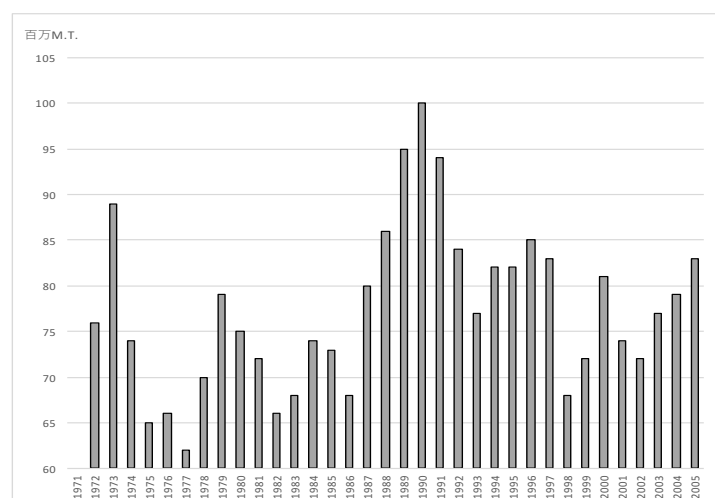
川崎製鉄	経営体質改善	必要コストダウン額と実現目標	経常利益 400 億円実現のために 2,100 億円コストダウン実現
	鉄鋼力量強化・事業部門再編	オーバヘッドの削減＝「小さく賢い」本社の実現	収益管理体制強化を図る鉄鋼部門品種セクター（仮）組織導入、業務組織改正
		多角化事業採算性再評価に基づく事業の絞り込み並びに構造転換	事業採算性の低い中・長期的に見て低い多角化事業は撤退、縮小ないし事業構造の転換
		グループ戦略の促進とビジネスチャンスの創出	グループ会社間の機能と役割再配置、経営資源再配分、橋梁・鋼構造事業部発足、川鉄運輸及び川鉄走行の合併、川鉄システム開発と川鉄のシステム・エレクトロニクス事業部の事業統合
住友金属工業	経営体質改善	経営ソフトのリストラ	小さな本社実現、経営改革戦略会議の設置
		リストラの推進と成長の追求	グループの事業戦略共有による、グループトータルの事業の拡大
	鉄鋼力量強化・事業部門再編	多角化事業	建設・プラント・システムの各エンジニアリング事業及び事業開発部門（新材料、電子部品、半導体製造装置、バイオ・メディカル、地域開発の新規事業）の多角再評価と選択
	要員合理化	鉄鋼事業の体質強化策	4,300 人の要員合理化、総資本 1,200 億円圧縮、製鋼所と鋼管製造所の統合、スリムな製鉄所の確立（製鋼所統合、鹿島製鉄所統合）
神戸製鋼所	経営体質改善	海外生産拠点の強化	USX 社と合併（USX/KOBE）、アルミディスク・サブストレートの現地生産会社（KPTEC, KPI）、KSBI（Kobelco Stewart Bolling, Inc）、KOCO（Kobelco Compressors (America) Inc など海外拠点活用
		総コストの削減	95 年度には 92 年比約 1,000 億円の総コスト削減、設備投資圧縮、95 年度末には 92 年度末比 3,800 名の要員削減
		総資産の圧縮	95 年度末には 92 年度末資産より 1,870 億円圧縮
		効率的な研究開発推進	技術開発本部と事業部の研究開発部門における役割分担の明確化、開発テーマの総点検、研究開発費圧縮（売上高比率 3.9%→3.2%）
	鉄鋼力量強化・事業部門再編	事業競争力の強化	アルミ、環境関連、建機の最大販売量の確保、不採算事業・新規事業の見直し
	要員合理化	全社間接部門の業務効率向上	本社及び事業部管理部門の業務効率化、工場スタッフの生産性向上推進及び、間接部門要員 650 名削減、小さな本社実現
日本鋼管	経営体質改善	鉄鋼事業	短期収益 1,750 億円改善実現
		総合エンジニアリング事業	今後の有望分野への資源の重点投入による受注確保、コスト削減の徹底、事業部売上 5%アップ実現
	鉄鋼力量強化・事業部門再編	新規・開発分野	多角化の推進より、有望と目されるエレクトロニクス分野、デベロッパー分野に重点
	要員合理化	全社横断的取り組み	組織簡素化、95 年度末まで 4,500 名の要員削減、設備投資を 1/3 に圧縮など
新日鐵	経営体質強化/要員合理化	製造事業での国際競争力の再構築	3,000 億円コスト削減、品種・市場分野別事業戦略策定、7,000 名要員削減など
	鉄鋼力量強化・事業部門再編	経営ソフトのリストラ・チャリニング	トップボードの再編成、小さな本社実現、スタッフ部門スリム化、品種ごとの事業部的運営
		複合経営・グループ戦略の強化・推進	エンジニアリング事業の拡大と収益力の強化、新規事業の自立化
		たゆみなき市場の開拓	中国・東南アジアなどの経済発展による急激な需給構造変化や市場拡大に対応

出所：[日本鉄鋼連盟③, 1994]より作成

日本の 1980 年代後半の長期景気拡大とそこで発生したバブル経済は、日銀の金融引締め政策を契機に崩壊し、1992 年からほぼゼロ成長の状態が続いた。プラザ合意のドル高是正で円は一時 150 円までの円安となったが、その後に年に約 10 円の円高となり、1994 年には 100 円の壁を超え、1995 年 4 月には一時 80 円を突破する展開となった [菊池, 1995]。1993 年の合理化計画及び 1994 年の合理化計画の見直しは、このような外部環境を反映したものであったが、1993 年と 1994 年の合理化計画では、1987 年の計画に記載されていた「設備のスリム化」の項目が消えていた。

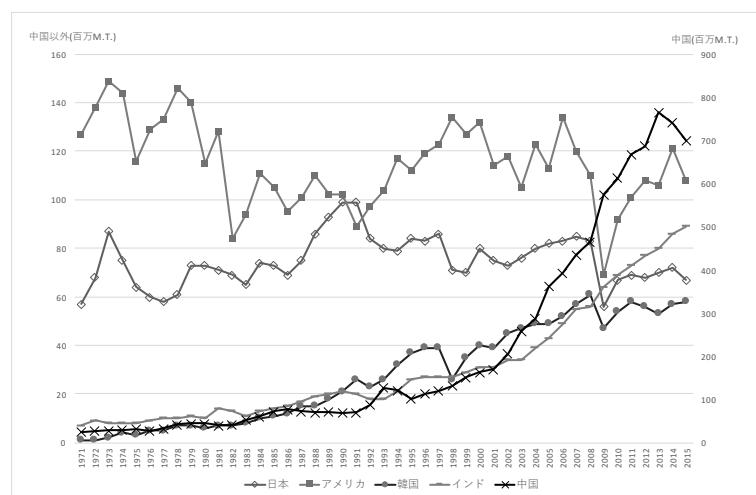
その理由の一つとして考えられるのは、国内の鉄鋼需要低下を補う形で、中国やインドなど新興国の鉄鋼需要が急激に伸びたことによる輸出量の増大であった。図 22 に「日本の粗鋼見掛消費量」(生産+輸出-輸入)を示すが、1985 年のプラザ合意による円高や 1993 年の円高と相まって日本の粗鋼見掛消費量も減少している。

図 22 日本の粗鋼見掛消費量



データ出所: [鉄鋼統計要覧, 各年]

図 23 5ヶ国の粗鋼見掛消費量



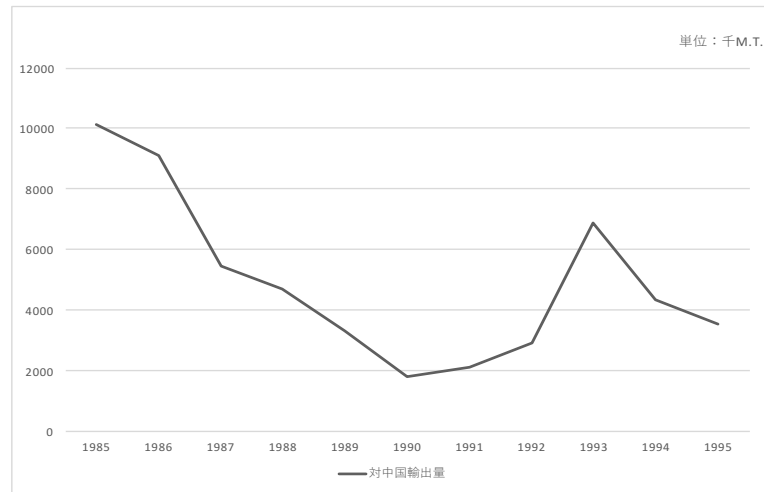
データ出所: [World Steel Association, Steel Statistical Yearbook, 各年]

注: 中国の粗鋼見掛消費量が他の国と差が大きいため第2の軸に変更

一方、図 23「5ヶ国の粗鋼見掛消費量」から、中国、インドおよび韓国の粗鋼見掛消費量が急上昇していることが確認できる。このように海外の鉄鋼需要が上昇したことにより、1992年と1993年には日本鉄鋼産業の輸出量は2桁の伸びを見せていた。

図 24 に「日本の対中国鉄鋼輸出量(1985-1995)」を示すが、1985年以降減少傾向だった対中国輸出量は、1991年、1992年、1993年と続けて上昇している。また、日本鉄鋼産業は、1987年の円高時に大幅な減産や操業停止などを実施したが、内需拡大計画などによって鉄鋼需要が急激に増えたため、再び設備の再稼動をしなければならない結果を招いた。設備の柔軟な稼動が極めて困難な高炉設備を停止し、再稼動させるという当時の厳しい経験は、1993年に日本鉄鋼各社が策定した合理化計画に反映されていた。

図 24 日本の対中国鉄鋼輸出量(1985-1995)



データ出所:[鉄鋼統計要覧, 各年]

このように、日本の大手鉄鋼各社は、1987 年と 1993 年に厳しい円高や国際環境変化の中で合理化計画をそれぞれ発表した、その内容に大きな相違があった。

4. まとめ

これまで述べたことを要約すると、主に重油を使用して銑鉄を生産していた日本鉄鋼産業は、第 2 次オイルショックの影響により重油の価格上のメリットを失い、コークスを燃料とする製銑工程を確立しなければならなかった。しかし、コークスを製造するためには粘結性の高品位の石炭を使用しなければならないという資源制約があった。この高品位石炭は、粘結性が低い低品位の石炭に比べて埋蔵量が少なく、価格も高価であるため、コストパフォーマンスを高めるために、何らかの対策が必要であった。考えられる選択肢として、①高炉工程を利用しながら

ら、低品位の石炭が使える技術を開発する、②コークスを使わずに銑鉄を生産できる技術を開発する という二つがあった。

当時、日本の鉄鋼業界は、粗鋼生産量の減少や収益悪化に悩まされており、その後の粗鋼生産量を9,000 万トン台と予想し、設備スリム化や製鉄事業以外への多角化を図っていた。

このような経済状況の中で、資源制約が克服でき、生産量の変動に柔軟に対応可能で、小型・小ロット化が期待できる溶融還元製鉄技術が注目されるようになったのである。当時溶融還元製鉄がどのくらい注目を浴びていたのかは、序章の表 3 でまとめたように 1988 年から 1993 年まで行われた鉄鋼首脳と通産大臣の懇談内容にほぼ毎回溶融還元製鉄法への支援を求めていることから確認することができる。また、世界鉄鋼協会 (IISI) の年次総会でも 1990 年に製銑関連最新技術、1993 年鉄鋼最新技術、1996 年溶融還元製造新技術といったテーマで議論されていたことから、国際的にも大きく脚光を浴びていた(本稿 p.41 参照)。こうした背景を踏まえ、1988 年から DIOS プロジェクトが開始されたのである。

その後、日本の経済環境は、内需の拡大、公共投資等により一変し、1988 年後半から鉄鋼需要が急激に伸び、粗鋼生産量も再び1億トン以上に上昇した。この傾向は 1991 年まで続き、休止設備の再稼働が求められたため、鉄鋼各社の経営陣は事業多角化から本業の製鉄部門へ集中するという方針転換を図った。日本の鉄鋼産業が意図した高炉の小型化、小ロット化の必要性を失わせ、再び大量生産方式へと舵を切らせることになった。

その後、バブル経済が崩壊し、再び円高が進み、粗鋼生産量が減少する危機的状況に

直面したが、中国やインド等で鉄鋼需要が急激に伸びたことにより、粗鋼生産の長期的な減産はとりあえず緊急課題ではなくなった。

このような外部環境の流れが溶融還元製鉄技術に対する認識を変化させたと考えられる。この要因については技術的变化によっても説明することができる。特に、DIOS プロジェクトに引き続いて行われた大型プロジェクトである SCOPE21 は、従来の高炉設備の性能と効率を一段と高める技術であり、設備投資を抑制し、既存設備を活用して大量生産が可能なため、高炉各社の経営方針に合致する技術であった。その上、SCOPE21 は、既存コークス炉に比べて低品位炭の利用률을大幅に改善できる技術であり、設備面積も縮小可能なことから、DIOS プロジェクトの契機となった前提課題を解決できる技術でもあった。この技術的变化については章を別にして述べることにする。

第 2 節 技術環境:DIOS の競合技術(既存技術)の発達

第 1 章では、鉄鋼業界の大きな技術開発の流れの中で生まれた DIOS について詳細に紹介し、第 2 章第 1 節においてはそれが日本国内の経済環境とどのように関連していたのかを考察した。本章では、DIOS と同時期に行われていた高炉技術の発達について記述する。この既存技術の発展は、DIOS が実用化技術として選択されなかった最も重要な要因の一つと考えられるからである。

本章では、DIOS の開発目標として掲げられた、高炉技術の課題(「資源制約、柔軟な制

御が困難, コークス炉の寿命, 小型・小ロットが不可能」)の解決に焦点を当てる. この中でも, 特に力点を置いて考察する課題は, 資源制約とコークス炉の寿命問題である. その理由は, この課題が存在するために, DIOS 開発が本格化したからである.

本論文では, 高炉技術の発展について, 微粉炭吹込み (PCI) と SCOPE21 の二つの技術について考察する. PCI 技術は, 日本の鉄鋼業界をリードする新日鐵が日本で最初に海外から導入した技術であり, 高炉における微粉炭 (一般炭) 使用率を大幅に増大させたため, 日本で稼働中の全高炉に適用されている. また, SCOPE21 は, 現在, 新日鐵のみで実用化されているが, これは 1970 年代以降に登場したコークス炉の性能改善と延命化技術を結集したものであった. これらの技術は高炉の課題を解決すると同時に, 高炉の効率性や経済性を著しく向上させている.

本章の位置付けは, 溶融還元製鉄の必要性を覆した重要技術を明らかにすることである. DIOS と同時期に行われた高炉技術が著しい発達を遂げ, DIOS 終了後, 次のナショナルプロジェクトの選定の時に, 日本鉄鋼業界が高炉を使わない技術の後続プロジェクトではなく, 高炉を使う技術へ回帰した事実は DIOS が実用化されなかった理由を解明するために重要である.

1. 高炉の微粉炭吹込み技術 (PCI)

第 2 章第 1 節の「1. オイルショックと鉄鋼産業」でも記載したように, 日本の鉄鋼各社は二

度のオイルショックで深刻な影響を受け、脱石油化対策を強化せざるを得なくなった。この対策として、製鉄工程に重油を全く使用しない、いわゆるオールコークス化操業を目指したのである。しかし、この操業には、①炉壁側に装入される鉱石/コークスの比が中心部より増大するため、炉壁部の熱流比(装入物/ガスの熱容量比)が上昇し、炉壁部で不活性域が生成しやすくなること、②重油カットにより羽口先の燃料温度が上昇すること、③炉熱変動やスリップが発生しやすくなることなどの問題があった。これらの現象は鉄鋼各社のほぼ全高炉で発生し、その対策として送風温度を低下させたり、送風湿度を増加させるなどして安定操業に努めたが、結果的にコークス比の上昇と生産量の低下を招いた。

このため、重油代替ができ、安価な一般炭(微粉炭)を使用し、炉の安定操業に寄与する微粉炭吹込み(Pulverized Coal Injection; PCI)技術が注目されるようになった。同技術の長所として①高炉操業の安定化、②エネルギーコストの低減、③出鉄量の増大、④コークス炉の設備能力補完、⑤微非粘結炭の有効利用などの利点があった[明田, 1989]。

他方で、石油価格の上昇とコークス操業の問題等から、従前より研究開発が行われていた「高炉を使用しない」技術である溶融還元製鉄技術や直接還元製鉄法などに関心が集まるようになった。その理由は、高炉を使用しなければ、重油価格の問題もコークス操業上の問題も解決できるという考え方による。溶融還元製鉄技術は、微粉鉱石と一般炭を使用する製鉄法の中で、以前にも一時期脚光を浴びたことがあるが、炉耐火物の問題が解決できないため断念された経緯がある[田中英年, 2008]。直接還元製鉄法は、燃料として天然ガスを用いるこ

とから、日本ではその調達が難しく、経済的にも成立しないと判断されていた。

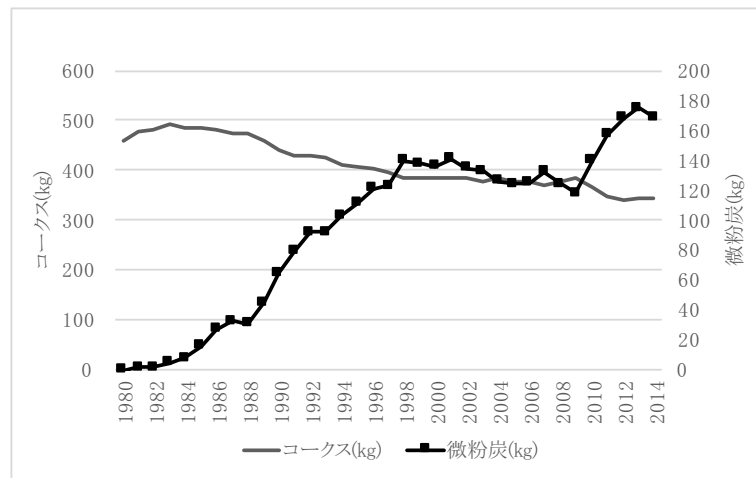
溶融還元製鉄技術と DIOS については第 1 章で詳細に紹介したので、ここでは日本における PCI 技術の導入と普及について記載する。

1) PCI 技術の導入と普及

1981 年 6 月に新日鐵大分第 1 高炉は、日本で最初に PCI 設備(アメリカの ARMCO 方式)を導入した。高炉への微粉炭吹込みは、19 世紀の中頃にフランスとベルギーで試行されたが、世界中で本格的に導入されたのは 1960 年からであり、アメリカ、中国、ソ連に実用機が設置され、1970 年代後半にはルクセンブルクでも採用された [田村 & 多田, 1983]。

PCI 技術は、主に資源対策として位置付けられていたが、オイルショック後の日本鉄鋼産業においてはオールコークス化で負荷が増大したコークス炉の負担軽減という面でも注目された。日本鉄鋼業はコークス炉の寿命問題も抱えていたため、コークス炉の負荷を減らし、長期安定的に使用することが重要な課題だったのである [野間, 1992]。その後 1982 年に合同製鉄は独自に開発した PCI 技術を設置し、次いで神戸製鋼所がアメリカの Petrocarb 技術を導入し、1983 年には Kobelco 方式を加古川第 2 高炉と神戸第 3 高炉に採用し、1984 年に新日鐵の名古屋第 1 高炉、日新製鋼呉第 2 高炉に ARMCO 方式が適用された。PCI 技術は、1986 年には国内高炉の 50%(16 基)、1998 年には国内稼働中の全高炉に装備された。

図 25 高炉銑トンあたりの平均燃料使用量



データ出所:[鉄鋼統計要覧, 各年]

PCI 技術の導入により、日本の鉄鋼産業における原料炭使用の姿は大きく変化した。図 25 は、1980 年から 2014 年における高炉銑トンあたりに使用された平均燃料使用量の推移を示す。1981 年に PCI 設備を導入後、微粉炭使用量が急激に伸びているのが確認できる。

1981 年には高炉銑トン当たりの微粉炭消費量は 2kg/t に過ぎなかったが、PCI 技術の普及が 50% に達した 1986 年には 27kg/t、100% 採用の 1998 年には 140kg/t と著しく増大し、その後も高炉の微粉炭使用量は上昇し、2013 年には 175kg/t になった。図 25 でコークスと微粉炭の使用量を比較するとコークス使用量の方が多いが、微粉炭使用料が急激な伸びを示したのに対し、コークス使用量が漸減していったことが確認できる。すなわち、コークス比を減らし、その分を微粉炭で補う傾向が強まったのである。

2) PCI 技術の発展

PCI 技術は普及するにつれて発展していった。PCI のアイデアは、1840 年に S.M.Banks が高炉にコークスや無煙炭の吹込みを提案したことに始まる。工業規模の適用は、このアイデアを基に 1840-45 年にフランスの Bologne-le-Haut 近くの製鉄所 Haut-Marne で世界最初に行われ、1881 年に特許も成立していたが、現在では誰もが自由に使用できる技術となっている [稲葉 & 八木, 1992]。PCI 技術は、前述の通り 1960 年代に日本で本格的に採用されたが、当時の技術は、アメリカの Patrocarb 社のニューマチック方式、Babcock 社と Armco 社のニューマチック方式および Koppers 社と Weirton 社のメカニカル方式の 3 種類であった [明田, 1989]。日本の高炉において羽口から還元剤を吹き込む技術は、1961 年に八幡製鉄所の東田高炉において COG (Coke Oven Gas) 吹込み実験が行われ、NKK の川崎高炉では重油吹込み試験が実施された。1962 年には、日本の高炉 12 社がフランスのポンペイ社から重油吹込み技術を導入し、国内高炉 38 基中の半数以上で重油またはガス吹込みを実施し、1964 年には国内全高炉の 42 基に重油吹込み設備が設置された [高松, et al., 2011]。日本鉄鋼業は、オイルショックにオールコークス化を展開し、高炉に PCI 技術の導入を図った。1981 年 6 月に新日鐵の大分第 1 高炉に導入されたのは ARMCO 方式であり、羽口に微粉炭を均一配分する技術であった。この設備は、2000m³ の ARMCO 小型高炉技術を 4000m³ 超の大型高炉に適用する技術開発を必要とするものであった。この建設に先立ち 1t/h のモデルプラント一式を設置し、石炭処理、搬送、制御など一連の設計条件の確認を行うとともに、2 高炉で羽

口1本吹込み試験を行い、レースウェイ内での微粉炭燃焼に関する基礎的な知見を習得して実機に反映した。この PCI 設備は、高炉の高効率安定操業を可能にし、還元剤比、コークス比の低減による省資源化を図るとともに、増産対応できる技術であることが実証され、その後、国内の各高炉に急速に採用されるようになった [高松, et al., 2011]。

日本の鉄鋼大手各社において、新日鐵は ARMCO 方式(1981, 初導入年度)、合同製鉄は自社独自開発(1982)、神戸製鋼は Petrocarb 方式(1983)、川崎製鉄はデンカ方式(1984)、日新製鋼は ARMCO 方式、中山製鋼所はデンカ方式(1985)、住友金属は自社開発(1986)と、各社の高炉に適合したPCI技術を導入した [明田, 1989]。海外から導入する PCI 技術は、日本の大型高炉で実績が無いため、各社は大型炉に対応して微粉炭吹込み量を増加させる取り組みを行い、予想以上の成果をあげた。

1985 年断面で、日本国内で最も多く微粉炭が導入できたのは神戸製鋼の 80kg/t であった [阿部, et al., 1988]が、その後 PCI 技術は発展を遂げて、図 25 で確認したように高炉銑トン当たり平均微粉炭使用量は、1998 年には 140kg/t まで増大した。これを個別高炉の使用量で見れば、1998 年 6 月に NKK は 266kg/t を達成し [NEDO・JCOAL, 2006]、1985 年の約 3 倍以上、1998 年の約 2 倍の吹込みを実現した。1997 年の神戸製鋼の論文では、「250kg/t～300kg/t の吹込み技術は最新の技術的ブレークスルー無くしては成し得ないようである。この場合、高炉技術者は未だ十分解明されていない高炉壁の状況を変更せねばならないこともありうる [稲葉 & 八木, 1992, p. 242]」と 250kg/t 到達の困難さを述べていたが、それからわず

か1年後の1998年に266kg/tを実現した。

このように PCI 技術は、高炉における微粉炭の使用量を急激に増大させ、高炉の課題であった資源制約克服の可能性を示唆した。換言すれば、PCI 技術の発達は、DIOS にとってみれば、大きな競合技術の一つとなったのである。DIOS が解決しようとしていた課題は、高炉の重油吹込みによるコスト高であり、PCI の普及はその課題を解決するものである。DIOS が高炉を上回る技術として評価されるためには、1990 年代以降の PCI を備えた高炉技術を超える必要があった。実際に、1993 年の鉄鋼界でも、「DIOS と対比するプロセスとして高炉技術を挙げながら、高 PCI・低コークス比の高炉技術を DIOS プロセスが凌駕できるかが課題である」と述べていた [実施委員会, 1993, p. 47]。

2. SCOPE21

次に記述する技術は、DIOS の次期ナショナルプロジェクトに選定された、次世代コークス製造技術 (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st Century; SCOPE21) である。SCOPE21 は、日本鉄鋼連盟が中心となり実施した石炭利用に関するナショナルプロジェクトの「連続式成形コークス製造技術 (Formed Coke Process: FCP)」(1978-1986) および「石炭直接利用製鉄技術開発 (DIOS)」(1988-1994) を引き継ぐプロジェクト (1994-2003) で、DIOS 終了時に新日鐵が通商産業省 (現・経済産業省) に次のナショナルプロジェクトとして提案した [新日本製鉄, 2008]。

ここで注目したいのは、鉄鋼連盟が主導する石炭利用に関するナショナルプロジェクトが、1978 年のコークス製造技術 (FCP) から 1988 年に脱高炉技術 (DIOS) になり、1994 年に再びコークス製造技術 (SCOPE21) に戻ったという事実である。本節では、DIOS と SCOPE21 の両プロジェクトを比較することで、DIOS が実用化できなかった(されなかった)要因について明らかにする。

DIOS と SCOPE21 の開発決定経緯を見ると、両プロジェクトとも類似している。SCOPE21 の主な開発課題は、①石炭資源の有効利用技術の開発(低品位原料炭の使用比率を上昇)、②高生産性技術の開発(工程短縮)、③省エネルギー技術の開発、④環境対策技術の開発(NO_x 発生量と発塵量の低減)であった [加藤健次, 2009]。これらの課題は、低品位原料炭が有効利用でき、操業運転が柔軟で、工程短縮が可能で、環境改善効果の高い技術開発を目的とした DIOS と一脈相通ずるものがある(第 1 章第 2 節開発背景参照)。また、両プロジェクトともコークス炉の寿命に強い懸念を抱いて技術開発を推進していた。

DIOS(石炭利用総合センター、日本鉄鋼連盟、鉄鋼大手 8 社)および SCOPE21(石炭利用総合センター、日本鉄鋼連盟、鉄鋼大手 7 社および化学 4 社)の両プロジェクトは、ほぼ同一組織で推進され、同様の開発課題(「微粉炭の利用」と「コークス炉の取り扱い」)を設定し、両者の技術開発資金も同じ通商産業省の補助(石炭利用技術振興費)を受けていた。

DIOS が実用化できなかった要因として、ナショナルプロジェクトにおける「組織構成のあり方」に問題があったと、新日鐵の富浦は次のように述べている。

きわめて長期的な意味での基盤形成には役立ったけれども、現実には商業化(実用化)に結びついた共同研究は、正直に言って、少なかったと評価せざるをえません。この背景には、おそらく官の予算科目は細分化されており、基礎的研究から商業化までを一貫してバックアップするような制度がなかったことが、一つの要因になった〔富浦, 2000, p. 11〕。

また数土文夫川崎製鉄副社長(当時)は、次のように述べている。

ナショプロというのは、成形コークスにしても DIOS にしても、実際に実用化が行われていないじゃないか、と。ナショプロの国家予算は絶対額としては大きいのですが、政府の補助率は全般的に他の国より少ない。それは研究の成果が上がらないからで、真剣さがどこかで欠けているのではないかと思うのです。もう 1 つまずいことは、相乗りでやっていることですね。(中略、筆者) 今後はあるアイディアがある時に、それに同調した人たちがやるという形にしないと、テーマの選択もあるいはそれに金を出す方も、なんとなしにルーズになってしまっただめなのではないかと思うのですが〔浅井, et al., 1999, p. 10〕。

ここで発言されたように、ナショナルプロジェクトにはそれに同調した企業や研究者の自発的参加からではなく、鉄鋼協会や鉄鋼連盟の会員会社としての義務や付き合いとしての参加の傾向が存在し、このような組織構成の風潮をナショナルプロジェクト失敗の理由として指摘する視覚もあったのである。しかし、DIOS は実用化に失敗し、SCOPE21 は 2008 年に新日鐵の大分製鉄所で実用化された。DIOS が実用化できなかった理由として、上記の富浦や数土の発言のようにナショナルプロジェクトにおける組織構成のあり方の問題であるならば、なぜ、DIOS は実用化に至らず、SCOPE21 は商用化されたのであろうか。

本節では、DIOS と同一の補助金(通商産業省石炭利用技術振興費)、同様の参加主体(日本鉄鋼連盟、石炭エネルギーセンター、国内鉄鋼各社)と開発課題で取り組んだ SCOPE21 の歴史を辿りながら、なぜ SCOPE21 は実用化され、大きな期待を背負っていた

DIOS は失敗という烙印を押されることになったのかを探る。

1) コークス炉延命技術の重要性

コークス炉の延命技術は、古くから鉄鋼産業の重要課題の一つであった。日本のコークス炉の多くは、高度経済成長期の 1965～1975 年に集中的に建設されたため、コークス炉の設備更新が同時期に集中し、巨額の設備投資が必要という問題を抱えていた(コークス炉の寿命問題については、本稿第1章第2節 DIOS 小史の表 5, 6, 7 エイジ・ストラクチャーを参照)。

ここで、コークス炉のリプレイス(設備更新)が必要となる理由について簡単に説明する。コークス炉は、石炭を乾留する炭化室、炭化室を加熱する燃焼室および燃焼排ガスと熱交換を行う蓄熱室の三つで構成される。炭化室と燃焼室は交互に配置され、炭化室は厚さ 100mm の煉瓦壁を通して間接的に加熱される。コークス炉の性能劣化をもたらす炭化室炉壁煉瓦の損傷は、長期にわたる石炭の装入と押出しおよび壁煉瓦面の冷却・加熱の繰返しによりレンガに亀裂が発生し、次第に拡大していくと同時に、スポーリングで煉瓦の欠落や煉瓦面の肌あれも増大する。この損傷は、早期に適切な補修をすることによって修復されるが、放置すれば炉壁からのガスリーク増大や煉瓦脱落を招き、寿命を短縮することになる。その他に異常高温による煉瓦の局部的溶損や装入炭の異常膨張による煉瓦損傷が起きる場合がある。これらの損傷は、炉令 15 年程度からその進行を徐々に早めるといわれ、更に進行して壁煉瓦面の平滑性と壁面の平面性が失われるとコークスの押詰りが頻発して安定操業が困難になる。また、

ガスリークや煉瓦脱落によって燃焼室の閉塞が頻発すれば乾留不能となって生産に支障が生じる。このように安定操業が不可能になった時がコークス炉の寿命である。また、ガスリークが増大して煙突から黒煙が発生して設備補修では解決困難となり、乾留熱量や補修費用の著しい上昇をきたす時もコークス炉は寿命といえる [石川, 1985]。

1985 年頃には、コークス炉の大小に拘わらず、「炉の寿命は 30 年」と認識されていた。このためコークス炉の操業条件の最適化、日常操業管理の徹底、迅速的確な補修を行っており、製造コスト低減のため一般炭使用、乾留エネルギーの減少、CDQ (Coke Dry Quenching) 設備による排熱回収など、既存設備に対しても積極的に投資していた。これらは、コークス炉の熱効率向上に効果的であると同時に、35 年以上のコークス炉の延命可能性も示唆した [石川, 1985]。

2) SCOPE21 選定の背景

DIOS が終了する頃、SCOPE21 計画が具体化されつつあったが、SCOPE21 がナショナルプロジェクトに選定された理由として、次の三つが挙げられる。

第一に、1990 年代中頃、日本のコークス工業は、連続式成型コークス製造法 (Formed Coke Process: FCP) と革新的コークス製造法の二つの選択肢を持っていた。FCP は、1978 年から 1981 年まで日本鉄鋼連盟の参加企業により、200t-coke/d パイロットプラントにより実用化に向けて技術開発が実施された。しかし、FCP は原料炭および高炉の制約から、通常コー

クスの 20-30%の代替が安定運転の限界であると確認されたため、従前のコークス製造法で

前記の課題を解決できる新型コークス製造法の開発が必要と判断された [西岡, 1996]. 新日

鐵の鈴木氏は、革新的コークス製造を選択した理由について次のように述べている。

成形コークスといって、FCP というのを日本では散々やっているわけです。要は、石炭を成形して固めてそれを直接還元するというやり方なんですね(中略, 筆者)。1970 年くらいからずっと成形コークス研究はされているんですよね。和歌山にもですね。その、室炉式なんですけれども、成形物を上から突っ込んで下から出すという、間接還元をやっているんですけれども、これも、直接ガスを吹き込んでいて、乾留させて、コークスを連続して出すという(中略, 筆者)。これから始まっているんですけど、こんなブリケットの硬いやつを高炉に突き込んでやってもいるんですよ。それを 20kg~30kg くらいやったんですけど、そこで断念して、また 10 年後にこの SCOPE が次の次世代コークス炉として動いたんです。だからブリケットの玉みたいのはやっぱり高炉には合わない、と言うのがその時の技術でわかったので、そういう方向に技術はいつちゃいけないねっていうのが、業界内の、なんとなく分かったような動きなんですね(中略, 筆者)。一応それでも FCP は(中略, 筆者)、八幡でもやりましたし、川鉄でもやりました。(しかし)それがダメだというのが、成形コークスの難しさを知って、そこで断念したんですね³⁹。

FCP は DIOS, SCOPE21 と同様に、鉄鋼連盟の主導の下で行われたナショナルプロジェクトであった。FCP は開発後、八幡製鉄や川崎製鉄に一度は導入されたが、技術的限界が判明したため、次期プロジェクトに選ばれなかった。そこで日本鉄鋼連盟は、21 世紀の革新的コークス炉開発を目指して 1996 年 3 月から「次世代コークス製造開発委員会」を発足させて検討を進め、通商産業省はそれを受けて SCOPE21 を技術開発ナショナルプロジェクトとして位

³⁹ 筆者金によるインタビュー調査: 鈴木豊氏, 新日鐵住金 製鉄技術部コークス基盤推進部 コークス技術室長, 2016 年 10 月 26 日

置付けたのであった。この流れを整理すると、FCP という新しいコークス技術（高炉を継続的に利用する技術）が過去にも一度行われたが、1988 年からはそれが一度中断され、DIOS という脱高炉技術プロジェクトが行われたのである。その後 DIOS が終わる頃には再びコークス技術の開発に戻ることを決定したが、そこでは成形コークス技術の失敗事例があったので、それとはまた違うコークス技術の開発を計画したのである。SCOPE21 は FCP とは異なる技術であるが、FCP-DIOS-SCOPE21 という時系列的順序で見れば、高炉技術-脱高炉技術-高炉技術という流れであり、日本でも一度脱高炉が試みられたが再び高炉技術に復帰したことがわかる。

第二に、SCOPE21 開始前から鉄鋼業界が鋭意取り組んできた高炉技術の改善努力があげられる。SCOPE21 はナショナルプロジェクトとして 1994 年に開始されたが、鉄鋼業界は同プロジェクト開始前から基礎研究を行っていた。1989 年に日本鉄鋼協会の特定基礎研究会（1978 年 4 月設置）は、産学共同で次世代コークス製造プロセスに関する研究を進めていた。この次世代コークス製造法は、①設備投資の大幅削減、②環境・労働条件の抜本的改善、③使用石炭の自由度確保、④生産変動への柔軟性確保を目標に、石炭加熱下の性状研究（九州工業大学、京都大学、北海道大学）、予熱処理炭の特性研究（東北大学、成蹊大学）、加圧成形研究（大阪大学、京都大学、九州大学）、中・低温乾留コークスの高炉内反応研究（北海道大学）等を実施した [坂輪, 1995]。その結果、①石炭の急速加熱により石炭の利用範囲を拡大できること、②石炭を成形して均一乾留することで乾留時間を短縮できることなどの成果が得られた。

この成果を次世代コークス炉に結びつけるため、1993 年に日本鉄鋼連盟・鉄鋼技術政策委員会は、通商産業省の技術開発ナショナルプロジェクトとして、革新的コークス炉の調査研究を取り上げ、1994 年度から 2 年間、基礎的な調査研究プロジェクトを推進した〔日本鉄鋼連盟 技術管理部、1994〕。1994 年 3 月、同プロジェクトは鉄鋼技術政策委員会（委員長：濤崎忍川崎製鉄社長）の下部機構として「石炭高度転換コークス製造技術調査研究委員会」（委員長：彼島秀雄新日鐵・製鉄技術部長、当時）が設置され、大手鉄鋼 7 社（新日鐵、NKK、川崎製鉄、住友金属工業、神戸製鋼所、日新製鋼、中山製鋼所）および三菱化学、新日本化学、関西熱化学、北海製鉄による共同研究として革新的コークス炉の基礎的調査研究を実施すると同時に、通産省の技術開発国家プロジェクトに位置付けられた〔日本鉄鋼連盟①、1996〕。同委員会が行う調査研究は、700～800℃程度で行う新コークス製造プロセス技術に関する基礎的研究であり、従来のコークス炉（石炭コークス化温度 1,000℃程度）に比べ、次の点を改善することを目指していた〔日本鉄鋼連盟②、1994〕。

- ① エネルギー原単位の約 10%低減
- ② NO_x の約 30%削減、SO_x の約 10%低減
- ③ 石炭資源制約の緩和（強粘結炭だけでなく多様な石炭利用が可能）
- ④ 生産性 300%向上による設備のコンパクト化

「石炭高度転換コークス製造技術調査研究委員会」は、2 年間の基礎調査をもとに、1996 年度以降も引き続き国家プロジェクトとして推進されることになった。研究の本格化に伴い、新たな研究開発体制を確立するため、従来の調査研究委員会を発展的に解消し、新たに「次世代コークス製造開発委員会（初代委員長：中村爲昭住友金属工業社長）」を設置した。

SCOPE21 は期間 8 年で計画されたが 1994 年からの 2 年間もその計画に含まれた(1997 年以降の記録には 1994 年度開始と記載)。このように, SCOPE21 プロジェクトは 1996 年から開始されたが, 実際にその基礎調査が始まったのは 1989 年からであり, 注目すべきことは「SCOPE21 と DIOS は同時進行で研究開発された」という事実である。

また, 高炉技術を発展させる努力は, 1980 年代半ばからコークス炉延命技術, コークス炉と高炉における微粉炭使用技術の進歩からも確認することができる。表 21 に 1994 年に SCOPE21 が開始されるまでの主なコークス技術発展の経緯を示す。

表 21 でグレー色に明示した予熱炭装入法, 石炭調湿法(Coal Moisture Control; CMC)および微粉炭塊成化法(Drycleaned and Agglomerated Pre-compaction System; DAPS)を統合したのが SCOPE21 となった[日本鉄鋼協会第 5 版鉄鋼便覧委員会 編, 2014, pp. 97-175]。

表 21 コークス技術発展の経緯(1978～1994)

	コークス技術発展の経緯
1978	連続成形コークス(FCP)開始
1979	予熱炭装入法
1981	高炉 PCI 開始(新日鐵大分)
1983	石炭調湿法(CMC)(新日鐵大分),
1984	石炭コークス全自動分析(福山)
1985	三菱化成黒崎コークス炉プログラムヒーティング
1987	FCP 開発完了(1978 年スタート)
1990	室蘭休止コークス炉再開, 世界最大 CDQ(福山 220t/h)
1991	微粉炭塊成化法(DAPS)(新日鐵大分)
1992	大分コークス炉操業自動化
1994	SCOPE21 開始

出所: [坂輪, et al., 2002, p. 98]を一部修正

コークス炉の生産性は加熱壁煉瓦および石炭とコークス層の伝熱で計測されているが、予熱炭装入法は高温の石炭を装入することにより、炉内での石炭の乾燥と昇温時間を節減できた。乾留時間も 12 時間程度に短縮でき、コークス炉の生産性が湿炭装入炉に比べ約 40% 向上した。予熱炭装入法は、微粉の発生ガス随伴による副産物の品質低下や石炭の装入密度の上限が 0.82t/m^3 程度であることが難点であった。すなわち、発生ガスの炉頂空間部流速から粒径 0.3mm 以下の微粉炭がガスに随伴して吸引されタール中に混入し、タール処理工程の高速遠心分離によっても粒径 0.1mm 以下の微粉は分離できず、QI (Quinoline Insoluble) 成分として電極ピッチ原料に混入し品質劣化を招いた。また、装入密度を 0.85t/m^3 以上に上昇するためには、人為的に原料の圧密と装入炭の粒径分布の拡大操作を行う必要があった [坂輪, et al., 2002]。

石炭調湿法 (CMC) は、装入炭を加熱して水分を低減する設備である。水分の低減により、石炭粒子間の水による架橋力を低下させて、粒子間の滑り性を向上させることで、充填嵩密度の上昇や炭化室内での石炭水分の加熱に要するエネルギーの低減を可能とする。その効果は、 $80\text{Mcal/t-coal(dry)}$ の省エネルギーと約 10% の生産性向上、ドラム指数で 1.0%, CSR で 2.0% の向上に現れていた [日本鉄鋼協会第 5 版鉄鋼便覧委員会 編, 2014]。CMC は、1983 年に新日鐵の大分製鉄所で初めて導入されたが、環境問題から石炭輸送系統や装入系統に抜本的な改善がない限り更なる進展は難しいと判断され、微粉炭塊成化法 (DAPS) に置き換えられた [坂輪, et al., 2002]。

DAPS は、新日鐵で開発され、CMC の課題を技術的に改善したもので、1992 年に大分第 3 と第 4 のコークス炉に初めて導入された。その特徴は、調湿炭装入法の水分下限値をさらに低下させるため、発塵やキャリーオーバー等の原因となる装入炭中微粉を分離し塊成化することにあった。DAPS は、水分を 2%程度まで低減させるプロセスとして設計された。その効果として、調湿炭より大きい約 0.8t/m^3 への装入嵩密度の向上や 110kcal/t-coal の省エネルギーと約 20%の生産性向上が得られ、コークスの品質はドラム指数が 3.2 向上し、CSR が 5.6%向上することが期待された [日本鉄鋼協会第 5 版鉄鋼便覧委員会 編, 2014]。しかし、DAPS の立ち上げ段階では、乾燥微粉の塊成化が非常に困難な課題となったため、乾燥微粉炭の大型ロールプレススケール成型技術が初めて実現され、石炭からの脱ガス成型が最も重要なファクターであることを明らかにした技術であった [坂輪, et al., 2002]。

以上で述べた二つの技術(予熱炭装入法と CMC-DAPS)の問題点を回避し、利点を併せたものが SCOPE21 である。

第三の SCOPE21 がナショナルプロジェクトに選定された理由として、既存設備との関係が考えられる。SCOPE21 は既存設備すなわち高炉技術の一環として考えられたことが大きい。それは、DIOS は高炉代替技術として開発されていたことと対照的である。SCOPE21 は、プロジェクト幹事会社の新日鐵により実用化されたが、同社の鈴木氏は、SCOPE21 が選定された理由について

(DIOS は)その後の例えば燃料、運転費用を見た時に本当に安いのかというのはち

よっとわからないですね。多分建設というレベルで、転炉と同じようなレベルでちょっと機能を付加していくということですから、そういう面で高炉を作るよりは、転炉を作る方が安いのかとは、自分の感覚ではなんとなく思います。ただ、その後の運転コストまで入れると本当にメリットあるのかなと思うんですね。(中略、筆者)インフラを含めた時に本当にできるのかという検討をした結果、やっぱり高いという結論になったと思いますよ⁴⁰。

と述べ、運転コストまで考慮すれば DIOS の商用化は難しかったと語っている。また、既存の高炉バリューチェーンとの関係においても、高炉を代替する新技術の導入よりも、既存高炉を使用して技術でコストを下げ、効率向上を図る方が現実的であるとも発言していた。

(SCOPE21 は)コークス業界でやるんだと、コークス業界って仲の良い業界なので、すごく。鉄鋼協会の中でコークス部会というのがあるんですけど、そういう中の関係が非常に良い方なんです。(中略、筆者)コークスというのは高炉があって、あるという世界だし、ガスは作っているし。それも使われているわけですから。(中略、筆者)ものを作った瞬間に、製鉄所自身を動かすこと、自分の工場、周りの工場を動かすためには、やっぱりそんな大胆な変革したコークスを作るというのはできない⁴¹。

その上、SCOPE21 は、現場からボトムアップで浮上したアイディアであり、現場にとり現在稼働中の設備をいかに有効に活用するかというのが最も重要な課題なのである。SCOPE21 の実用化に携わった新日鐵住金大分製鉄所の田中氏は、現場の既存インフラとの関係から DIOS は実現困難であったと次の様に語っている。

既存インフラを最大限活用することを前提として考えた。投資効率を考慮すると、付帯設備含め新しい設備を全て、最初から新設することは難しい。(中略、筆者)建設工事での既生産設備休止による生産減影響や、投資効率の面で、既存技術を大幅に変更なしに行うことが前提となる。(中略、筆者)将来の生産量が見通せない現在では、投資を最

⁴⁰ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

⁴¹ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

小限に抑えるためにまずは既存インフラの延命がベースとなる。大規模な設備改造が新技術の導入は周りのインフラとの関係や環境を考えなければならない。(溶融還元製鉄に関して)これまで調査や経済性評価は行ったが、先の鉄鋼環境が見通せない現在において、社内の生産構造を変化する様なレベルの企画は製鉄所の技術メンバーのみでは行わない。経営含め、全社レベルで議論し、リスクを考慮し投資判断する必要がある⁴²。

既存の高炉技術体制の延長線上にあるという考えが、SCOPE21 の選定に色濃く影響していたことが読み取れる。

鉄鋼業界は、高炉の目前に差し迫った課題(「資源制約」および「コークス炉の寿命到来」)を解決するために、試行錯誤を経験しながら努力を傾注して、高炉技術を発展させてきた。この高炉技術の発展が SCOPE21推進の大きな原動力になったと思われる。SCOPE21 は、既存の設備や高炉技術を継続利用することができ、コークス会社との関係も維持できるという面においても、大きな利点があった。次節では、SCOPE21 の開発経緯について紹介する。

3) SCOPE21 の開発経緯

SCOPE21 は、「21 世紀において生産性および環境保全を強化するスーパーコークス炉を開発する」という思いを込めて命名されたように、鉄鋼業界は総力を結集して次世代ニーズを

⁴² 筆者金によるインタビュー調査:本田貴之(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 生産技術部 生産技術室長), 田中繁三(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 製鉄部 コークス技術室長), 本田基樹(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主幹), 2016 年 8 月 24 日

満たす新型コークス炉の開発を目指した。同プロジェクトは、1994 年から 2001 年までの 8 年間に総事業費約 100 億円の計画で、1996 年から 3 年間の要素技術開発を経て、1999 年以降にパイロットプラント試験を実施する計画であった [日本鉄鋼連盟 技術管理部, 1994]。その後、研究開発は、2001 年と 2002 年のパイロットプラント研究段階で 1 年ずつ計画が延長されたので 2003 年までの 10 年間の研究開発となり、予算も 2001 年に 20 億円が増額されて約 120 億円規模となった。以下にその推進過程の概要を述べる。

1997 年に SCOPE21 の開発目標が設定された。まず、① 石炭資源の有効利用の面から、非微粘結炭の使用割合を 50%とし、石炭資源に柔軟に対応できるコークス製造プロセスを確立し、② 環境/省エネルギーの視点から、省エネルギー20%、NO_x 削減 30%、SO_x 低減 10%を可能とし、無煙、無臭、無発じんのコークスプロセスを実現することであった。また、③ 生産性向上については、高炉用コークスの品質を維持しつつ従来の 3 倍の生産性を達成することを目的としていた [日本鉄鋼連盟②, 1997]。この目標は、コークス炉の資源制約の克服、環境対策と省エネルギー技術であることから、DIOS の開発とも共通するものであった。

1996 年から要素技術開発と 100t/d 規模パイロットプラント試験が計画された。その主な開発テーマは、① 高度利用のための低品位石炭事前処理、② 高生産性のコークス化システム、③環境汚染物質の安全制御であった [西岡, 1996]。そして、SCOPE21 は次の五つの中核となる研究を実施した [日本鉄鋼連盟②, 1997, p. 12]。

① 石炭資源の有効利用に関する研究

石炭の急速加熱により石炭の粘結性を向上させて微粉部分の塊性化処理を行い、コークスの品質を改善することにより、石炭資源の利用拡大を図る。

② 高生産性に関する研究

コークス炉に装入する石炭の高温余熱と塊性化、コークス炉壁(レンガ)の高伝熱化、中低温窯出しによる乾留時間の短縮、石炭装入量の拡大を図り、生産性を向上させる。

③ 省エネルギーに関する研究

装入石炭の水分除去による高温予熱、乾留開始温度の引き上げにより乾留熱量の低減を図る。また発生ガス等からの顕熱回収技術を確立する。

④ 環境保全に関する研究

ガス漏れ防止技術、密閉集じん技術(石炭・コークスの搬送および排出時)、コークス炉の燃焼構造改善による均一加熱および環境保全性能の向上を図る。

⑤ トータルシステムに関する研究

要素組合せ試験、パイロットプラント試験により、プロセス実用化に必要な開発技術の実証、設備スケールアップに必要なデータの取得を行う。

表 22 は SCOPE21 の開発スケジュールである。「次世代コークス製造開発委員会」は 1996 年に設置され、1996 年からはパイロットプラント設計に必要な要素技術開発を 3 年間行うことになった。

表 22 SCOPE21 開発スケジュール

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
調査研究		→								
要素技術開発										
(1)石炭資源の有効利用技術										
①石炭乾燥、加熱要素試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
②高温炭塊成化要素試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
③要素組み合わせ試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
(2)環境/省エネルギー技術										
①燃焼構造最適化試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
②高温炭、コークス密閉搬送試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
(3)高生産性技術		→	→	→	→	→	→	→	→	→
①中低温コークス改質試験		→	→	→	→	→	→	→	→	→
パイロットプラント試験										
(1)計画、設計				→	→	→	→	→	→	→
(2)設備化				→	→	→	→	→	→	→
(3)試験				→	→	→	→	→	→	→
(4)解体調査				→	→	→	→	→	→	→
(5)支援研究				→	→	→	→	→	→	→
トータルシステム検討										
事業費実績 (補助金)	98 (65)	398 (265)	1209 (805)	1183 (719)	1076 (687)	2468 (1606)	1621 (1080)	1986 (1322)	1310 (874)	198 (132)

出所：[産業構造審議会，2005，参考資料 2 p. 13]

1997 年 11 月には、石炭を事前に急速加熱してからコークス炉に装入し、中温 (750～800℃) で乾留し、CDQ (コークス乾式消火設備) 内で改質することによりコークス製造が可能となることが明らかになった。このため、製造工程を 3 分割することによって、各工程の特徴を引き出し調和のとれたプロセスの開発を目指すこととなった。1997 年度は、この要素技術開発および要素組合せ試験設備の建設に着手した。1998 年には、SCOPE21 の石炭事前処理工程試験設備 (ベンチ・プラント) を新日鐵・名古屋製鉄所内に建設し竣工式を行った。ベンチ・プラントは、石炭の乾燥分級、急速加熱、塊成、搬送の各工程一貫の試験設備であり、この試験でパイロットプラントの設計に必要なエンジニアリング・データを取得した [武富，1999]。ベンチ・プラントの石炭処理量は 0.6t/h で、実機設備の 1/200 規模であった [加藤，2009]。

1999 年度からベンチ・プラントの要素組合せ試験を開始し、2 年をかけてパイロット試験設備

(50t/d 規模のコークス製造設備)の設計と建設を行い、2001 年度から試験運転ならびに実用化に向けた総合評価を行う計画であった。

1999 年 6 月に、日本鉄鋼連盟が報告した要素研究成果の概要を以下に述べる。

① 石炭資源の有効利用技術

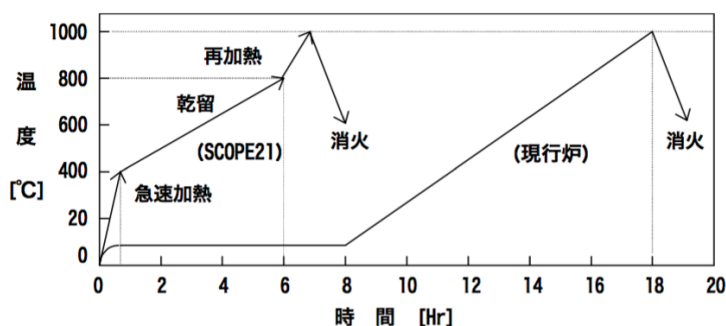
急速加熱処理した場合、製造コークスは加熱温度域が 350～390℃の範囲で、低速加熱の場合よりドラム強度が向上し、その効果が認められた。また、非微粘結炭と粘結炭を 50%ずつ配合したケースでも同様の効果が得られ、実用に必要なドラム強度 80 を確保することができた。急速加熱時の処理条件は、石炭粒子の流れについて伝熱解析を行い、最適加熱条件の検討を行った。その結果、300℃程度に事前加熱した石炭粒子は粗粒と微粉に分離する必要がある、微粉は 450℃の加熱ガスで気流塔高 15m、粗粒は 20m にすることで均一加熱が可能であることが試算された。また、350～400℃に加熱処理した微粉炭の塊性化に関しては、粒径 0.3mm 以下の微粉炭をバインダーの添加なしで成型できることを確認した。石炭配合については、SCOPE21 の目標である非微粘結炭 50%配合であれば成型性は良好であることが検証された。また、成型温度は高く、石炭粒子は小さい方が良好な成型性を示すことが判明した。

② 高生産性技術

SCOPE21 技術は、コークス炉に装入する石炭を高温加熱する一方、従来の 1000℃より低い 800℃程度でコークスを排出することを目標としていた。そのため、大幅な生産性の向上と

省エネルギーの達成は可能となるが、排出温度の低下によりコークスの収縮が不足して炉壁との排出抵抗が増し、炉壁損傷や排出不能になる危険性があった。また、排出温度の低下により炭素結晶化が不十分なため、コークス強度が低下する問題もあった。そこで、排出性の面から限界温度の見きわめと CDQ 設備におけるコークス強度の改善を検討した。コークス排出時の限界温度を用いて中低温度におけるコークスの排出性の評価試験を行った結果、安定排出の下限温度は約 800℃であることを確認した。また、中低温度のコークス品質低下対策として、CDQ 設備(目的はコークス冷却)のプレチャンバー部(冷却をしない予備ゾーン)に空気を吹き込むことによりガスや粉状コークスを燃焼させて再加熱して改質する方法を検討した。その結果、800℃のコークスを 1000℃まで再加熱すれば、十分な強度のコークスが製造可能であることを確認した。図 26 に SCOPE21 と現行炉(稼働中のコークス炉)との生産性比較を示す。

図 26 SCOPE21 と現行炉(稼働中のコークス炉)との生産性比較

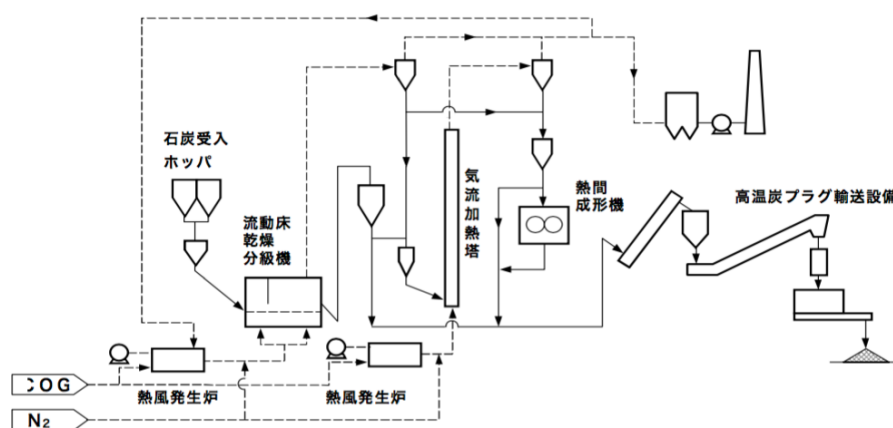


出所: [産業構造審議会, 2005, 参考資料 2 p. 10]

③ 要素組合せ試験設備

SCOPE21 は、1998 年 10 月から要素組合せ試験を行い、2001 年度のパイロットプラント試験終了と同時に完了する計画であった。図 27 に要素組合せ試験設備フローを示した。これは SCOPE21 プロセスの重要工程である乾燥分級/急速加熱/塊性化/搬送の要素技術を組み合わせた一貫設備であり、パイロットプラント設計用のスケールアップデータの取得を目的として設置された。1999 年には、各工程の性能検証、最適条件の探索などを行った。表 23 は主要設備の概略仕様を、表 24 に試験内容を示す [武富, 1999]。

図 27 要素組合せ試験設備フロー



出所：[産業構造審議会, 2005, 参考資料 2 p. 12]

表 23 主要設備の概略仕様

主要設備	形式	石炭処理量	寸方等
乾燥・分級設備	流動床	0.6t/h	W0.4m×L1.1m×H5.5m
急速加熱設備	気流加熱塔	0.18t/h	100A×H25m
熱間塊成設備	ダブルロール成形機械	2.4t/h	ロール: φ 1200mm×87mm
加熱炭輸送設備	プラグ輸送	240t/h	配管:100A×30m

出所: [武富, 1999, p. 36]

表 24 試験内容

技術項目	試験内容
石炭の均一加熱技術	実機相当粒度での流動床, 気流加熱塔における均一加熱制御性
石炭の分級技術	流動床における分級制御性(目標分給:0.3mm)
熱間塊成技術	加熱微粉炭(0.3mm)の最適塊成化条件
加熱炭輸送技術	加熱粗粒炭と成形炭の混合物のプラグ輸送における最適条件
加熱炭ハンドリング技術	加熱炭の付着性, 凝集性, 粉化性の評価と抑制方法の検討

出所: [武富, 1999, p. 36]

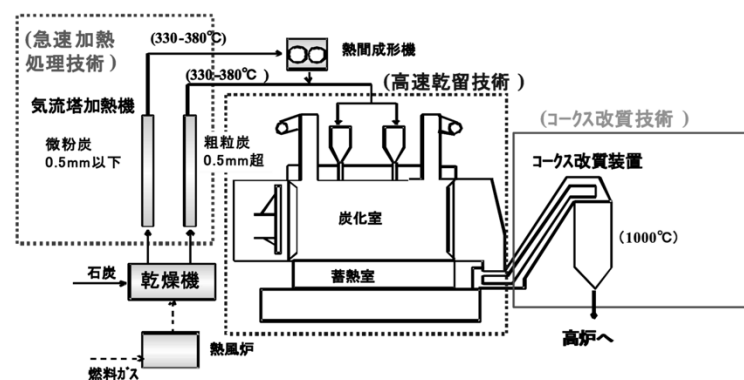
パイロットプラントの建設は 1999 年に新日製の名古屋製鉄所構内で着工され, 2001 年に
 鋳入式(乾留炉の建設開始)が行われ, 開発委員会(委員長:武田俊彦 住友金属工業副社
 長), 経済産業省, 石炭利用センター, 名古屋製鉄所, 工事関係者等の関係者が約 60 名出
 席した[日本鉄鋼連盟, 2001]。この時点の計画では, 2001 年度末からパイロットプラントは
 試運転を開始し, 2002 年 6 月から本格的な試験運転に入り, 2002 年度末で試験終了する予
 定であったが, 試験期間を 1 年延長して 2003 年 3 月の完了となった。

同試験の目的は, SCOPE21 の開発コンセプトの検証と実機設計に必要なエンジニアリン
 グ・データの取得であった。同プラントは, 石炭事前処理から乾留炉までの一貫した設備機能

を持ち、石炭処理量 6t/h は実機設備の 1/20 規模であった。乾留炉は、1 窯で、コークス炉長は実機 1/2 の 8m、炉幅は実機寸法の 4.5m、炉高は実機寸法の 7.5mであった。パイロットプラント試験は、第1次運転(低炉温条件で設定;1,100～1,150℃)および第2次運転(高炉温条件で設定;1,200～1,280℃)の2段階に分けて約1年間実施され、コークスの乾留試験は合計 440 回行われた。

試験結果、石炭を高温に急速加熱処理することでコークス強度が向上し、非微粘結炭を 50%使用しても高強度の高炉用コークスが製造できると同時に、生産性の高いコークス製造プロセスが実現可能なことを確認した。また燃焼炉は、低 NO_x 燃焼可能な新コークス炉の構造が開発された。

図 28 SCOPE21 の最終プロセスの概要



出所: [加藤, 2009, p. 194]

SCOPE21 のパイロットプラント運転試験等で得られた開発成果は以下の通りである [加藤, 2009]. この成果から, 図 28 の SCOPE21 の最終プロセス概要が得られた.

① 石炭資源有効利用技術

石炭を 330～380℃に急速加熱処理することで石炭の粘結性が増し, コークス化性能が向上した. また, 原料炭中の微粉炭を塊成化することにより嵩密度が上昇し, コークス化の性能が向上した. これらの効果により, 非微粘結炭 50%使用の場合でも高強度のコークス製造が可能であった. この知見からコークス製造用原料炭中の非微粘結炭比率は50%まで可能との見通しを得た.

②コークス生産性向上技術

事前処理工程で石炭を急速加熱処理した高温炭をコークス炉炭化室に装入することにより, コークス製造時間の短縮が可能となり, 生産性が大幅に向上する見通しを得た. SCOPE21 の開発計画では, 従来のコークス生産性の 3 倍を目標としていたが, 装入嵩密度が想定レベルに達しなかったこと等により, 2.4 倍の生産性向上に留まった.

③省エネルギー技術

SCOPE21 型新コークス炉1基(コークス生産量 100 万トン/年)の導入で, 従来のコークス炉に比べて, 省エネルギー効果は原油換算 10 万 kl/年の節約, CO₂削減効果は 40 万トン/年程度と試算された. SCOPE21 技術の適用により, 既存プロセスより総合エネルギー消費が

21%低減可能であると評価された。

その後、実機設備の概念設計が行われ、大型高炉(1 万 t-pig/日)に対応したコークス生産量 4,000t/d 設備は従来プロセスの窯数 126 に対して 53 窯に削減でき、石炭事前処理設備の増設を考慮しても設置スペースは約 1/2で済むことが確認された。また、設備費は 16%削減し、製造費も 18%削減が可能と評価(フルコストベース)された。

4) SCOPE21 の実用化(大分製鉄所第 5 コークス炉)

SCOPE21 型の新コークス炉第 1 号機(生産能力 100 万トン/年)は、新日鐵・大分製鉄所に建設された第 5 コークス炉である。同炉は、2006 年 4 月着工、2007 年 10 月に機械工事と築炉工事を完了し、2007 年 11 月からコークス炉の乾燥昇温開始、2008 年 2 月 1 日に石炭初装入を行ない、運転を開始した。2008 年 5 月に石炭事前処理設備、コークス炉、CDQ 設備が完成し、総合運転を実施した。石炭を装入して乾留するコークス炉の炭化室は 64 門であり、炭化室の炉幅は 0.45m、炉高は 6.7m、炉長 16.6mである。石炭は粉碎機で約 3mm 以下の粒径にされた後、流動床乾燥分級機で微粉炭と粗粒炭に乾燥・分級される。粗粒炭は、気流塔加熱機で約 350℃まで急速加熱され、塊成化後に粗粒炭と混合され、250℃でコークス炉に装入される。主な特徴は、次の通りである[加藤, 2010]。

- ① 石炭急速処理による乾留時間の短縮、乾留エネルギーの低減、コークス強度の向上
- ② 燃焼ガス単段・空気多段および排ガス循環方式による低 NO_x 型燃焼構造の採用
- ③ 装入車、押出機、ガイド車、消火車の全自動化無人運転の実現

大分製鉄所で SCOPE21 が最初に実用化されたことには、以下三つの理由があった。

第一の理由は、新日鐵本社は、世界をリードする鉄鋼会社として、また日本を代表する企業として、SCOPE21 を実用化させるという強い意志を持っていたことである。このような強い意志は、新日鐵の高炉やコークス炉が飽和状態にあるにもかかわらず、新型コークス炉の実用化を可能にさせた。新日鐵の鈴木氏は次のように述べている。

SCOPE の方はやっぱり我々絶対やるんだと、この技術を取り入れるんだと、当然ながら産学協働などで研究したりして、それで我々はもうコークス炉止まるので、それで研究して、やっぱり国にもインパクト与えたり、経済産業省とかですね、そういう賭けの中で SCOPE をうつんだという決意でやったんだと思います⁴³。

第二の理由は、新日鐵の中で建設用地を確保できたのは大分製鉄所であったということである。

我々の問題というのは、場所がないんですよ。製鉄所の中にコークス炉があるんですけど、止めなきゃあかないと言う世界なので、今のコークス炉を止めて壊した時に、それじゃ、新しく SCOPE を建てられるかといった時に、これはまた建てられないですよ。スペースがないとか、レイアウトがないとかですね。だから結局どっちがまるまる空いてグリーンフィールドに建てられるのかといった時に、それが大分であって、それから名古屋ということで、これが限界ですね。あの次どこがあるんだといった時に、実はないですよ^{44 45}。

第三の理由は、大分製鉄所がそもそもコークス製造能力不足であり、新たなコークス炉

⁴³ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

⁴⁴ 2013 年 6 月に新日鐵住金名古屋製鉄所で 2 番目の SCOPE21 型コークス炉が実用化された。

⁴⁵ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

の建設を必要としていた。新しい設備を取り入れる際の意志決定について、大分製鉄所の田中氏は「本社の判断」によるものであると述べている。本社から新しい設備を導入するよう要請があった場合、製鉄所は経済性を評価して本社と協議してその導入を判断することになる。SCOPE21 建設の依頼が来た時に「大分製鉄所ではウェルカムだった」と回顧しながら、「もともと第 5 コークス炉が必要だった」と述べていた⁴⁶。

3. まとめ

本章では、DIOS と同時期に行われた高炉技術の発展を踏まえて選定された SCOPE21 について分析した。ここでの分析から、DIOS が実用化されなかった理由は、それ自体の技術的な問題というよりは、併行して進められていた SCOPE21 が成果を上げ、DIOS に期待されていた問題解決の多くを SCOPE21 が達成できることが判明したからであると考えられる。DIOS の開発目標は、高炉の課題（「資源制約、柔軟な制御困難、コークス炉の寿命、小型・小ロットが不可能」）を克服する新しい製鉄法を確立することであった。一方で、鉄鋼業界は既存の高炉技術代替ではなく、高炉技術そのものを使って解決することで、この課題に挑戦した。本章では、その代表的な技術として PCI 技術と SCOPE21 を取り上げて詳細に説明した。SCOPE21 がナショナルプロジェクトとして選定された背景には、DIOS に対する高炉技術の巻き返しとい

⁴⁶ 前掲インタビュー（2016. 8. 24）

う要素があったのである。このように SCOPE21 は、高炉の抱える課題を解決して既存設備を使用するため、鉄鋼業界が最も懸念していた巨額の設備投資も不要にさせるなど経済的に大きな利点があった。このため SCOPE21 は実用化され、DIOS は商用化できなかった(されなかった)のであった。

終章 分析と結論

終章では、DIOSという有望な技術が開発されたにもかかわらず、その実用化が見送られ、高炉を製鉄技術の主流として使用し続けた理由を分析する。そのためにまず、「DIOS の誕生」、「競争技術の発展」、「鉄鋼合理化計画の推進」という 3 つに分けて本論を要約する。また、序章であげた DIOS の二つの謎(①ナショナルプロジェクトにもかかわらず、そのプロジェクトに関する十分な説明がなされていない、②入手可能な少数の文献においては非常に高い評価がなされている)を解明する。この謎解きは、DIOS が技術として高く評価されながらも、さまざまな社会的構成要因によって実用技術から離れていったことと大きく関連するものである。最後に、この事例の理論的考察を行い、結論を導出する。

第 1 節 本論の要約

高炉による一貫製鉄の最大のメリットの一つは、大量生産による価格競争力と規模の確保が可能なことである。他方で高炉が持つ課題としては、①高品位の石炭を必要とするコークスを使用するために、資源使用に制約があること、②コークスおよび焼結といった事前処理が必要であること、③安定操業および炉内壁煉瓦の損耗を最低限にするためには、工程の柔軟な稼働・中止ができないため、小ロット化ができない、④鉄鋼需要減少に対応できる小型化ができない、ということであった。その上、日本では、1960 年代～1970 年代にほとんどの高炉建設が行われたため、⑤コークス炉寿命の終焉が 21 世紀にかけて一斉に始まるということもあった。

日本鉄鋼産業において 1980 年代半ば以降に、この課題解決が強く求められるようになった。溶融還元製鉄技術 DIOS プロジェクトは、このような時代背景の下で、高炉課題を解決するために 1988 年から 1996 年にかけて出現した。しかも、予算総額約 150 億円をかけた一大ナショナルプロジェクトとして出現したものであった。本節では本論を三つの側面に分けて要約する。

1. DIOS の誕生

本論文の第1章第 1 節では、1970 年代後半から国内外の鉄鋼産業において、高炉の限界と脱高炉製鉄法が脚光を浴びるようになり、そこから DIOS プロジェクトが必然的に生まれたことを提示した。溶融還元製鉄法の研究開発が始まったのは 1930 年代まで遡るが、それが活発化したのは 1970 年代以降のことであり、欧米の鉄鋼各社による開発が次々に行われた。日本においても 1970 年代初頭から大手鉄鋼各社によって開発が行われたが、各社で開発された技術は結果的に類似するところが多かった。また、スケールアップや資金投資の問題などで共通課題を抱えていたため、1988 年から鉄鋼連盟主催の下で共同研究が行なわれるようになったのである。

当時、日本で溶融還元製鉄技術が注目された背景には、国際経済環境の変化も一つの要因であった。すなわち、1985 年のプラザ合意を契機に急激に進んだ円高・ドル安傾向は、日本鉄鋼産業に粗鋼生産量削減と、高炉の小型・小ロット化の必要性を喚起した。特に、

1985 年から 1987 年の間、急激な鉄鋼需要の減少は、日本鉄鋼産業に大きな危機感を与えるものであった。このような危機感の中、大手鉄鋼各社で行われた鉄鋼合理化計画は、①設備のスリム化、②要員削減、③新規事業の展開が主な内容とされ、設備のスリム化の面では 1987 年から 1988 年にかけて国内高炉の 8 基、焼結 5 工場、コークス 6 炉の休止が計画された。

また、政府側の動きとして 1987 年通商産業省基礎素材産業懇談会による『新世代の鉄鋼業に向けて』という報告書が出された。①製品の高度化、②生産プロセスの柔軟性向上、③総合素材・総合システム産業を目標とする発展の方向性が提示された。特に製品の高度化及び生産プロセスの柔軟性向上という方針において、熔融還元製鉄技術が取り上げられ、新技術開発の必要性が認識されていた。

このような背景により、高炉の課題が明確化(資源制約問題と小型・小ロット化の必要性)され、その課題解決の必要性が高く認識されたことから DIOS プロジェクトが開始されたのである。

2. 高炉技術の改良改善の展開

1988 年から DIOS プロジェクトは高い期待のもとで開始され、活発な研究開発が行われた。しかし、それと同時に高炉技術も目覚ましい改良発展を遂げていた。高炉技術の発展は様々な面で行われたが、本研究では高炉の課題解決に大きく寄与した PCI(微粉炭吹込み技術)と

SCOPE21(次世代コークス製造法)を考察した。この二つの技術は既存の高炉を使わない技術として開発された DIOS に対し、高炉を使い続ける技術であるため漸進的改良技術であり、DIOS の競争技術でもある。

従来の高炉技術では、強粘結炭と高品位鉄鉱石をコークス炉や焼結炉に入れて事前処理を行った上で、交互に高炉に装入し銑鉄を製造するプロセスをとっていた。一方、DIOS 技術は、石炭資源、特に豊富な低品位石炭の有効利用が図られ、コークスや焼結の工程を使用しないことからコークス炉の寿命問題に対処するものであった。それに加えて、日産 6,000 トン(年産 200 万トン)のモデルにおいて、高炉法に対して、建設コスト約 35%低減、製造コスト約 19%低減、純消費エネルギー3~4%削減、CO₂ 排出量 4~5%削減が可能であるという検討結果を得た。同技術は高炉が持つ課題を解決する脱高炉という革新的試みであった。

他方の PCI 技術は、高炉の羽口から微粉炭(低品位炭)を吹込むことにより、高炉の資源制約を緩和し、コークス炉の負担を軽減させることでコークス炉の寿命を延長するという意味で大きく注目されるものであった。1981 年に日本国内に初めて導入されて以来、1980 年代半ば以降急速に普及し、1998 年には国内で稼働中の高炉に 100%普及を達成した。同技術は高炉工程における資源制約の問題を、高炉技術を継続的に利用しながら技術改善を実施した一つであるといえる。

SCOPE21 は、1994 年から 2003 年にかけて行われたナショナルプロジェクトであったが、その起源は 1989 年から日本鉄鋼協会の中に設置された特定基礎研究会による次世代コークス

製造プロセス研究であった。また、同プロジェクトが始まる以前から開発されていた予熱炭装
入法(1979)と DAPS(微粉炭塊成化法, 1991)を総合的に開発したものが SCOPE21 であった。
同技術開発で解決しようとした課題は、石炭資源の有効利用・工程短縮・省エネルギー実現・
環境対策の実施であった。また、同技術の日本語名が「次世代コークス製造法」と呼ばれたよ
うに、コークス炉の寿命が一斉に迎える後に備えたプロジェクトでもあった。同プロジェクトの成
果は、低品位の非微粘結炭の利用が 20%にすぎなかった既存コークス炉に比べて、その利用
を 50%まで引き上げ、生産性は既存コークス炉の約 2.4 倍を達成し、20%の省エネルギー効果
と、NO_x 排出量の約 30%低減が可能というものであった。同プロジェクトも PCI と同様に、高炉
技術を継続的に使用しながらも高炉が抱えていた技術課題を解決するという改善技術であっ
た。

以上のように、高炉技術の改良改善努力は従来から行われていた。しかし、1980 年代以
降のその発展を加速化させ、1990 年代中頃には、抱えていた課題を大きく改善できたのであ
る。その成果は、1980 年代に大きく注目されながら研究開発された DIOS が解決しようとして
いた課題と同様の課題を解決するようなものであった。

3. 鉄鋼合理化計画の推進

ここでは DIOS プロジェクトが推進された 1988 から 1996 年の間に行われた二回の鉄鋼合
理化計画を中心に本論をまとめる。なぜなら、鉄鋼合理化計画の推進は、社会経済環境の変

化により業界が行った行動であることから、外部環境と事例を関連付けられる題材であるからである。この二回の合理化計画において鉄鋼業界がとった態度は大きく異なるものであった。

まず、一回目の鉄鋼合理化計画は本節の DIOS の誕生でも少し触れたが、1985 年プラザ合意により、円高・ドル安が急激に進行したのが大きな契機となった。1985 年に 1ドル 224 円だった為替レートが、1987 年には 139 円と急騰した。それに伴い、数年間 1 億トン以上を維持していた粗鋼生産量は 1986 年と 1987 年 2 年の連続で 1 億トン割れとなり、銑鉄の輸出量も 1986 年 107 万トンだったものが 5 万トンまで急落した。このような危機に対応するために鉄鋼業界は 1987 年、合理化計画を推進した。この時は主に、「設備のスリム化、要員削減、新規事業拡大」が図られた⁴⁷。

一方、このような円高による危機は鉄鋼産業だけの問題ではなかったため、日本政府は内需拡大政策を行い、1987 年後半から日本のバブル経済時代が始まった。このことにより、鉄鋼需要も復活し、設備の稼働中止を進めていた鉄鋼業界は計画を大幅に修正し休止していた設備も、再稼働するようになった。この時、為替レートも政府によって調整され、150 円程度を維持していた。

しかし 1992 年頃から日本のバブルが崩壊し始まった。150 円水準を維持していた為替レ

⁴⁷ 設備のスリム化と新規事業の拡大は連動して行われた計画であった。なぜなら設備のスリム化による余剰人員を新規事業において活用することを求めていたためである。

ートは、バブル崩壊とともに再び円高の進行を再び呼び起こした。1994 年には 100 円を突破し、1995 年には 80 円台にまで急騰したのである。これに対応するために鉄鋼業界はもう一度合理化計画を推進した。この時は「経営体質の改善、鉄鋼部門力量強化及び事業部門の再編成、要員削減」を骨子とする計画が立てられた。1980 年代の合理化計画とは違って、設備のスリム化は進められなかった。その代わりに本業である鉄鋼部門の体質強化が強く勧められた。この二回目の合理化計画の時には設備の削減が見られず、高炉技術を強化するような方針が立てられたが、このことは、前回の合理化計画とは相反するような計画が推進されたのである。

第 2 節 分析

DIOS 技術は実用化に至らず終了してしまったため、その技術が実際稼働した時にどれほど効率をあげられるのか、高炉を凌駕するまでの技術として展開できるのかなどの評価をすることは不可能である。また、DIOS を使用した時の経済性が不確実なため DIOS を高炉と同等に比較することも困難である。しかし、ナショナルプロジェクトとして 8 年間の歳月と約 150 億円の予算をかけて国内大手 8 社が真剣に研究開発していたこと、そしてパイロットプラント建設までの研究開発が進んでおり、その段階での技術的評価は極めて高いものであったという事実は、DIOS が多くの発展可能性を持っていたことを示している。また、本研究では詳しく取り上げてはいないが、韓国においては溶融還元製鉄技術 FINEX を実用化させ、2008 年に年産

150 万トンの規模の工場を建設した実績もある。韓国の POSCO は、FINEX 工場を自社の浦項製鉄所に建設しただけではなく、中国、インド、イランなどに輸出し、その研究開発を継続している。FINEX の研究開発は 1992 年から開始されているが、1988 年に開始された DIOS プロジェクトより 4 年遅れての開始である。DIOS のパイロットプラント建設が 1990 年から始まっており、日本である程度開発が進み、発展可能性があることが検証された後のことであった。DIOS が持っていた可能性が日本では生かされなかったが、韓国では受け入れられたのである。

このように「有望と思われた技術がなぜ企業によって選択されず、実用化に至らず、既存技術である高炉技術が主流技術として使用され続けられるのか」、これが本研究で問いかけた問題である。DIOS には高炉を代替凌駕し得るという可能性があったことを、当時の資料をもとに証明することを試みた。その結果、DIOS は技術的に高炉を凌駕し得る発展可能性が大きかったにもかかわらず、実用化技術として選択されなかったことが明らかとなった。

本節では、DIOS は技術的に有望なものであったことを前提に、終章の第1節本論の要約でまとめた三つの側面「DIOS の誕生」、「競争技術の発展」、「鉄鋼合理化計画の推進」を中心に、この三つがどのような相互関係を持っていたのか分析する。それをもとに DIOS が実用化されず、高炉技術が日本の主流製鉄技術として使用し続けられる理由を説明する。以下でそれぞれの関係を考察する。

1. DIOS と高炉技術

第一に、DIOS と高炉技術の関係である。DIOS が誕生した背景には高炉が従来から持っていた課題と時代の背景によりその課題が大きくなったことがあった。すなわち、高炉技術(競争技術)の課題によって DIOS が誕生したのである。逆に、DIOS も高炉技術の発展を促せるような作用をしていたと考えられる。高炉のエンジニアは、DIOS は高炉とは別の考え方であり、DIOS を競争技術として扱っていないと主張する。実際 DIOS 関連文献の多くは高炉技術の課題を説明しており、高炉代替技術として研究開発されていると記述しているが、SCOPE21 関連文献で DIOS を競合技術として言及しているものはほとんどない。しかし、製鉄技術の進歩や歴史を考察した論文の中で DIOS に言及しているものは 1988 年から 2014 年まで 25 件あり、その中で新日鐵所属の著者が書いた文献がその約半数の 11 件である⁴⁸。それら著者が PCI や DAPS, SCOPE21 などの技術研究に関わったかどうかは不明だが、新日鐵の企業内で DIOS 技術が認識されていたことは類推できる。また、25 件の文献の中で最も早く発表された 1988 年の論文は、当時新日鐵生産技術部所属の著者によるものであり、溶融還元製鉄が次世代の製鉄技術の主流を担うと記述していた [中川, 1988]。

⁴⁸ CiNii, Google Scholar

溶融還元製鉄, 溶融還元+DIOS, 製鉄+DIOS で検索し、重複や無関係なものを削除。内容確認し、製鉄技術発展関連, 溶融還元製鉄全般, DIOS に焦点を合わせた文献で区分。2016 年 8 月確認。

また、DIOS はナショナルプロジェクトとして行われたため、業界誌への記事も数多く掲載されており、一般新聞でも多く報道されていた⁴⁹。このように、DIOS が直接的に競争技術として高炉技術を刺激したかどうかは確認できないが、鉄鋼技術の学術雑誌や新聞記事に多く報道され、高炉の解決すべき課題がより明確なものになり、多くの人々から注目を集めるようになった(焦点化された)と推測できる。

要するに、1980 年代半ばの粗鋼生産量の減少によって、高炉は抱えていた課題の解決に直面することとなり、その方法として新技術の開発必要性が台頭した結果として DIOS プロジェクトが開始された。同時に、課題に直面したことは高炉技術自らの改良発展も促した。また、DIOS というナショナルプロジェクトが推進されたことは、高炉が持つ課題を業界内だけではなく一般にも広く知らせるような役割を果たし、解決をさらに加速させたのである。すなわち、高炉技術は DIOS の誕生に影響を及ぼしたが、それは結局、課題の焦点化という形で高炉技

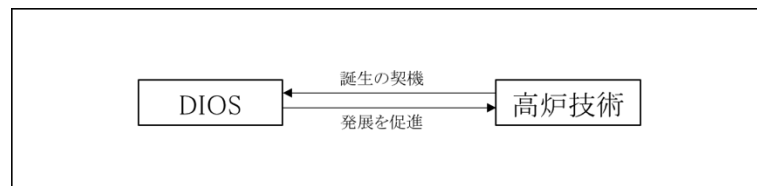
⁴⁹ 新聞記事数調査

・DIOS:1986～2007(キーワード:DIOS+鉄、熔融還元+鉄)の間、朝日新聞 28 件、日経テレコン 21(日本産業新聞、日経 MJ、日経金融新聞、日経地方経済面を含む)94 件、毎日新聞 17 件、読売新聞 9 件で、総計 148 件であった(2016.6.27 確認、)。

・SCOPE21:1993～2013(キーワード:SCOPE21、次世代コークス、新型コークス炉)の間、朝日新聞 6 件、毎日新聞 5 件、日経テレコン 36 件、読売新聞 5 件で、総計 52 件であった(2016.6.28 確認)。

・朝日新聞聞蔵ビジュアル(<http://database.asahi.com/>)、日経テレコン 21(一橋大学附属図書館専用端末)、毎索(<http://mainichi.jp/contents/edu/maisaku/login.html>)、読売新聞ヨミダス歴史館(<https://database.yomiuri.co.jp/rekishikan/>)

図 29 DIOS と高炉技術の関係



出所:筆者金作成

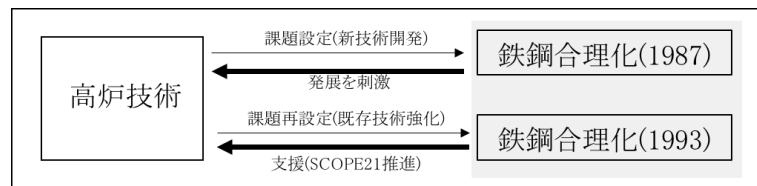
術自身の発展に寄与したのである。

以上で述べた「DIOS の誕生」と「高炉の改良改善の発展」の関係を図 29 に表す。

2. 高炉技術と鉄鋼合理化計画

第二に、「高炉技術の改良改善の発展」と「鉄鋼合理化計画」の関係である。1985 年のプラザ合意後円高が急速に進行したことにより、鉄鋼産業は危機的状況を迎えた。このことは 1987 年の合理化計画の推進をもたらした。合理化計画では設備のスリム化を徹底し、ナショナルプロジェクトとして DIOS を選定した。分析第一で述べたように、DIOS の推進は結局、高炉技術の発展を加速化させるようなものであった。すなわち、1987 年の合理化計画は、DIOS ナショナルプロジェクトを結成させ、業界内外に高炉が持つ課題を明確化させるような役割を果たし、結局のところ高炉技術の発展を刺激したのである。ここで急速に普及・開発された PCI, DAPS, 予熱炭装入技術といった様々な高炉技術は、1980 年代の半ばには大きな課題であった資源制約問題を大幅に緩和させ、コークス炉の寿命も大きく伸ばした。

図 30 高炉技術と鉄鋼合理化計画の関係



出所:筆者金作成

高炉が抱える課題が改善・解決されたことは、バブルが崩壊とさらなる円高が進む中で再び合理化計画が策定された時には、前回(1987)の合理化計画とは異なる課題を設定させた。すなわち、1987年には新技術の開発という課題を設定させたが、1993年には高炉を使用し続けながら高炉の課題を解決することが設定されたのである。それは、1987年以降高炉の改善改良技術が大きく発展した結果なのである。1993年の合理化では、DIOSのような新技術ではなく、新しいコークス炉技術である SCOPE21 を誕生させた。

以上で述べた高炉技術と鉄鋼合理化計画の関係を図 30 に表す。

3. DIOS と鉄鋼合理化計画

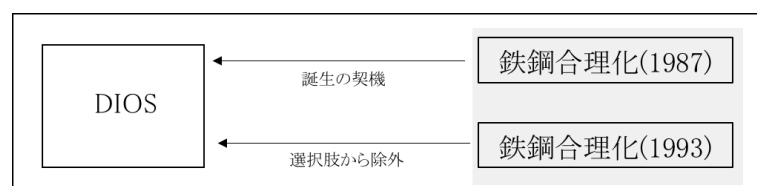
第三に、DIOS と鉄鋼合理化計画の関係である。分析第一と二で既に説明したように、1987年の合理化計画は DIOS を誕生させた。しかし、高炉技術の発展により、1993年の合理化計画の時には新技術(DIOS)の必要性が薄くなり、DIOSという選択肢は視界から消え去っていった。

合理化計画と同時に社会経済の変化も DIOS 消滅に影響を及ぼしていた。1985 年の円高・ドル安の進行は、鉄鋼産業だけではなく日本国内の他の産業にも危機をもたらした。そこで日本政府は 1980 年代末頃から内需拡大政策を徹底し、建設、造船、自動車産業など様々な鉄鋼関連産業の需要が大きく回復した。そのため、1 億トン以下を維持すると予想された粗鋼生産量は、1980 年代後半のいわゆるバブル経済の進展に伴って、1989 年から再び 1 億トン以上の水準に回復した。1987 年の鉄鋼合理化計画時点での需要減少予測、それに伴う設備のスリム化と高炉の小型化・小ロット化の探求は、内需拡大政策の結果、その必要性を失ってしまい、鉄鋼各社は設備稼働中止計画を大幅修正し、稼働中止になった設備の再稼働にも踏み切ったのである。さらに、中国など途上国への輸出増加もあり、鉄鋼産業は粗鋼生産の拡大を継続的に進めることとなったのである。

高炉技術の進展と国内外の鉄鋼需要回復、この2つの要因によって、1993 年の合理化計画では新技術より既存技術の改良改善がはるかに効率的であると判断されたのである。

以上で述べた DIOS と鉄鋼合理化計画の関係を図 31 に表す。

図 31 DIOS と鉄鋼合理化計画の関係



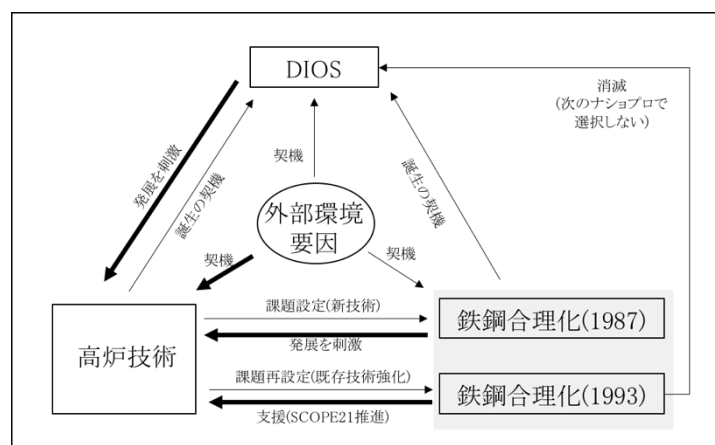
出所:筆者金作成

4. 3つの関係

これまで DIOS を取り巻く諸環境がどのように相互作用していたのかをそれぞれ説明した。

この分析を総括し表したのが図 32 である。同図の太文字の矢印は、DIOS 自体が高炉技術の発展契機になり、さらにその改良改善を刺激したことを表す。特に、高炉技術が持っていた課題は、DIOS の誕生に寄与していたことと同時に、自らの発展も促進していたことは強調しておきたい。高炉技術から合理化計画(1987)への矢印は、高炉の課題により新技術開発という課題を設定させ、DIOS を誕生させたが、それは結局自分(高炉)の発達に帰ってきたのである。そして高炉技術が目覚ましく発展したことは、鉄鋼合理化(1993)の時には、新技術の開発という課題ではなく、既存技術の強化を追求させるという課題の再設定をもたらした。DIOS の事例は既存技術を代替しうるような新技術が脚光を浴びることによって、逆に既存技術側がその欠陥を修正する研究開発を加速化するメカニズムを見せてくれるものと考えられよう。

図 32 DIOS と外部要素との相互作用



出所:筆者金作成

5. 考察

本研究で明らかになったことは、技術が社会の要請により生まれ、またその技術が選択されるということは、技術そのものの良し悪しだけではなく、それを取り巻く様々な要因によって選択される/されないということであった。特に、既存技術(高炉技術)を代替するような新しい技術(DIOS)が出現した時に、企業・産業界あるいは社会全体がどのような技術を選択する傾向にあるのかを明らかにする一つの手がかりになる事例である。

課題と認識されていた 1980 年代当時の高炉の欠陥は、1990 年代半ば以降には喫緊に解決すべき課題ではなくなっていたのである。このことは、単に時代や外部環境の変化だけで引き起こされた結果ではなく、高炉技術側が積極的に課題解決に取り組んだ結果でもあった。高炉技術は長年日本鉄鋼の発展を支え、既存インフラを多量保有しており、蓄積された操業ノウハウや熟練した多数のエンジニアをかかえていた。また、関連他社や顧客企業との関係が強固なバリューチェーンとして保持されていた。このような大きなメリットと既得権益を持っている主流技術に対して、生まれたばかりでバリューチェーンも形成されていない新技術は、「技術的発展可能性がある」ということだけでは、代替技術として選択されにくい。さらに逆説的なことには、代替技術の開発が進むに連れて、既存技術の技術限界点が焦点化され、その解決に向けて既存技術の改善改良が促進されるのである。

すなわち、高炉技術は、外部環境の変化や高炉を代替する技術のナショナルプロジェクト

が企画されたことによって、むしろその進化の度合いや開発速度が加速されたと考えられるのである。

また、以上の高炉製鉄法の改善技術である PCI 技術、予熱炭装入法、DAPS、SCOPE21 技術を国内で最初に導入したのは新日鐵であった。この事実が持つ意味は大きい。日本鉄鋼業界のリーダー企業として、新日鐵が進んで高炉の改善技術を導入・研究開発したことは、その他の企業行動にも大きな影響を与えたと予想される。実際に、PCI 技術は新日鐵の導入以降、他企業においても急速に導入・普及され、稼働中の高炉に 100%導入されるまで至った。

SCOPE21 に関しても、新日鐵による初実用化の意味は深く、国内の高炉・コークス炉が飽和状態にあったのにもかかわらず、その実用化を成功させたことは、新日鐵が今後も高炉技術を継続的に使用するという強い意志の表明である。

新日鐵が高炉技術の継続的使用および改良研究開発に意欲的に取り組んだことは、数多くの高炉設備を保有していた新日鐵にとっては当たり前のことであった。高炉の基数で見れば、新日鐵の高炉所有数は、1980 年に 16 基、1985 年に 15 基、1990 年に 11 基、1995 年に 9 基と減少しつつあるものの、日本最大であった。一方、DIOS のプロジェクト幹事企業だった NKK の場合、1980 年に 7 基、1986 年以降 2003 年に JFE として合併するまで 6 基と、新日鐵の約半数に過ぎなかった⁵⁰。このことは、もし脱高炉技術が技術の主流になった場合、最も

⁵⁰ 高炉基数は[鉄鋼統計要覧、各年]より推計。

大きな打撃を受けるのは新日鐵であったことを示している。

実際に、新日鐵は常に高炉技術に強く拘ってきた。それは業界のリーダーであった新日鐵がナショナルプロジェクトの DIOS の時には主導権を握らなかったことから伺い知ることができる。筆者が行ったインタビューの中で新日鐵の鈴木氏は以下のように述べていた。

我々はやっぱり DIOS なんてやれないなんて、DIOS をしても意味がないという結論を出した上で、うちが主導権を握らなかったというのも多分あると思うんですけどね。経緯としては。それは本当に穴の探り合いみたいになっているので、逆に JFE はそれやりたいと思っていたのかも知れないですね。強く思ってた、委員長になったり、自分たちが率先してやったり、そういう政治的な儲けもあると思うんですよ⁵¹。

また、鉄鋼需要減少に関しても、新日鐵のエンジニアは「小型・小ロット化」や「稼働柔軟性」という面より、設備投資に対する懸念が大きかった。

今後の生産量が見通せない今のような時には、一旦は設備投資を最小限に抑えるために既存インフラの延命を選択する。大規模な設備改造や新技術導入は周りのインフラとの関係や環境を考えなければならない。溶融還元は、これまで調査や経済性評価は行った。社内の生産構造を変化する様なレベルの企画は、経営含め、全社レベルで議論し、リスクを考慮し投資判断する⁵²。

以上のように、新日鐵は保有しているインフラや取引先のコークス会社との関係など、バリューチェーンを保ちながら、最大の効率を出すために製鉄技術を研究開発することに必死に勤めたのである。その結果、DIOS プロジェクトが終わる頃には、高炉においても微粉炭が使

⁵¹ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

⁵² 前掲インタビュー(2016. 8. 24)

用できるようになり、コークス炉の寿命もはるかに長くなった。コークスの寿命は、1980 年代には約 30 年と言われていたが、現在コークス炉は既に 30 年を超えて稼働しており、45 年さらには 50 年までにも延長できるといわれるようになった [明田, 1989, p. 859], [滝順, 2010]⁵³。

それでは、序章で取り上げていた DIOS の二つの謎(①ナショナルプロジェクトにもかかわらず、そのプロジェクトに関する十分な説明がなされていない、②入手可能な少数の文献においては非常に高い評価がなされている)に戻る。本節の分析で明らかになったように DIOS は有望な技術であったが、様々な外部要因により高炉技術が目覚しい発展を遂げていたこと、そして既存技術が新技術で解決しようとしていた課題を解決できるようになった場合は関連会社との関係やバリューチェーンの故に選択されなくなる。このことは、DIOS の二つの謎で取り上げていた、非常に高い評価がなされていることにもかかわらず実用化されていないことに対する答えになり得る。また実用化されなかった故に失敗技術として扱われ、その評価記述が正確に残されていることも謎①に対する一つの説明である。しかし、ここにはもう一つの隠された理由があったと考えられる。

それは、第 1 章第 2 節 DIOS 小史で取り上げた DIOS の初期デザインと大きな関連があ

⁵³ 日本経済新聞電子版(2016. 12. 25 確認)

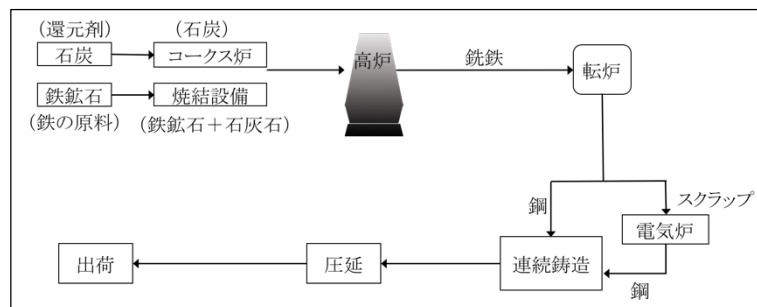
http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1002T_R10C10A5000000/?df=2

る。すなわち、DIOS の基本的考えには、①溶融還元炉は転炉技術を転用すること、②エネルギー面でも高炉法に置き代わることを前提にするものであった。ここで転炉技術を転用したという前提は DIOS の文献が詳細に書かれていない理由の大きなヒントであった。日本の大型一貫高炉の流れは、「製銑－製鋼(転炉と電気炉)－連続铸造－圧延－出荷」と図 33 のようなプロセスである。ここで、転炉は、銑鉄を作った以降の製鋼工程なのである。最終的に製品の品質にかかわる技術は製銑工程より製鋼工程にかかっている。例えば、東京工業大学の小林教授は、

(DIOS と、筆者)高炉との違いは形だけの問題なので、純度が悪くてもあとは(転炉での、筆者)製錬で何とかできますので。粉鋼とか粉炭とか、そういったものを使ったからといって、質が悪い鉄ができるわけでは多分ないと思うんですね。そこでできた溶銑はちゃんとした製錬をすればきれいなものができるので。相当いい鉄を安い原料から作られてしまうという⁵⁴。

と、製品の品質は転炉以下の工程により対応可能であることを述べていた。

図 33 一貫製鉄の流れ



出所: 日本鉄鋼連盟 HP より修正作成 (<http://www.jisf.or.jp/kids/shiraberu/index.html>)

⁵⁴ 前掲インタビュー (2016. 5. 29)

また、新日鐵の鈴木氏は、DIOS に関する資料があまり見当たらない理由を尋ねた時に

「製鋼ですからね、それは製鋼技術なので」と語っていた。

業界の製品化の技術ってやっぱり難しいんですよね。製鋼、圧延というのはやっぱり、製鉄というのはどの設備を使ってどんなものを使っているのかとか大体わかるんじゃないですか。要は、使ったもので、溶銑だけ出すじゃないですか。この中では、クローズドになって、一つの技術を競い合っているだけなので。製鋼とか圧延というのは、製品まで関わって、お客様に影響が行くので、その技術は絶対開放しないですよ。もう商品になってしまうので。Fe はどうでもいいです。Fe はどんどん出すので。Fe からどう作っていくかが本当に些細な技術でも特許化されていて、売れる売れないのわけですよ。絶対隠す⁵⁵。

この発言からも DIOS の技術内容は製鋼技術にかかる部分が多かったことが読み取れる。

第3節 理論的考察

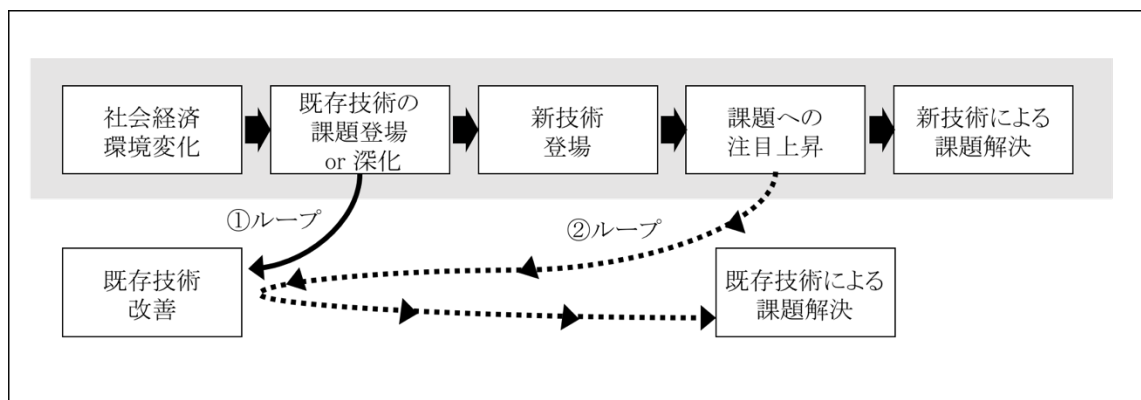
本研究の考察は日本鉄鋼産業における溶融還元製鉄のナショナルプロジェクトであった DIOS が多くの期待の中で開始され、高炉を凌駕し得るとの評価をされながらも、日本の国内において実用化されなかった理由を探りながら、技術選択のメカニズムに一定の解釈を得ようという試みであった。本研究による考察が他の事例においても当てはまるとは限らないが、技術選択がどのように行われるのかというメカニズムに対する一つの可能性を提示するものであると考える。

⁵⁵ 前掲インタビュー(2016. 10. 26)

図 34 は、技術課題が解決されるプロセスをシンプルに描いたものである。太字の矢印は、社会経済環境の変化あるいは悪化が既存技術の課題を明確化し、そのことによって新技術が登場する単線的(リニア)なメカニズムを表している。もちろん、課題の明確化によって既存技術も改善改良に努めようとする①ループが存在するが、その改善スピードは緩やかである。しかし、新技術が登場し、それがナショナルプロジェクトなどとして大きな注目を集めるようになると、既存技術の改善改良は加速化されていく②ループという発展形態となる。

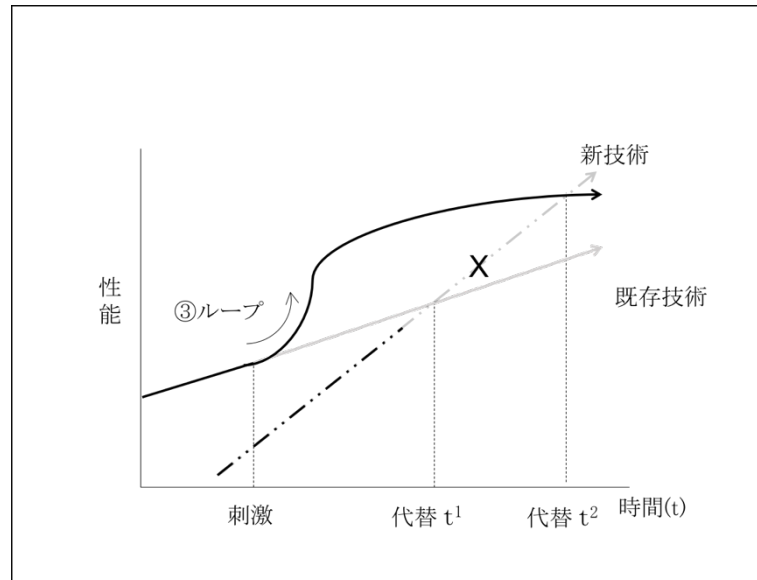
ただし、図 34 のモデルでは、既存技術と新代替技術の間にあるダイナミックな相互作用が理解できない。そこで、図 35 でそのダイナミズムを描いてみた。

図 34 技術課題解決のプロセス



出所:筆者金作成

図 35 既存技術の発展



出所:筆者金作成

図 35 で太字の矢印は、既存技術の漸進的(インクリメンタル)な発展傾向を表すものである。既存技術は図 34 でも述べたように、何の刺激がなくても右肩上がりで改善していく。しかし、その中で何らかの刺激が与えられると、その改善傾向を右肩上方に加速するのである(③ループ)。そのため、新技術の代替ポイントを t_1 から t_2 へ遅延させることとなる。しかし、③ループの改善が急角度で上昇すると、強固なバリューチェーンを抱え慣れ親しんだ既存技術の魅力度が再び脚光を浴び、新技術の開発がストップしてしまう可能性も出てくるのである(X印)。図 35 で点線が途中から薄くなってしまうが、それはある時点で新技術の開発がストップし、既存技術を凌駕する可能性を失ってしまうことを表す。

この開発の速度が持つ意味をクリステンセン[クリステンセン, 1997]の破壊的イノベーション

ンの理論と関連付けて考えれば、図 34 の②フィードバック・ループがより理解しやすくなる。その前にここでクリステンセンの議論を概略しておこう。

クリステンセン(1997)は、業界をリードしていた企業がある種の市場や技術の変化に直面した時、業界のリーダーとしての地位を失ってしまう現象に着目した。このようなリーディング・カンパニーは、競争感覚に鋭敏で、顧客の意見に注意を深く傾け、新技術に積極的に投資したことにもかかわらず地位を守ることができないのである。クリステンセンは、こうした優れた経営こそが業界リーダーの座を失わせる最大の理由であると、逆説的に主張した。これらの企業は、顧客の意見に積極的に反応し、顧客が求める製品を増産し、改良するために新技術に積極的に投資し、市場の動向を注意深く調査し、システムティックに最も収益率の高そうなイノベーションに投資配分する。だからこそ、リーダーの地位を失うというジレンマの実態を生き生きと描いたのである。

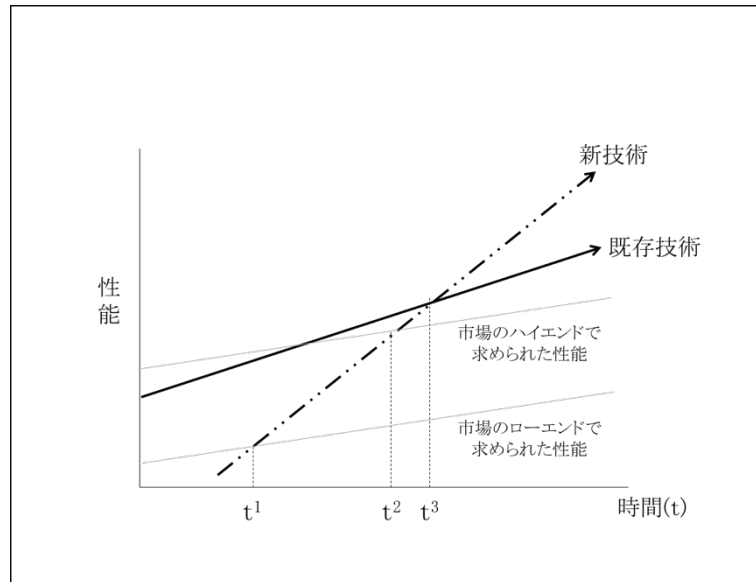
クリステンセンは、顧客の意見に耳を傾け、初期には性能も収益率も低い製品への投資を回避していると、将来的に大きく成長するイノベーション機会を逃すことになる、と指摘した。それが「破壊的イノベーション法則」である。同研究では、製品の性能を高める技術のことを「持続的技術」と呼び、短期的には製品の性能を引き下げる効果を持つイノベーションのことを「破壊的技術」と命名したのであった。

既存のリーダー企業が失敗する構造を三つの要素から説明した。第一に、破壊的技術を

利用した製品は通常、低価格、シンプル、小型で、使い勝手が良い場合が多い。破壊的技術は、一般的に主流市場では既存製品の性能を下回るが、主流から外れた少数の新しい顧客に評価される特徴がある。第二に、技術革新のペースが時に市場の需要のペースを上回り、企業が市場を追い抜いて企業間競争に勝つために価格や利益率を高めようとする事が起こることである。この時、リーダー企業は顧客が求める以上の製品あるいは顧客が対価として支払おうとする以上のものを提供してしまう。一方、破壊的技術は現在の市場では需要ニーズを下回る性能かもしれないが、将来には十分な競争力を身につける可能性を持っている。第三に、リーダー企業が破壊的技術に投資しない理由は、破壊的技術は当初最も収益性の低い顧客に受け入れられることが多いためである。利益率の高い上流顧客の意見に耳を傾け、収益性と成長率を高めようとするリーダー企業が利益率の低い破壊的技術に投資しないのは極めて合理的な意思決定なのである。

これを図式化すると、下の図 36 のようになる。すなわち、破壊的新技術は t^1 市場のローエンドで求められた性能を達成し、主流市場ではないが、新しい市場を開拓するようになる。その後開発のスピードを加速し、 t^2 の時点では既存の主流技術市場で求める性能を達成する。さらに t^3 になれば、既存技術の性能を凌駕するまでの性能を身につけるようになるのである。

図 36 破壊的イノベーション理論



出所:[クリステンセン, 1997]より筆者金作成

図 35 は、図 36 のクリステンセンの破壊的イノベーション論で述べられた既存技術のインクリメンタルな発展速度が新技術の登場によってその速度を加速する③ループを表すものである。既存技術は図 32 でも述べたように、何の刺激を与えなくても改善していく。しかし、その中で何らかの刺激が与えられると、その改善速度が加速されるのである。DIOS の事例の場合、その刺激はナショナルプロジェクトとして選定され、業界の内外から多くの注目を浴びるようになり、高炉が抱えていた課題が焦点化されたことである。

図 34 と 35 を DIOS の事例で説明するなら、オイルショックや円高危機という社会経済の悪化により、高炉の資源利用の限界やコークス炉の老朽化問題、鉄鋼需要減少による高炉の小

型化・小ロット化の必要性が深化した。そのことによって DIOS という新技術が登場し、ナショナルプロジェクトとして研究開発されるようになり、新聞や業界誌などで大きく注目を集めるようになった。その結果、高炉が持っていた課題は、外部環境の変化に加えて新技術の登場によって、より明確かつ重要な問題として焦点化された。そこで刺激を受けた高炉技術は、PCI 技術の普及に拍車をかけ、予熱炭装入法や DAPS などといった既存技術の改良改善を加速化した。その結果として SCOPE21 という斬新的だが大きな性能向上を実現する技術が実用化されたのである。

結局のところ、新技術によっても既存技術によっても課題は解決される方向に進化するが、既存技術の改良改善には強固なバリューチェーンや蓄積ノウハウ、多数のエンジニア、既存インフラを利用できるため、新たに設備費用をかけた技術体系の構築をしなくても済む。その結果、バリューチェーンも確立されていない新技術は採用されなくなり、既存技術はその地位をさらに強固にしていくのである。また、新技術はまだ性能が整えられていないため、既存技術の性能や規模の面でも追いかけることが困難である。したがって、既存技術が大幅な課題解決を達成すると、代替技術は例え有望な技術であっても、実用化技術として採択されず、研究開発も中断されてしまうのである。

DIOS の事例でも、新日鐵のエンジニアや研究者とのインタビューで、規模の問題や既存インフラとの関係、取引先のコークス会社との関係などを理由に、DIOS が選択されることは難しかったと述べられていた。

しかし、漸進的な技術進歩では、先進国における少量多品種生産や有限資源である炭素原料有限性といった抜本的課題は解決されず、長期的には温存されたままになる。したがって、図 35 に示されるように代替時期が t^1 に延長されても、既存技術の改善改良が停滞した t^2 の時点は代替される可能性が残っている。

第 4 節 結論と本論文の限界

1. 結論

本研究は、日本鉄鋼産業における溶融還元製鉄のナショナルプロジェクトであった DIOS プロジェクトがなぜ実用化されず、高炉技術が継続的に製鉄技術の主流を担い続けられているのかを明らかにするものであった。その結論として導かれたことは外部環境の変化により高炉技術の課題がより明確かつ深刻化され、DIOS という新しい技術が計画・開発されるようになったが、同時に既存技術による高炉技術の改善、新しい技術の開発が迅速に行われた。その時既存技術は、確立されたインフラ、エンジニアなど既存の経営資源との関係やバリューチェーンを持っているため、新技術の選択は行われず、その技術は将来の可能性を駆逐されてしまったのであった。

このことは新技術が現れた時に既存技術との間でどのように技術選択が行われるのかというメカニズムの一つの可能性を提示するものであった。新しい技術の登場は、既存技術が持っていた課題をより焦点化させ、その開発を加速させる可能性を持つ。その結果、新技術が有

望な技術であっても既存インフラやバリューチェーンを保有する既存技術が選択されるのである。

2. 本研究の限界

本研究で行った分析は、DIOS という単一事例を扱っており一般化することが難しい。また、溶融還元製鉄が注目された世界的流れは見ているが、具体的内容に関する考察は行っておらず、日本の中での環境変化や技術選択しか分析していない。今後、FINEX という溶融還元製鉄技術の実用化に成功した韓国との比較を通じて両国が置かれた社会経済環境や企業内部の事情などを比較することで、技術が社会の中でどのように確立されていくのかという考察も必要である。それ以外に、1970～1980 年代に溶融還元製鉄に力を注いでいたドイツやスウェーデンでは現在どのような状況になっているのか、また中国やインドなどの開発途上国における導入の可能性に関しても考察が必要であろう。

本研究の最後にクリステンセンの破壊的イノベーション理論を用いて考察を行ったが、クリステンセンは、失敗の事例を扱うために歴史の変遷が速い業界の歴史を分析した。それに比べて、本研究では鉄鋼産業、その中でも何百年の歴史を持つ製鉄技術の事例を分析している。そのため、長い鉄鋼産業の歴史を考えれば、同技術が失敗事例として扱われることは早計かも知れない。

最後に、本研究の対象である DIOS プロジェクトに直接携わった人とのインタビューができ

ていなかったため、文献調査で当時の認識を把握することには限界があった。今後さらなる資料の入手とともに、本当に当時の関係者が物理的にいなくなる前に、今事例の検証ができることを望んでいる。

インタビューの記録

小林能直教授, 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授, 2015 年 5 月 29 日.

坪田賢亮氏, 現ツボタデザイン代表, 元神戸製鋼所メタラジスト, 2015 年 6 月 8 日.

本田貴之氏(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 生産技術部 生産技術室長), 田中繁三氏(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 製鉄部 コークス技術室長), 本田基樹氏(新日鐵住金株式会社 大分製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主幹), 2016 年 8 月 24 日.

鈴木豊氏, 新日鐵住金 製鉄技術部コークス基盤推進部 コークス技術室長, 2016 年 10 月 26 日.

参考文献

明田莞(1989)「高炉への微粉炭吹き込み(PCI)技術」『燃料協会誌』68[10], pp. 858-866.

浅井滋生, 佐藤彰, 数土文夫(1999)「特集 新時代を切り開く鉄鋼技術一鼎談 21 世紀も続く鉄の時代」『鉄鋼界』49[2], pp. 4-11.

足立芳寛(1989)「21 世紀を展望した鉄鋼技術政策の展開」『鉄鋼界』39[10], pp. 36-41.

阿部亭, 田村節夫, 森本浩太郎, 坂本雄二郎, 鈴木富雄(1988)「高炉への微粉炭吹き込み燃焼技術の開発」『日本機械学会誌』89[810], pp.474-475.

石川泰(1985)「日本におけるコークス炉の管理技術について」『鉄鋼界』35[11], pp. 29-34.

石黒守幸(2009)『平成 20 年度経済連携促進のための産業高度化推進事業(鉄鋼分野におけるインドネシアへの連携協力(DIOS 等)事業)報告書』日本鉄鋼連盟.

伊丹敬之、伊丹研究室(1997)『日本の鉄鋼業 なぜ、今も世界一なのか』NTT 出版株式会社

稲葉晋一, 八木順一郎(1992)「高炉への微粉炭吹き込み技術の現状」『鉄と鋼』78[7], p.243.

加藤健次(2009)「次世代コークス製造プロセス(SCOPE21)石炭利用の最新技術と展望」シーエム

シー出版, pp.193-202.

加藤健次(2010)「次世代コークス製造プロセス(SCOPE21)の開発と導入」『日本エネルギー学会誌』89[1], pp.2-6.

加藤俊彦(2011)『技術システムの構造と革新－方法論的視座に基づく経営学の探究』白桃書房.

金森健(1991)「インタビュー 順調に進む新溶融還元法の共同研究」『鉄鋼界』41[3], pp. 50-55.

金森健, 有山達郎(1995)「新製鉄法への始動」『鉄と鋼』81[4], pp. 282-284.

上岡一史(2005)『戦後日本鉄鋼産業のダイナミズム』日本経済評論社.

唐津一(1998)「特集・21世紀のものと鉄鋼業 絶対不敗の技術力で前途を開拓」『鉄鋼界』48[1], pp. 14-17.

川崎勉(1982)『日本鉄鋼業－その軌跡－』鉄鋼新聞社.

川端望(2005)『東アジア鉄鋼業の構造とダイナミズム』ミネルヴァ書房, pp.101-143.

菊池悠二(1995)「90年代の通貨問題」『鉄鋼界』45[7/8], pp. 16-21.

北川融(1995)「特集・多様化する鉄源プロセス 粗鋼生産プロセスと鉄源」『鉄鋼界』45[2], pp. 27-36.

北川融(2002)「溶融還元製鉄法開発の現況」『鉄と鋼』88[8], pp. 430-443.

木村成人(1989)「インタビュー2 年目を迎えた溶融還元共同研究事業」『鉄鋼界』39[4], pp.42-49.

クレイトン・クリステンセン(2001)『イノベーションのジレンマ－技術革新が巨大企業を滅ぼすとき』増補改正版, 玉田俊平太監修, 伊豆原弓訳, 翔泳社.

古跡隆一郎(1987)「経済白書と鉄鋼業」『鉄鋼界』37[10], pp. 34-35.

斎藤健(1988)「昭和 63 年度経済の見通しと課題」『鉄鋼界』38[1], pp. 15-19.

坂輪光弘(1995)「新コークス製造技術の展開 (21 世紀に向けて—鉄鋼技術 10 年の軌跡 ; 製鉄)」『鉄と鋼』81[4], pp. 261-263.

坂輪光弘, 古牧育男, 山口一郎(2002)『叢書鉄鋼技術の流れ;第 2 シリーズ 第 12 巻石炭・コークス』日本鉄鋼協会.

産業構造審議会(2005)『「石炭高度転換コークス製造技術の開発」SCOPE21 事後報告書(案)』産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会.

渋谷悌二(1990)「日本における製鉄関連技術の最近の開発状況と将来の展望」『鉄鋼界』40[11], pp. 34-43.

新エネルギー産業技術総合開発機構(2006)『日本のクリーン・コール・テクノロジー:石炭分野における技術革新を目指して』新エネルギー産業技術総合開発機構, 石炭エネルギーセンター.

新日本製鉄(2008)「特集 次世代コークス製造技術」『NIPPON STEEL MONTHLY』10, pp. 1-8.

十名直喜(1996)『鉄鋼生産システム—資源, 技術, 技能の日本型諸相—』同文館出版.

高松信彦, 栗原喜一郎, 圃中朝夫, 斎藤元治, 加来久典(2011)「製鉄技術開発のあゆみと今後の展望」『新日鐵技報』Issue 391, pp. 79-87.

武石彰, 青島矢一, 軽部大(2012)『イノベーションの理由 資源動員の創造的正当化』有斐閣.

武富洋文(1999)「特集 新時代への鉄づくり 次世代コークス製造技術の開発 SCOPE21 の概要と研究の進捗状況」『金属』69[6], pp. 31-36.

田村節夫, 多田彰吾(1983)「高炉微粉炭吹込み技術の開発と展望」『鉄鋼界』33[10], pp. 68-75.

田中英年(2008)『最近の新製鉄法の動向と今後の展望. 鉄鋼原料の動向と製鉄技術の新展開』日本鉄鋼協会.

W.ブライアン・アーサー(2011)『テクノロジーとイノベーション 進化/生成の理論』有賀裕二監修,

日暮雅通訳, みすず書房.

通商産業省基礎産業局 監修(1987)『新世代の鉄鋼業に向けて』通産資料調査会.

槌谷暢男, 浜田尚夫, 稲谷稔宏(1983)「新技術解説 新製鉄法の開発と展望」『鉄鋼界』33[6], pp. 46-53.

戸田弘元(1984)『現代世界鉄鋼業論』文眞堂.

戸田弘元(1987)『シリーズ 世界の企業 鉄鋼業』日本経済新聞社.

戸田弘元(1987)「特集・鉄鋼業の環境変化と今後の課題—21 世紀新産業に挑戦する日本鉄鋼業」『鉄鋼界』37[7], pp. 16-37.

富浦梓(1996)「溶鋼製造の選択肢: プロセス選択の戦略 プロセスの特徴とその戦略的評価」『鉄鋼界』46[11], pp. 25-33.

富浦梓(2000)「20 世紀の鉄鋼業技術と 21 世紀へのメッセージ」『鉄鋼界』50[12], pp. 7-12.

成田貴一(1985)「新技術解説 新しい製鉄・製鋼法—直接還元および熔融還元技術—」『鉄鋼界』35[11], pp. 68-75.

中島一郎(1990)「「2020 年日本鉄鋼業大胆予測アンケート」調査結果」『鉄鋼界』40[4], pp. 42-49.

西岡邦彦(1996)「次世代コークス技術の展望」『日本エネルギー学会誌』75[10], pp. 899-907.

西岡邦彦, 大島弘信, 杉山勇夫, 藤川秀樹(2004)「次世代コークス製造技術(SCOPE21)の開発」『鉄と鋼』90[9], pp. 614-619.

日本鉄鋼協会第 5 版鉄鋼便覧委員会 編(2014)『鉄鋼便覧 第1巻(製鉄・製鋼)』日本鉄鋼協会.

日本鉄鋼連盟(1983)「[特集]昭和 57 年の日本鉄鋼業」『鉄鋼界』33[5], pp. 2-98.

日本鉄鋼連盟(1984)「第 1 部(総論)」『鉄鋼界』34[5], pp. 2-5.

日本鉄鋼連盟(1986)「[特集]昭和60年の日本鉄鋼業」『鉄鋼界』36[5], pp. 2-90.

日本鉄鋼連盟①(1987)「競争力ある経営基盤確立へー鉄鋼6社が抜本合理化案を発表」『鉄鋼界』3, 37[3], pp. 61-68.

日本鉄鋼連盟②(1987)「《インタビュー》鉄鋼の重要な役割変らず / 通商産業省 基礎産業局長 鈴木直道」『鉄鋼界』37[7], pp. 2-7.

日本鉄鋼連盟①(1988)「インタビュー 特集・明日をめざす鉄鋼業の技術 鉄鋼業の次世代技術を考える」『鉄鋼界』, 38[2].pp. 2-11.

日本鉄鋼連盟②(1988)「国内トピックス:連盟溶融還元法の共同研究事業に着手」『鉄鋼界』38[2], p. 58.

日本鉄鋼連盟③(1988)「新春社長座談会 鉄鋼業の課題と展望 鉄鋼業の再構築に向けて」『鉄鋼界』38[1], pp. 9-10.

日本鉄鋼連盟④(1988)「対談 鉄鋼業次世代技術の開発に向けて / 通商産業省 鈴木直道 ; 川崎製鉄 八木靖浩」『鉄鋼界』38[4], pp. 2-9.

日本鉄鋼連盟⑤(1988)「特集・鉄鋼連盟創立40周年記念 対談 鉄鋼技術の展開と素材開発」『鉄鋼界』38[12], pp. 3-12.

日本鉄鋼連盟(1989)「特集・経済環境と鉄鋼業の展望」『鉄鋼界』39[1], pp. 2-25.

日本鉄鋼連盟①(1990)「業界動向 設備・技術:技術開発」『鉄鋼界』40[5], pp.41-45.

日本鉄鋼連盟②(1990)「国内トピックス:通産省内に「鉄鋼設備技術研究会」を設置」『鉄鋼界』40[6], p. 55.

日本鉄鋼連盟①(1991)「特集 鉄鋼業の環境と新年の展望 鉄鋼経営環境と新年の課題」『鉄鋼界』41[1], pp. 2-21.

日本鉄鋼連盟②(1991)「設備・技術」『鉄鋼界』41[5], pp. 41-45.

日本鉄鋼連盟③(1991)「溶融還元 DIOS パイロットプラント建設に着工」『鉄鋼界』41[6], pp. 54-57.

日本鉄鋼連盟④(1991)「巻頭言 溶融還元研究開発 パイロットプラントの起工」『鉄鋼界』41[7], p. 1.

日本鉄鋼連盟①(1993)「高炉 4 社の抜本合理化案」『鉄鋼界』43[7], pp. 64-71.

日本鉄鋼連盟②(1993)「DIOS パイロットプラントが完成」『鉄鋼界』43[10], pp. 42-43.

日本鉄鋼連盟①(1994)「新年社長座談会 特集・鉄鋼業をめぐる環境と新年の課題 新年の鉄鋼経営課題 経済構想変革の中で積極的な需要開拓を」『鉄鋼界』44[1], pp. 2-14.

日本鉄鋼連盟②(1994)「国内トピックス:鉄鋼連盟,「石炭高度転換コークス製造技術調査研究委員会」を新設」『鉄鋼界』44[3], p. 63.

日本鉄鋼連盟③(1994)「高炉 5 社の合理化計画の見直し」『鉄鋼界』44[6], pp. 33-40.

日本鉄鋼連盟①(1996)「月間の動き 鉄鋼連盟「次世代コークス製造開発委」を発足」『鉄鋼界』46[2], pp. 64-65.

日本鉄鋼連盟②(1996)「溶融還元製鉄法(DIOS)の共同研究を終えて」『鉄鋼界』46[6], pp. 30-36.

日本鉄鋼連盟①(1997)「環境に優しい次世代鉄鋼技術 溶融還元製鉄法」『鉄鋼界』47[11], p. 11.

日本鉄鋼連盟②(1997)「次世代コークス製造技術(SCOPE21=Super Coke Oven for Productivity and Environment enhancement toward the 21st century)」『鉄鋼界』47[11], p. 12.

日本鉄鋼連盟(2001)「JISF Now SCOPE21 パイロットプラント鋳入式」『鉄鋼界』51[7/8], pp. 32-33.

日本鉄鋼連盟 技術管理部(1994)「「石炭高度転換コークス製造技術」(次世代コークス炉)調査研究について」『鉄鋼界』44[7/8], pp. 59-61.

日本鉄鋼連盟 原料部①(1988)「特集 共同研究に入る溶融還元製鉄法 溶融還元共同研究体制」『鉄鋼界』38[4], pp. 2-14.

日本鉄鋼連盟 原料部②(1988)「特集 共同研究に入る溶融還元製鉄法 溶融還元製鉄技術の開発状況」『鉄鋼界』38[4], pp. 15-21.

日本鉄鋼連盟 実施委員会(1993)「特集・21世紀の鉄鋼技術 鉄鋼技術トピックス(1)溶融還元製鉄法」『鉄鋼界』43[4], pp. 43-47.

日本鉄鋼連盟エネルギー対策委員会省エネルギーWG(1990)「特集・エネルギーの長期展望と鉄鋼業 鉄鋼業における省エネルギー対策」『鉄鋼界』40[7], pp. 19-35.

ニークビスト オルバル(1986)「溶融還元による製鉄法 (Alternative Routes for Iron and Steelmakin)」『鉄鋼界』36[11], pp. 26-32.

野間文雄(1992)「技術解説 高炉への微粉炭吹込み (PCI) 技術」『鉄鋼界』42[10], pp. 45-50.

羽田道春(1999)『叢書 鉄鋼技術の流れ 第1シリーズ 第1巻 高炉製鉄法—高炉のたゆまざる発展の系譜—』日本鉄鋼協会監修, 地人書館.

林洋一(1984)「新技術解説 溶融還元製鉄法開発の現状と今後の課題」『鉄鋼界』34[6], pp. 72-77.

藤木完治(1982)「我が国における還元鉄利用の展望と課題—通商産業省還元鉄利用研究会における検討結果—」『鉄鋼界』32[8], pp. 44-52.

藤田昭夫, 男澤一郎, 王健鋼, 森脇重人, 美土代研究会(2014)『シリーズ 企業・経営の現場から 3 日本鉄鋼業の光と影』勁草書房.

三浦隆利(1999)「特集記事 4 次世代コークス炉技術と環境保全」『ふえらむ』4[6], pp. 25-29.

宮崎富雄(1992)「溶融還元製鉄法の開発と現状」『鉄と鋼』78[2], pp. 1238-1249.

米倉誠一郎(1992)「第 4 章 戦後の大型設備投資」『ビジネスマンのための戦後経営史入門:財閥買いたいから国際化まで』森川英正編, 日本経済新聞社, pp. 86-110.

米倉誠一郎(1999)『経営革命の構造』岩波書店.

溶融還元研究開発委員会 実施委員会(1991)「溶融還元共同研究 要素研究の成果と今後の取り組み」『鉄鋼界』41[3], pp. 56–62.

レオナード・H・リン(1986)『イノベーションの本質』東洋経済新聞社.

Amit Chatterjee, 1994, *Beyond the Blast Furnace*, Florida: CRC Press.

Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes, Trevor Pinch, 2012. The Social Construction of Facts and Artifacts, *The Social Construction of Technological Systems – New Directions in the Sociology and History of Technology*. anniversary edition, Massachusetts: MIT Press, pp. 11–44.

Claton M. Christensen, 1997, *The Innovator's Dilemma: When New Technologies cause great firms to fail*, Massachusetts: Harvard Business School Press.

Yonekura Seiichiro, 1994. *The Japanese Iron and Steel Industry: Continuity and Discontinuity 1850–1990*, London: Macmillan.

이종민, 박명섭, 2010. 기술혁신 기반의 전략적 변화: POSCO 의 FINEX 기술개발, *Korea Business Review*, 14[1], pp.157–176.

Lee Jongmin, Park Myeongseob, 2010. 技術革新基盤の戦略的变化: POSCO の FINEX 技術開発, *Korea Business Review*, 14[1], pp.157–176.

統計資料

資源エネルギー年鑑編集委員会編 『資源エネルギー年鑑』 通産資料出版会.

資源エネルギー庁石炭部監修 『コール・ノート』 石炭エネルギーセンター.

日本鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会編 『鉄鋼統計要覧』 日本鉄鋼連盟.

日本鉄鋼連盟 『鉄鋼受給統計月報』.

<http://www.jisf.or.jp/data/tokei/index.html> (2016.10.21 最終確認)

燃料協会コークス部会 編 『コークス・ノート』 燃料協会コークス部会.

World Steel Association, *Steel Statistical Yearbook*.

<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/Steel-Statistical-Yearbook-.html>

データベース

朝日新聞聞蔵ビジュアル <http://database.asahi.com/>

日経テレコン 21 (一橋大学附属図書館専用端末から接続)

毎索 <http://mainichi.jp/contents/edu/maisaku/login.html>

読売新聞ヨミダス歴史館 <https://database.yomiuri.co.jp/rekishikan/>

CiNii <http://ci.nii.ac.jp/>

Google Scholar <https://scholar.google.co.jp/>

J-GLOBAL <http://jglobal.jst.go.jp/>

Thomson Innovation (一橋大学イノベーション研究センターから接続)

インターネット

日本経済新聞電子版 (2016. 12. 25 確認)

http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1002T_R10C10A5000000/?df=2

日本鉄鋼連盟ホームページ

<http://www.jisf.or.jp/kids/shiraberu/index.html>