

Hi-QIP プロセスの開発過程

鈴木 修

(一橋大学大学院商学研究科博士後期課程)

Oct 2007

No.65

Hi-QIPプロセスの開発過程¹

I. Hi-QIPプロセスとは何か

Hi-QIPプロセスはJFEスチール(旧, 川崎製鉄)が開発, 事業化中の粒鉄製造プロセスである。High Quality Iron Pebbleプロセスの略で, 高炉鉄に匹敵する高純度の鉄を直径 20~40mmの基石状の粒鉄として産出する製鉄プロセスである。使用設備は回転炉床炉 (RHF, Rotary Hearth Furnace)である。炉温 1,500°Cの炉内で粉鉱石と粉状の一般炭(炭材粉)との混合粉が輻射加熱され, 10~20 分程度で還元反応・溶融が起こり粒鉄とスラグが分離される。原料を粉状のまま加熱するため, 高炉で必要となる焼結炉, コークス炉等が不要なコンパクトな設備で済む。設備投資負担も軽微で, 同水準の生産規模を想定した場合, 対高炉比で 38%の投資軽減が見込まれる(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2006b)。さらに高炉では 9 時間程度かかる反応時間も大幅に短縮される。高炉プロセス並みの製品鉄を, 高炉プロセスよりも大幅に高い経済性で産出できるHi-QIPプロセスは, 「次世代製鉄法(武田, 2004)」の名に相応しい製鉄法なのである。

Hi-QIP プロセスの最大の特徴は「炭材ベッド」と呼ばれる炉床上の炭材層である。すなわち, Hi-QIP プロセスでは, 回転炉床炉の炉床に炭材を約 30mm 敷き詰め, 野球ボール大の窪み(ディンプル)が等間隔に設けられている。たこ焼き板をイメージすると分かり易い。この炭材ベッドの上に, 粉鉱石と炭材粉との混合粉を敷き, 上部からガス・バーナーで加熱するのである。このような工夫を施すことにより, 「溶融還元法での最大の課題(武田, 2004)」である耐火物の溶損が防げるだけでなく, 溶融した鉄がディンプル上で凝集, 凝固し, 基石状の粒鉄が形成されるのである。炭材ベッドが, 「①溶融スラグ, メタルによる炉床耐火物の侵食防止, ②溶融物の粒状化(武田, 2004)」という Hi-QIP プロセスの大きなセールス・ポイントの実現を担っているのである。

Hi-QIPプロセスの開発は旧川崎製鉄時代の 1996 年に着手された。アジア通貨危機による市場

¹ 本研究は, 一橋大学大学院商学研究科を中核拠点とした 21 世紀 COE プログラム(『知識・企業・イノベーションのダイナミクス』)から, 若手研究者・研究活動支援経費の支給を受けて進められた研究成果の一部である。同プログラムからの経済的な支援にこの場を借りて感謝したい。

環境の変化等の影響で一時的に開発の継続が不透明になる局面もあったが、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)の受託研究として開発原資を確保し、2002年9月の日本鋼管との経営統合²を経て開発は継続され、2003年には日産15トン規模のパイロット・プラントでの7日間の連続操業に成功している。既に実機(年産50万トン)へのスケール・アップの技術的な検討も進められており、現在は商用化の可能性を模索する段階に達している。

本稿ではHi-QIPプロセスの開発の過程を記述する。特にHi-QIPプロセスの基本原理の案出に影響を与えた要素と、その基本原理を実体化した開発過程とに着目して考察を進める。

² 川崎製鉄と日本鋼管との経営統合は2001年4月の基本合意後、2002年9月に持株会社JFEホールディングスを設立し、2003年4月にJFEスチール等、傘下子会社の再編・新設を実施する、という段取りで進められた。

II. 開発に着手した経緯

1. 東南アジア・ビジネスの開拓

Hi-QIPプロセス開発の直接のきっかけは江本寛治川崎製鉄社長(当時)³の開発指示であった。東南アジア市場向けに、小規模プラントで運営できる製鉄プロセスを開発する、という内容の指示であった。1996年頃のことである。

当時の川崎製鉄は1990年代初頭の業績不振からの脱却が軌道に乗り、業容拡大路線への転換を模索する段階にあった。こうした状況は、1996年5月に発表された第一次中期経営計画に端的に表れている。1998年度までの3ヵ年計画の中で「グループとしての成長(川崎製鉄, 2000, p.327)」が前面に掲げられたのである。バブル崩壊後、平成不況に見舞われた川崎製鉄は、第二次5ヵ年見直し計画(1993年4月～1996年3月)の「常識挑戦活動⁴」の下で生産の集約、歩留まり向上、経費節減、要員効率化等、様々な収益体質の改善策を実施した。1995年度には、これらの施策が功を奏し、1993～1994年度の二期連続経常赤字(単独ベース)から、166.3億円の経常黒字に転換する等業績悪化は一服していたのである⁵。

こうした状況を受け、江本新社長の就任と機を一にして、業容の拡大による利益成長の青写真が掲げられた。具体的な目標としては、経常利益400億円(1995年度実績166.3億円)、総資本営業利益率5%以上(同2.2%)が設定された。Hi-QIPプロセスの開発着手との関連で特筆すべき点は、この中でアジア地域での事業拡大が重要な位置づけを占めたことである。すなわち「アジアにおける鉄鋼業の成長に対しては、当社グループの業容全体を拡大するチャンスととらえ、積極的な対応を図る(川崎製鉄, 2000, p.328)」とされたのである。1990年代半ばには、こうした第一次中期経営計画の基本方針に準じて、東南アジアでの新事業の開拓をめぐり、川崎製鉄の積極的な活動が展開されている。

好例の一つが、フィリピンでのバクタノン・スチール・インダストリーズ社の設立である(川崎製鉄,

³ 1995年6月就任。主に技術畑を歩き、水島製鉄所副所長等を経て、第6代社長に就く。後に日本鋼管との経営統合を主導。2002年、JFEホールディングス会長、共同CEOに就任。

⁴ 1993～1995年度の期間で全社鉄鋼、管理部門で2,100億円のコスト削減を目指した。

⁵ 経常赤字額は1993年度が322.9億円、1994年度が182.8億円であった。

2000, pp.334-335)。フィリピンのフィンマ社との合弁で鉄筋棒鋼の製造販売合弁会社を設立するプロジェクトで、1994年11月からフィージビリティ・スタディを実施し、1996年9月に設立合意に至った。製造規模は年産32万トンで、総事業費は約41億ペソ(約160億円)に上った。フィンマ社は、セメント、亜鉛鉄板、コンクリート、パルプ紙等のメーカーを擁するバクタノン・グループを傘下に持つ有力財閥である。合弁会社の資本金は18億ペソ(約70億円)とされ、川崎製鉄の持分は13.3%であった。川崎製鉄にとっては海外での電炉事業への初参画という意味でも意義深いプロジェクトであった。

川崎製鉄とフィリピンとは1960年代以来の関係である。元々、フィリピンは原料供給元、製品輸出先として川崎製鉄との関連が深かったが、1964年5月に、フィリピンのフィリピン・アイアン・マインズ(PIM)社にペレタイジング技術を供与するに及び、川崎製鉄はフィリピン現地での操業にも関与するようになった。後述するように、当時、川崎製鉄は創業期に遡る優れたペレット化技術を保有していたのである。PIM社は、川崎製鉄からの技術導入を活かして、現地で産出する低品位鉱のペレット化を目指していた。しかし品質、および、供給量の問題から採算の確保が難しくPIM社の経営は難局に直面する。このため1967年10月、川崎製鉄がペレット・コーポレーション・オブ・ザ・フィリピンズ(PCP)社を設立して、PIM社からペレット生産事業を引き継ぐことになる。PCP社は7年ほど操業を続けるが、鉄鉱石資源の枯渇により1974年6月に解散を余儀なくされる。

この時点で川崎製鉄がフィリピンでの事業運営から撤退しなかった背景にはフィリピン政府側の強い要請があったと伝えられている(川崎製鉄, 2000, p.181)。要請を重視した川崎製鉄は同地での後継事業を検討した結果、焼結工場の建設を決定するのである。後述するように、当時、川崎製鉄本体ではペレットから焼結鉱への転換が進行しており、この動きがフィリピンでの後継事業にも反映された結果であった。日本輸出入銀行の融資を活用して、1974年12月に川崎製鉄の全額出資でフィリピン・シンター・コーポレーションが設立される。総工費は620億円であった。1977年5月には焼結工場が稼動し、川崎製鉄への焼結鉱供給工場としてスタートを切ったのである。

フィリピンでの展開に加え、1990年代中頃にはマレーシアでも一貫製鉄所のフィージビリティ・ス

タディに参画している(川崎製鉄, 2000, pp.335-336)。元々、マレーシアでの製鉄所建設に関心を持っていたマハティール首相(当時)から川崎製鉄側にコンタクトがあったもので、1995年12月の江本・マハティール会談を皮切りにプロジェクトが進行した。川崎製鉄は1996年3月と5月の2回にわたり、年産300万トン規模の薄板製造一貫製鉄所建設計画のマスタープランをクアラルンプールで説明している。さらに1997年3月末までの9ヶ月間には、フィージビリティ・スタディも実施されている。結局、フィージビリティ・スタディが完了した段階でマレーシア側が製鉄所の建設を断念したため大規模プロジェクトの受注には至らなかったが、川崎製鉄にアジア市場での潜在的な事業機会の存在を痛感させる出来事ではあった。

このような背景の下、東南アジア向けの製鉄事業を、より一層、拡大するために新しい製鉄プロセスの開発が必要であると考えられたのである。したがって東南アジア地域での川崎製鉄自身の製鉄事業の拡大が目的であり、東南アジアの事業者への製鉄プラントの輸出、エンジニアリングでの事業拡大は視野に入れられていなかった。

東南アジア諸国で必要とされる製鉄プロセスにはいくつかの条件があった。第一に年産50万トン程度の小規模のものであることである。東南アジア市場の規模を前提にすると高炉建設は過剰設備だからである。逆に言えば、東南アジア向けの製鉄プロセスはスクラップ鉄、還元鉄等を原料にする電炉を軸に考える必要があり、これが新プロセス開発の第二の条件になった。すなわち電炉への供給を中心に考えられていることである。そして、第三に産出される鉄製品が十分に低コストであること、である。これら3条件の中でも特に「低コスト」の条件は重要視された。このため、極力、諸設備負担の少ないプロセスを開発すると共に、原料の供給地も輸送費負担軽減を重視してオーストラリア産の粉鉱石を前提に考えることになった。「低コスト」が重視された背景には、川崎製鉄をHi-QIPプロセスの開発に駆り立てた、もう一つの事情が存在した。すなわちHi-QIPプロセスには明確な対抗プロセスが存在し、開発現場では、その対抗プロセスに対するコスト競争力の実現が重視されたのである。

2. 神戸製鋼所の FASTMET プロセス

江本が東南アジア向けの新しい製鉄プロセスの開発を指示した背景には、競合他社の動きも影響していた。当時、神戸製鋼所が FASTMET プロセスと呼ばれる回転炉床炉による炭材内装還元プロセスを開発していたのである。従来の天然ガスを還元剤に用いた直接還元法とは異なり、一般炭を用いて、6～12分間という極めて短時間で還元反応を完了するプロセスであった。江本は神戸製鋼所の FASTMET プロセスに触発され、川崎製鉄でも新しい製鉄プロセスの開発に乗り出したのである。

このためHi-QIPプロセスは開発当初から明確な対抗プロセスを念頭に置いてスタートすることになった。開発に当たっては、いかにしてFASTMETプロセスを超えるか、が大きな課題となった。既にFASTMETプロセスが世に出ている以上、FASTMETプロセスと同等の製品品質を担保することが大前提であった。さらに同等以上の製品品質を達成した上で、FASTMETプロセスに対しコスト競争力の面での優位性を獲得することが開発目標の根幹とされた。Hi-QIPプロセス開発のごく初期段階から開発に参画し、プロセスの基本原理の案出に重要な役割を果たした澤義孝JFEスチール株式会社スチール研究所製鉄・環境プロセス研究部主任研究員(課長)は、Hi-QIPプロセス開発におけるコスト競争力の重要性について、以下のように語っている⁶。

「(FASTMET への対抗上、重視した項目は)最終的にはコストなんですね。当時は地球温暖化ガス削減に関してはまだ重要視されていませんでしたので、それはあまり考慮していませんでした。また、ここで言うコストは単に製造コストではだめで、製品品質の違いを加味したコストです。すなわち、製品がよければ次工程の電気炉でコスト低下が見込まれるので、それを加味したものです。」

⁶ 筆者による澤義孝 JFE スチール株式会社スチール研究所製鉄・環境プロセス研究部主任研究員(課長)へのインタビュー(2007年7月20日, 15:00～16:30)より。以下、特に断りのない限り、同氏のコメントは同インタビューからの引用である。

FASTMET プロセスは神戸製鋼所が直接還元法 Midrex プロセスの開発元である Midrex 社と共同開発したプロセスである。天然ガスを還元剤に用いる直接還元法に対して、一般炭を還元剤に活用できる新しい還元鉄製造プロセスとして位置づけられていた。粉鉱石と一般炭との混合粉をペレット(塊成化物, 団子状の固まり)化して加熱する炭材内装と呼ばれる還元法である。川崎製鉄が開発を目指すプロセスも, FASTMET プロセスとの差別化を重視しながらも, FASTMET プロセス同様, 高炉とは全く異なるプロセスになるであろうことは確実であった。高炉では, 生産規模は年産 300~400 万トンに上り, 反応時間も 9 時間程度になるからである。これらの事情から, 当時は川崎製鉄社内でも新しい製造プロセスは還元鉄プロセスと呼ばれていた。

3. 川崎製鉄における還元鉄(事業)の位置づけ

歴史的に, 川崎製鉄における製鉄技術の開発は高炉プロセス関連の諸技術を中心に進められ, 還元鉄への取り組みは極めて限定的なものであった。

川崎製鉄の高炉への関わりは, その成り立ちと密接に関連している。川崎製鉄のルーツは川崎造船所の製鉄部門である。1945 年 8 月に川崎重工業⁷製鉄所が組織された後, 1950 年 8 月に同製鉄所が分社し設立されたのが川崎製鉄である。当時の川崎製鉄は製鉄部門を社内に保有しない平炉メーカーであった。このため, 川崎製鉄では, 創業時から西山弥太郎初代社長を中心に自前の高炉を保有する銑鋼一貫体制への脱皮が強く摸索されていた。背景には川崎製鉄創立に先立つ 1950 年 4 月に, 当時, 銑鉄の主要な供給元であった日本製鉄が分割され, 八幡製鉄と富士製鉄という民間製鉄企業が誕生する, という事情が存在した⁸。当時の経営陣は, 銑鉄の供給元が競合他社では, 川崎製鉄自身の成長に応じた安定的な銑鉄供給が担保されないとの強い懸念を感じていたのである(米倉, 1999, pp.189-190;川崎製鉄, 2000, p.44-45)。

しかし川崎製鉄による銑鋼一貫体制の構築には反対意見も大きかった。最大の理由は鉄鋼業界全体での高炉設備に対する二重投資への懸念であった。産業全体の資本を有効に活用する観

⁷ 川崎造船所が 1939 年に川崎重工業に社名変更した。

⁸ 日本製鉄が解散し, 八幡製鉄, 富士製鉄, 日鉄汽船, 播磨耐火煉瓦の 4 社が発足した。

点から、既に建設済みの高炉設備を優先的に利用するべきだ、との見解である。川崎製鉄の社史は当時の状況を以下のように伝えている。

「当時、日本の高炉保有基数は 37 基、稼働基数 12 機という状況であったため、現有高炉の活用が先決とする考えが強かった(川崎製鉄, 2000, p.47)。」

折しも通産省産業合理化審議会鉄鋼部会が「鉄鋼業の合理化に関する報告」(1952 年 2 月)を公表し、(製鉄ではなく)圧延段階の近代化を打ち出したタイミングでもあった。日本の製鉄産業は、まず下流工程の強化を進めるべきであるとの指針である。

さらに川崎製鉄自身の資本力とのアンバランスさも慎重論の論拠とされた。銑鋼一貫体制の構築には総額 163 億円の投資が見積もられていたが、当時の川崎製鉄の資本金は 5 億円に過ぎなかったからである。

こうした反対意見に対し、川崎製鉄は大量生産による効率化、コスト低減を通じて、輸出市場での競争力を強化する必要性を主張し、自前での高炉投資を敢行した。1953 年 6 月、千葉製鉄所(現、JFE スチール東日本製鉄所(千葉地区))第 1 高炉の火入れを皮切りに、日本経済が石油ショックに見舞われる 1970 年代初頭まで、川崎製鉄は積極的な高炉の増設を進めたのである。すなわち第 2 高炉(1958 年 3 月火入れ)、第 3 高炉(1960 年 4 月火入れ)、第 4 高炉(1961 年 8 月火入れ)、第 5 高炉(1965 年 3 月火入れ)と拡大投資が続けられ、1965 年には千葉製鉄所は粗鋼生産 600 万トンを達成し、単一製鉄所としては世界最大の規模に至った(川崎製鉄, 2000, p.90)。積極的な設備拡張は 1961 年 8 月に建設工事が始まった水島製鉄所(現、JFE スチール西日本製鉄所(倉敷地区))でも継続され、第 1 高炉(1967 年 4 月火入れ)、第 2 高炉(1969 年 1 月火入れ)、第 3 高炉(1970 年 10 月火入れ)、第 4 高炉(1973 年 4 月火入れ)と製造能力の強化が継続された。

こうした高炉の増設による能力増強と並行して、1960 年代後半以降は連続鋳造を中心とする製造効率の向上にも力が入れられた。連続鋳造とは転炉から産出される溶鋼を直接スラブやブルー

ムに加工する方式である。造塊・分塊工程が不必要なため、圧延のための再加熱や鋼塊上部の切捨てがない。したがってコスト面、歩留まり面で大きなメリットが実現できるプロセス改善なのである。

1968年6月に水島製鉄所で形鋼・棒鋼・線材用のブルーム用第1連鑄がスタート(川崎製鉄, 2000, p.120)すると、川崎製鉄では徐々に連続鑄造比率を向上させていった。川崎製鉄全社平均での連続鑄造設備化比率は5.3%(1970年度)から、51.8%(1978年度)を経て、1982年度には93.4%に達した。1988年度には千葉製鉄所で連続鑄造比率100%を達成している。

製鉄プロセスの改善では、連続鑄造に加え、転炉関連の技術開発も特筆に値する。平炉に対し、精錬時間の短縮化と燃料コストの低減によるコストダウンが期待できる転炉の導入は、千葉製鉄所1号転炉の稼動(1962年4月)が皮切りとなった(川崎製鉄, 2000, pp.89-90)。その後、1970年8月、千葉製鉄所6号平炉の操業停止により平炉から転炉への転換が完了する(川崎製鉄, 2000, p.117)と、引き続き、転炉プロセスの工程改善が進められた。一例がQ-BOP法(純酸素底吹き転炉)を改善した独自の転炉プロセスの開発である(川崎製鉄, 2000, pp.165-167)。

Q-BOP法は、1972年に米国のUSスチールがゲーリー工場で操業を開始した転炉プロセスである。従来、一般的に用いられていた純酸素上吹き転炉(LD転炉)には、溶鋼の攪拌が不十分という課題があった。これに対して、Q-BOPは溶鋼を十分に攪拌し高品質の製鋼が可能であるという利点があったのである。しかし、その反面、脱リン・脱硫が不十分であったり、路底の耐火物の寿命が短期化するため耐火物コストが上昇したり、という欠点があり、一般的にはLD転炉が継続的に用いられ、Q-BOPの普及は進んでいなかった。

川崎製鉄では、こうした課題を克服するために様々な工夫を重ね、1977年2月に千葉製鉄所西工場に完成した第3製鋼工場国内初のQ-BOPを稼動させた。すなわち、グラファイトカーボンを加えた耐火物レンガを開発する、炉内のレンガの積み方を工夫する、精錬中に炉内の成分などを直接測定する技術を開発する、等により炉底羽口部の寿命延長に成功したのである。

その後、川崎製鉄はLDとQ-BOPの利点を兼ね備えた転炉プロセスの開発を継続する。LD-KGC(川鉄式不活性ガス底吹き転炉)やK-BOP(川鉄式上底吹き併用転炉)等である。

LD-KGC は炉底からアルゴンまたは窒素等の少量の不活性ガスを単管羽集合体より吹き込む技術である。1980年3月、千葉製鉄所第2製鋼工場、水島製鉄所第1製鋼工場にて工程化された。

K-BOP は酸素量の一部を Q-BOP と同様に、二重管羽口より底吹きするもので、1981年3月に千葉製鉄所第1製鋼工場のステンレス鋼吹錬にて実機化された。後に、川崎製鉄では K-BOP が転炉製鋼法の主流になっていくが、その背景には、さらに関連プロセスでの技術開発が必要であった。

すなわち転炉ではなく、溶銑予備処理工程で珪素、リンを除去する技術の開発が進められたのである。1984年10月、千葉製鉄所で溶銑予備処理が稼動し、従来、転炉では困難とされていたステンレス鋼や極低リン鋼の製造が可能になった。1988年11月には水島製鉄所で第2、第3高炉を対象に溶銑予備処理第2期工事の操業が開始され、鉄鋼業界で初めて「全社100%予備処理体制」が確立された(川崎製鉄, 2000, pp.249-250)。

さらに高炉プロセスの効率改善としては PCI(微粉炭吹き込み)の導入も重要である。安価な一般炭の微粉を高炉の羽口から吹き込み、高価なコークスの使用量削減を図る PCI の導入は、1984年10月、千葉製鉄所第5高炉で開始された。その後、水島製鉄所第4高炉(1989年6月)、千葉製鉄所第6高炉(1991年5月)、水島製鉄所第3高炉(1992年10月)と順次 PCI の導入が進み、1998年2月の水島製鉄所第2高炉をもって全高炉で PCI が採用されるに至った(川崎製鉄, 2000, p.165)。

高炉工程のプロセス改善は、高級表面処理鋼板と珪素鋼板とに力点を置いて、製品の高付加価値化面でも押し進められた(川崎製鉄, 2000, pp.198-199, 250, 317-318)。

千葉製鉄所では、1980年7月、第2連続焼鈍設備に世界初の KM-CAL(多目的連続焼鈍設備)が設けられた。月産3万トンで、錫めっき原板、一般冷延鋼板の焼鈍処理に加え、低降伏比自動車用高張力鋼板、珪素鋼板などの処理も可能であった。1982年10月には連続焼鈍酸洗設備も稼動した。

この時期には、めっき設備の増強も進められた。1982年3月には連続電気亜鉛めっき設備(KM-RCEL)が稼動した。各種の亜鉛めっき鋼板製造をこなす、世界初の多目的ラインであった。

引き続き、1983年6月には連続電気クロムめっき設備(TFL)が稼動している。

1980年代後半になると連続焼鈍設備の増強が行なわれた。月産8.5万トンの千葉製鉄所第3連続焼鈍設備(1988年3月)、月産4.68万トンの千葉製鉄所第4連続焼鈍設備(1990年3月)である。

これら千葉製鉄所での工程改善と並行して、水島製鉄所でも1984年2月にKM-CALが稼動した。月産5.5万トンの第1連続焼鈍設備である。一般冷延鋼板、高張力鋼板、珪素鋼板などのあらゆる冷延鋼板の製造が可能になると共に、極低炭素鋼製造技術の確立により深絞り鋼板の製造体制も整えられた。1991年5月には、月産8万トンの第2連続焼鈍設備が設けられ、焼鈍材に占めるCAL比率が業界最高レベルの95%に向上した。

川崎製鉄の高炉事業は海外でも展開された。すなわち同社の最大級の海外プロジェクトとなったブラジルでの高炉製鉄所の建設、運営への参画であった。1983年11月に火入れ式が行われたツバロン製鉄所である。1974年3月、ブラジル・シデルプラス社、イタリア・フィンシデル社、および川崎製鉄の3社が、合弁会社ツバロン製鉄株式会社を設立して以来、足掛け10年にわたる大プロジェクトであった。10年のプロジェクト期間中は、オイルショックや中南米信用危機に伴うブラジル経済の混乱等、プロジェクトの続行が困難に直面する局面も見られた。しかし、こうした危機を克服し、ツバロン製鉄所は「南北アメリカ大陸、および南半球で最大の大型高炉(川崎製鉄、2000, p.179)」として川崎製鉄の海外事業史に輝かしい足跡を残すことになった。

鉄鋼事業の派生事業とも言える製鉄エンジニアリング事業でも、主要なサービスは、高炉プロセス、中でも銑鋼・圧延分野に集中していた(川崎製鉄、2000, pp.300-301)。銑鋼分野では、転炉の上底吹き技術(LD-KGC プロセス)、脱ガス設備への気体酸素吹き込み(KTB)技術が主力技術・商品であった。また圧延分野では、電気錫めっき(ETL)設備、連続焼鈍(CAL)技術が主流を占めている。

こうした高炉関連の一連の取り組みに対し、高炉とは全く異なるプロセスに基づく還元鉄への取り組みは限定的であった。

川崎製鉄でも還元鉄への関与が皆無であったわけではない。限定的ながら、いくつかの還元鉄製造施設が稼動しているのである。しかし、これらの取り組みも環境対策やリサイクルとしての位置づけが中心であり、製鉄プロセスとしての意義は極めて希薄であった。例えば、1968年12月、千葉製鉄所に還元粒鉄工場が完成している。還元鉄の事業化ではなく、環境対策を目的とした工場設置であった。1982年12月には、千葉製鉄所の還元ペレット工場も休止に至っている。

さらに1986年4月、水島製鉄所において、還元キルンでの半還元クロムペレット製造が開始されている。しかし、澤が下記で語っているように、こちらもダストのリサイクルを目的とした設備であり、程なく休止に至っている。

「私が知っているのは当時川鉄水島、今の JFE 西日本製鉄所(倉敷地区)にあったロータリーキルンです。ロータリーキルンで半還元ペレットを製造していた記憶があります。10年以上前だったように思います。今は動いていません。」

4. 機能横断プロジェクト・チームの生成

こうした文脈の下、後に Hi-QIP プロセスと呼ばれることになる、東南アジア市場向けの新しい製鉄プロセスの開発が動き出したのは1996年3月であった。製鉄、製鋼等の各機能部門から横断的に人材が集められ「新鉄源プロジェクト」が発足した。部課長級の人材が10人ほど集められたという。研究所からは、この後、一貫して Hi-QIP プロセスの開発に従事することになる武田幹治(現、JFE スチール株式会社スチール研究所製鉄・環境プロセス研究部長)が参画し、澤も3ヶ月遅れの1996年6月から同プロジェクトに参加することになった。機能別組織を採用する川崎製鉄においては、このような機能部門横断の開発チーム組成は社長発議の開発プロジェクトでなくては考えられないものであった。澤は社長のイニシアティブと機能横断チームの発足について、以下のように語っている。

「(社長がイニシアティブを取った意義)これは大きいです。そうでなかったら難しかった。不可能だったかもしれません。一研究室が他研究部はまでも本社を動かすことは大変なことです。部間を渡っての活動ですから、組織上、それらをまとめる立場の人が仕切らなければならない。今回のケースで言えば副社長。だから副社長以上でないと難しいですね。」

後述するように Hi-QIP プロセスの基本原理には製鉄部門での経験の蓄積が大きく反映されているが、製鋼部門との協力関係も無視できない役割を果たした。Hi-QIP プロセスは製鉄、製鋼等の各工程担当部署間の協力関係に基づき生み出されたのである。

III. Hi-QIPプロセスの着想と、その源泉

1. Hi-QIP プロセスの着想

Hi-QIP プロセス開発の大きな特徴の一つは新しい製造プロセスの基本的な原理が極めて早期に明確にされていたことである。1996 年春に開発がスタートし、約 1 年ほどプロセスの探索を経た後、翌 1997 年には現在の Hi-QIP プロセスに至る基本プロセスが明らかにされていたのである。その明確化の過程には、開発に参画した研究者の高炉での経験の蓄積が大きく活かされていた。Hi-QIP プロセスの基本原理の確立に大きく貢献した澤は下記の本人のコメントに見られるように 1985 年に川崎製鉄に入社し、高炉部門を中心に製鉄プロセスの開発を担ってきた人材であった。

「私は 1985 年マスター卒で入社しています。最初の 6 年間は製鉄研究室で高炉の研究をしていました。それから 3 年間は全く畑違いの鑄造、圧延ロール製造をやっていました。その後また元の職場に戻ってきて、それからずっと同じ職場です。実質的に製鉄研究が長いです。また、製鉄の中でも高炉系の仕事が多かった。得意なのは数値計算関係ですが、現場実験もやってますし、研究所の中での実験もやってます。入社したての頃、最初 6 年間は開発というよりは現象を明らかにするような研究が多かったですね。製鉄研究に再度戻ってきて、半年は高炉だったのですが、その後今回の Hi-QIP に移って、その後 10 年近く、Hi-QIP です。Hi-QIP に関しては最初から関わっている一人です。このプロジェクトに私が加わったのは 96 年の 6 月からで、プロジェクトが始まったのはその 3 ヶ月前です。」

澤によれば、Hi-QIP プロセスの基本原理に至る思考過程は下記のようなものであった。

第一に Hi-QIP プロセスでは溶融プロセスが必要であることが当初から認識されていた。川崎製鉄では FASTMET プロセスの最大の課題を製品鉄の中に脈石が残ることであると理解していたからである。脈石とは鉱物中に残存する経済価値のない鉱石のことである。脈石が残ると下流の電炉工程での製造コストが上昇する。このため「新鉄源プロジェクト」では、FASTMET プロセスへの対抗

上、脈石の除去が至上命題となっていた。澤は、脈石を抜くには溶かすしかない、というのが Hi-QIP プロセス開発を規定した「ニーズ」であったと語っている。

「まずニーズからして溶かす必要がありました。FASTMET に勝つためには製品品質をよくしなければならぬ。FASTMET の欠点というのは、製品の中に脈石が残っていることです。これが後工程の電気炉でかなりのコストアップになる。だから(脈石は)抜かなければいけない。抜くためには溶かすしかないわけですね。」

しかし、ここで一つ問題が生じる。鉄鉱石を溶かすと、炉の耐火物が溶損する虞があるのである。耐火物の傷みは、当然、保守・運用コストにはねかえる。溶融プロセスを採用すれば、脈石を除去し FASTMET プロセスの弱みを克服できる。しかし、その反面、最終的な開発目標である低コストの製鉄プロセスの開発があやうくなってしまうのである。

「だから溶かすことを前提でプロセスとして成り立つ状況にしてあげなければいけない。何も考えずに溶かしてしまうと耐火物が溶けて、それがコストにすごく影響する。これは多くの人が知っている話なのですが。だから溶かしても耐火物が大丈夫な状態を作ってあげるしかない。」

さらに溶融のプロセスを経た後、どのような形態で鉄を取り出すか、という点も詰める必要があった。製鉄プロセスと製鋼プロセスとが隣り合っている場合には溶けたままの状態(溶鉄)でも良いが、東南アジア市場を想定した場合、必ずしも一貫プロセスだけを考えていけば良いわけではない。このため製造後の鉄を製鋼工程まで輸送することを考えると、一度、溶かした鉄を再度固める必要が生じる。しかも、電炉への鉄源供給を考えた場合には可能な限り電炉で溶かしやすい形態を追求すべきである。こうして、澤らは粒状の鉄、すなわち粒鉄が望ましい製品形態であると考えようになった。

「それに、製品は炉の中から出さなければいけない。製品が溶けた状態のまま炉の外に出す考えも無いわけではないがすぐ近くに電気炉がある想定ではなく、製品を山積みにおいて、どこかに持っていくことを想定したんですね。そうすると炉の中で製品を固めてから炉の外に出すというイメージになった。で、固めたあと炉から出すときに、大きなかたまりより、小さいほうが出しやすい。それと、製品があまりに大きな塊だと電気炉で溶けにくいですよ。表面積を稼いであげないといけません。そちらの面からも小さな塊にしてあげなければならない。だから、よく考えればそこ(小さな塊にすること)が既に必要とされる条件になっているんですね。たこ焼き(のような原理を利用すれば)であれば、熔融物が巧く凹みに流れるかどうかまだ分かっていなかったのですけれども、巧くいけば小さな塊が作れるはずですよ。」

こうした検討に基づき、澤が「ひらめき」と表現するアイデアが生まれた。還元剤に用いられる炭材を耐火物に活用し、同時に鑄型としても利用してしまう、というアプローチである。炭材は、耐火物、鑄型、そして還元剤の3役を担うのである。

「(還元材としても使用している)炭材を使えば、耐火物から離すことができる。炭材層の上で製品を溶かし固めれば耐火物は痛まないだろうと。かなり短い時間であつと言う間にこの状態は想像しましたよ。」

これらの思考は極めて論理的であるが、澤らは、この論理を理詰めで生み出したのではない。新しい製鉄プロセスに求められる諸条件を整理する過程で、短時間にアイデアが結実したのである。澤は、当時を振り返って、高炉で経験を積んできた6年間の蓄積が一気に結実する過程であったと表現している。

「それまでの(知識の)蓄積が、どれだけ溜まっていたかが重要だったのだと思います。最初の 6 年間の高炉の知識・・・その 6 年間の知識が一瞬にして集まっただけなんですよ。」

澤によれば、上述の基本原理の開発の過程で、唯一、時間がかかったのは既存の還元鉄製品の評価であった。澤ら製鉄部門では既存の還元鉄が製鋼部門でどのように評価されるかが不明だったからである。ここで各機能部門から人材を結集した「新鉄源プロジェクト」が真価を発揮した。製鉄部門の依頼に応じて、製鋼部門が還元鉄製品のコスト評価を行ったのである。製鋼部門の評価結果は、上述の通り FASTMET プロセスから産出される還元鉄製品は脈石が多くて使えないというものであった。この評価結論を受けると、一気に、熔融を行う Hi-QIP プロセスの構想が固められたのである。基本原理の案出に充てられた約 1 年間の大半は対抗プロセスの分析・評価に費やされたわけであり、Hi-QIP プロセス自体の着想は、そこから、ほとんど日を置かずに成立したのである。

「唯一・・・決めることに時間がかかったのは製鋼側から電気炉コスト評価。プロジェクトですから、製鋼側ではどんな鉄源が欲しいかということを彼らは検討するわけです。で、FASTMET みたいな鉄じゃ、ダメですよという結果が出たわけです。その瞬間、溶かして脈石を取ってしまうことはコスト上やらなければいけなくなった。それが決まったときからプロセスを決めるまで、1 日かからなかったと思いますね。」

川崎製鉄社内での FASTMET プロセスの評価は、Hi-QIP プロセスの基本原理の確定を促したが、同時に、もう一つの副次的な効果を生んでいた。還元鉄は電炉の鉄源には適さない、との理解が共有され、これ以降、川崎製鉄内で「還元鉄」という言葉は使われなくなっていったのである。還元鉄に対する評価が低かったのは、脈石の含有分が高いオーストラリア産の粉鉱石を利用したためでもあった。こうした経緯を澤は以下のように語っている。

「我々は(Hi-QIP プロセスで製造した鉄を)粒鉄と呼んでいます。銑鉄と同じ、よく似た品質です。96年にプロジェクトを始めたときには還元鉄という言葉色々な場面で使っていたのですが、結果的に還元鉄では電気炉では使いにくいという結果になりましたので、それから還元鉄プロセスという言葉は使わなくなりました。電気炉ではスクラップを主体に使っていると思いますが、還元鉄も使っていないわけではない。しかしその還元鉄は元々鉱石の中の脈石が少ないものを原料としています。世の中の大半は Midrex 法、還元材に天然ガスを使用していますので、還元材から脈石は入ってこないわけです。石炭ベースのプロセスですと石炭のアッシュ(灰分)が入ってきますので、さらに不利になります。ですから、世の中の大半の還元鉄はブラジル系の脈石が 2%を切るようなものを使い、還元材に天然ガスを使用していますので、脈石の欠点をできるだけ減らしたものとなっています。オーストラリア産の鉱石ですと脈石が 8%ぐらい入っていて、炭材からさらに入ってきますので、製品中に 10%ぐらい脈石が残る。これが大きな欠点なのです。」

こうして川崎製鉄内では Hi-QIP プロセスは還元鉄製造プロセスではなく、「粒鉄製造プロセス」と呼ばれることになったのである。

2. 高炉の人間でなければ生まれないアイデア

極めて短期間に生成された Hi-QIP プロセスの着想は高炉での経験に立脚していた。それでは、澤が語る高炉の経験とは、どのようなものなのであろうか。澤は、直接的な知識・情報の転用を否定して下記のように述べている。

「(高炉時代の経験が直接関係するかという)もし行ってきた研究テーマから見ると全然関係ないかもしれないですね。最初高炉系の仕事をしたと言いましたが、最初 STAR 炉の研究を 1 年くらいやっています。ベンチプラント試験、それと STAR 炉のコンピュータシミュレーション。2 年目

から 4 年目までは高炉のコンピュータシミュレーション。この会社にはまだありませんでしたのでゼロから開発しました。その後は微粉炭吹き込みを少し行った程度。研究室での検討で現場試験はしていません。吹き込みに関しての研究です。あとは誰かの実験結果をまとめるような、まとめて論文にするようなことを行ったぐらいで。直接には関係ないと思います。」

むしろ高炉での経験の蓄積とHi-QIPプロセスの基本原理の案出とは、知識・情報の単なる転用ではなく、発想の仕方や着眼点など、課題解決のアプローチそのものの側面に関連し合っていた。一例が砂樋^{すなごい}と炭材とのアナロジーである。砂樋^{すなごい}とは、高炉から溶銑を取り出す際に用いられる樋に砂を敷く作業慣行である。特に、冷え込みが激しい時期等に行われる。溶銑の樋上での固化を防ぎ、樋への固着を避けるための慣行と言われている。澤はあちこちの製鉄所で目にした砂樋^{すなごい}の光景が炭材を耐火物に用いるという着想の根底に存在したと考えている。

「例えば一瞬にしてひらめいたというのは高炉の砂樋^{すなごい}からなのです。通常、樋は耐火物で作られているのですけれど、高炉が冷え込んだときなどは砂で樋の役割をさせて砂の上に溶銑を流すのです。これが見掛け同じなんです。炭材と砂の違いはありますけれども、砂の方が軽くて、メタルの方が重い関係は一緒なんです。私も本当はなぜ(高炉で)それをしなければならぬのか分かっていないのですけれど、直感なのですが。高炉が冷え込んだ時は炉から出てきた溶銑温度は低い。あまりに低いと樋で固まってしまうかもしれない。通常の樋だとそこで固まると剥がすのが大変。しかし、砂の上であれば固まっても簡単に離れますからなんとかできます。あちこちで、砂を敷いて、その上に溶銑を流すというのは見かけるんですよ。それは頭の中にありますから。ほかでは、水面に一円玉浮かそうと思えば浮かせられますよね。条件させ揃えば。こういうのはありえるというか、普通だなぁというのありましたけど。」

さらに同じ高炉関連でも焼結やコークスの経験者からはHi-QIPプロセスのアイデアは生まれな

かった、という澤のコメントも示唆的である。鉄鉱石の加熱・塊成や、還元材としてのみの炭材ではなく、あくまで高炉内での溶融・スラグ分離の過程や、炉の耐火構造、溶銑の扱い等で様々な経験を蓄積した人材でなければ、炭材ベッドを活用した還元・溶融プロセスをイメージすることは難しかったのである。

「もっと言うのですね、(焼結、コークスより)高炉経験者でないとこのアイデアは出ないですよ。出ないというか出る確率は低い。(設備形状、原料形状から)見た目、焼結経験者が有利と思うかもしれませんが、私は高炉経験者が一番確率が高かったと思います。還元しなければいけない。一度は溶かさなければならぬ。焼結は還元させることを考えていない。コークスは鉄石を扱ってないですから。」

3. 坩堝実験とプロセス原理の確立

こうして基本原理が案出されると、1997年には小規模な設備を用いた実験が開始される。坩堝実験である。10×10cm程度の坩堝状の炭材の中に、粉鉄石と炭材とを約40g程度ずつ混合した粉を挿入し、電気で1,500℃程度に加熱する、というものであった。たこ焼き板の穴1個分、すなわちディンプル1つ分を切り出して実験を行ったのである。将来的には、この坩堝の数を平面的に増やしていけばスケール・アップが図れる算段である。実験は目論見通りに進展し、還元された鉄が溶融し、スラグと分離し、坩堝上に凝集するという現象が観察された。

このようにHi-QIPプロセスでは粉鉄石と炭材粉との混合粉をペレット化せずに、粉状のまま加熱するアプローチが採用された。ペレット化とは粉鉄石と炭材粉とを団子状に固める技術である。

川崎製鉄におけるペレット製造の歴史は同社の創業時に遡る。川崎製鉄は、1952年2月、千葉製鉄所第一高炉の建設に着手したが、早くも1953年9月には第一ペレット工場が操業を開始している。米国で実用化されていた技術を基に独自の工夫を施したものであった。川崎製鉄におけるペレット化技術の実用化は、同社が高炉への後発参入組である事実と大きく関連していた。すなわ

ち、ペレット化工場の操業は高品質の原料鉱石の入手難を切り抜ける一助であった。こうした経緯を川崎製鉄の社史は以下のように記している。

「当時米国で微粉のタコナイト鉱石に適用されていたペレット法を当社が独自の方式を開発して塊成化法としたもので、高炉に後発参入し、良質鉄鉱石の入手に苦勞した当社が、焼結法に不向きな高粘度分鉱石や微粉硫酸滓を使いこなすうえで役立った(川崎製鉄, 2000, p.58)。」

さらに川崎製鉄のペレット化技術は原料確保に貢献しただけではなく、技術的にも優れたものであった。1954年には千葉製鉄所が「ペレタイジングの研究とその工業化」で大河内記念生産賞を受賞しているのである。

このように創業にまで遡る履歴と優れた技術水準を誇る川崎製鉄のペレット化技術であったが、1960年代からは徐々にその重要性が低下していく。「自溶性ペレット製造時の石灰石添加に限界があることや、鉱石を粉化するために電力を多量に使用すること、鉱石性状の変化に対する対応が焼結鉱の方が柔軟であることなどの理由で、焼結鉱への転換が推進されることとなった(川崎製鉄, 2000, p.64)」からである。1962年4月の第一焼結工場の生産開始以来、ペレットから焼結鉱への転換は徐々に進められた。10年後の1972年1月には千葉製鉄所第二ペレット工場が廃止され、全ペレット工場が閉鎖されるに至ったのである。

4. ベンチ炉実験と社長報告

こうして坩堝^{るっぼ}実験により基本原理の正しさを立証した澤らは、1998年に入ると坩堝^{るっぼ}の数を増やしたベンチ炉実験を実施した。50×50cm大の試験床炉上に炭材を30mm厚に敷き詰め、その表面に28個のディンプル(内径50mm, 深さ15mm)を千鳥格子状に施した実験炉である。さらに、この炭材ベッドの表面には厚さ約15mmの粉鉱石、炭材粉の混合層が積みつけられた(武田, 2005, p.45)。加熱方法も、可能な限り実用化段階に近づけるために、電気加熱ではなく、ガス・バーナー

による加熱を行った。実験の過程では、各坩堝^{るっぼ}ではなく、炭材ベッド上に溝を施し、銑鉄を棒状に凝固させる方法なども検討されたが、最終的には各坩堝^{るっぼ}上に銑鉄を凝集させる当初のプロセスが採用されることになった。粒鉄の組成も鉄分が 96.6～97.5%と直接還元法を大きく上回る純度の高い鉄が得られた(武田, 2005, p.552)。ベンチ炉実験においても、坩堝実験で確認されたHi-QIPプロセスの基本原理が確認され、実験室レベルでの原理確認は完了した。

1999年1月には50×50cmのベンチ炉レベルでHi-QIPプロセスの基本原理が確立され、「新鉄源プロジェクト」は開発成果を取りまとめの上、社長報告を実施した。プロジェクト発足以来、3年足らずでの成果であった。

IV. 環境変化と開発継続

1. アジア通貨危機と「新鉄源プロジェクト」の解散

1996年の発足以来、順調に開発を進めてきた「新鉄源プロジェクト」であったが、社長報告という一つの節目を機に大きな曲がり角に直面した。プロジェクトが解散されることになったのである。背景には、プロジェクトを取り巻く市場環境の大きな変化が存在した。すなわちアジア通貨危機を経て、プロジェクト開始時に目論んだ東南アジア市場への進出の青写真は大きな軌道修正を迫られていたのである。技術開発面では確固とした成果を挙げていたのだが、事業化の目処がつかず、継続投資の決裁は難しい状況になっていた。

川崎製鉄自体の業績悪化もプロジェクトの続行を難しくする一つの要因となった。第一次中期経営計画の発表以降、資産の圧縮は順調に進められたが、収益性の改善は実現されなかったのである。すなわち使用総資本 1.68 兆円(目標 1.6 兆円)、有利子負債 9,196 億円(同 7,000 億円)と貸借対照表関連の目標は概ね実現された。一方で、損益計算書関連の目標値は大きな未達に終わり、総資本営業利益率は 1.4%(同 5%以上)、経常利益に至っては 68.6 億円(同 400 億円)という惨状であった。こうした状況を受け、第二次中期経営計画(1999年5月発表)では、固定費、変動費の削減を柱とする鉄鋼事業の資産収益力の向上が掲げられた。具体策は、本社部門、製鉄所要員の効率化などである。「グループ内で錯綜している事業」の整理統合、設備投資の抑制姿勢も盛り込まれた。Hi-QIP プロセス開発の大前提であった東南アジア向け事業の拡大に関しても、「海外投資会社についても、その保有意義の見直しを通じ、投資利回りの改善と投資回収をはかっていく(川崎製鉄, 2000, p.351)」とされ、投資案件の精査と回収強化に重点が置かれることになったのである。

こうした状況の中、新鉄源プロジェクトは 1999 年 1 月の社長報告を機に解散の道を歩むことになった。パイロット・プラントの建設等、事業化に向けた活動は、それ以上、継続されなかったのである。澤によれば自然解消と評するのが適当な状態であった。

「(プロジェクトチームは)実質的に解散になりましたね。解散式があるわけではなかったですが、活動はその後行っていませんので、実質的に解散ですね。」

2. ダスト処理への方向転換

機能部門横断のプロジェクト・チームでの開発活動が中断される一方で、澤ら研究所の開発メンバーは、これまでの開発成果をなんとか活かそうと検討を続けた。電炉向けの鉄源供給以外で、他の活用用途の探索に乗り出したのである。その結果、製鉄所内のダストに含まれる鉄源の再利用プロセスとして Hi-QIP プロセスの開発を仕切り直すことで方向転換が図られることになった。事業環境の悪化に合わせた方向で、開発済みの技術成果の利用可能性を模索したのである。

澤にとってダスト処理プロセスの開発は初めての経験ではなかった。千葉製鉄所第 4 製鋼工場 で用いられるダスト精錬炉の開発に携わっていたのである。1991 年 4 月に開始された千葉製鉄所のリフレッシュ工事の一環として新設された第 4 製鋼工場(1994 年 7 月稼動)ではダストに含まれる金属の回収ニーズが強かった。ステンレス鋼等の特殊鋼を生産するためダスト中に多量の有価金属が含まれているだけでなく、ステンレス鋼製造の転炉工程で、従来方式よりもダスト発生量が多い熔融還元法⁹を採用したためである。このため、技術研究所がダスト中の金属回収を目的に開発した、独自の熔融還元プロセスを採用した。すなわちダスト精錬炉、STAR 炉 (Stainless Advanced Reactor) である。ダストをコークスで還元して金属として回収するプロセスであった。

こうしてダスト処理の開発は研究所で細々と継続された。当時の状況を澤は以下のように語っている。

「ベンチ試験炉はあるわけですから、細々と研究は続けていました。ダスト処理とか、他への転用ができないかというのは常に頭にあって。Hi-QIP がそれらに対して得意であるとは思っていませんけれど、ただ、適用したらどうなるかなというのは気になっていましたから、ダスト処理炉として

⁹ 生クロム鉱石を直接投入するプロセスであった。

の評価はずっと続けていました。ベンチ炉は研究設備ですし、研究の人員だけで続けていた
たので研究独自活動になります。もちろん、研究所としてはチャンスがあれば実機化したいとい
ことは思いつづけていますので、製鉄所を巻き込んでダスト処理での実機化を模索していたの
ですが、あの頃の鉄鋼業は非常に厳しかったですから、製鉄所も動くという話にはならなかつた。
それが何年か続きました。」

V. NEDO資金の獲得とパイロット・プラント実験

1. NEDO 資金の獲得を梃子にした社内の説得

ダスト処理への転用開発で活路を探っていた Hi-QIP プロセス開発であったが、ほどなく NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの受託研究という形で転機を迎えることになった。外部資金の活用により、Hi-QIP プロセスの継続開発を進める可能性が生じたのである。

NEDO の委託研究の受託は、一度中断されていた Hi-QIP プロセスの開発が再開されただけではなく、開発プロジェクトの性格が大きく変化した、という意味でも転機と呼ぶに値するものであった。すなわち、1999 年 1 月までの開発活動は江本社長の発議の下、全社を巻き込んで進められていた。社長直轄の機能部門横断的なプロジェクトだったのである。これに対して、NEDO の受託研究では研究所主体で Hi-QIP プロセスの継続開発への社内合意が形成されていったのである。原動力は、開発現場の、Hi-QIP プロセスをこのまま終わらせたくない、という思いであった。開発担当者らが役員の説得に社内を奔走したのである。

当時、川崎製鉄内部では、上記のような環境変化に伴い自社での開発費負担には消極的な意見が強かった。しかし、NEDO からの受託研究の枠組みを活用すれば、自社負担は最小限に抑えることが可能である。さらに NEDO 受託研究の受注は客観的な観点に立つ第三者による Hi-QIP プロセスの技術評価を獲得する意義もあった。公的機関からの研究委託が受託できるようであれば、Hi-QIP プロセスの開発の意義が公にも認められることにもなる。

開発担当者らの社内合意取り付けの努力が実り、2001 年度初年度として川崎製鉄は NEDO の基盤技術研究促進事業の一環で「フロートスマルターを用いた革新的製鉄技術の開発」を受託するに至る。こうした経緯を澤は以下のように語っている。

「ちょうど小泉内閣が始まった頃です。NEDO に大きな額の委託事業ができました。我々にとってパイロットプラントサイズの開発ができる事業が目の前に出てきてくれたのです。それに応募したら採択された。もちろん社内的には応募してもよいかの同意は取り付けましたけれど。それで再

スタート。このときは研究が主体で、関係役員を説得しにいったわけで、以前のプロジェクトの頃とは構図が変わっています。研究がやりたいことを研究が主体に実施していくという構図に変わっています。」

2. 5年契約の開発プロジェクト

NEDO からの受託研究は 5 年契約となった。5 年間の受託開発の期間中、パイロット・プラントによる粒鉄の製造実験が繰り返され、Hi-QIP プロセス自体への理解が深められ、必要な要素技術の開発が進められると共に商用生産に用いられる実機へのスケール・アップに関する知見の蓄積も進められた。特に、粉鉱石と炭材粉との混合粉の圧密や、粉鉱石の粒径等、Hi-QIP プロセスの生産性を左右する要素に対する理解が深められた(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006a, 2006b)。

受託第一年目の 2001 年は、ベンチ炉による粒鉄製造実験が継続され、Hi-QIP プロセスにおける還元・熔融反応への理解が深められた。中でも反応温度と反応速度との相関関係や、粉鉱石と炭材粉との混合粉の事前処理の重要性が明らかにされた。混合粉のまま加熱するよりも、圧密¹⁰過程を踏んでから過熱した方が生産性の向上が見られ、その改善幅も、ほぼ 2 倍に達することが判明したのである。さらに操業予測シミュレータ、熱物質バランス・モデル等も構築され、2 年度目以降のパイロット・プラントを用いた実験の実施体制が整えられていった。

第 1 年度目の成果を土台にパイロット・プラント設備の設計、建設、試運転が進められたのが 2002 年である。坩堝^{るつぼ}実験、ベンチ炉での実験を経て、Hi-QIP プロセスの開発は、さらに一步実機による生産に近づき、パイロット・プラントでの実験段階に入ったのである。50cm×50cm のベンチ炉から、炉床径 7m、有効炉床幅 1.0m の大型設備に拡大されただけでなく、回転路床炉を用いて連続的に粒鉄を製造する実験が試みられることになったのである。

¹⁰ 回転する 2 つの円柱形ロールの間に原料を入れ、挟みつけるように原料を圧縮する工程。円柱ロールの表面に波型の加工が施されており小指状の成形体が製造される。「ペレットのよい点をより強調させた」原料事前処理として採用された。

翌 2003 年には、パイロット・プラントに熱間実験を可能にするための増強工事を施した上、粒鉄を製造する実験(第 1～2 回実験)が実施された。第 1 回実験では、39 時間の連続運転を含む 60 時間の粒鉄製造を実現し、 $0.35\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ の生産性を記録した。「 $\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ 」とは、炉床の単位面積当りの産出鉄量(日産)を表す単位である。第 2 回実験では、連続運転、生産性ともに第 1 回実験を上回る実績を残した。すなわち 68 時間の連続運転を含む 7 日間の粒鉄製造実績と、 $0.9\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ の生産性を達成したのである。

これらの実験を通じて、Hi-QIP プロセスの生産性を規定する要素に対する理解も深められた。粉鉱石の粒径が小さいほど、また圧密体であるほど生産性が高いことが示されたのである。すなわち、第 2 回実験における生産性は、粒径 3mm 以下では $0.46\text{ t/m}^2\cdot\text{d}$ であったのに対し、粒径 0.1mm 以下の粉鉱石では $0.61\text{ t/m}^2\cdot\text{d}$ まで上昇した。さらに、圧密体では $0.90\text{ t/m}^2\cdot\text{d}$ の生産性が達成された。圧密体で生産性が高められることは既に 2001 年の時点で確認済みであったが、粒鉄製造の第 2 回実験では圧密体のデメリットも明らかにされた。圧密体では粉原料時に比べメタル、スラグの凝集が悪いのである。すなわち、圧密体を利用した場合の粒径はメタル、スラグともに 10～20mm であり、事前処理を施さずに粉原料を用いた場合の粒径、すなわちメタル:20～40mm、スラグ 10～20mm を下回った。

2004 年には、さらに第 3～4 回の粒鉄製造実験が重ねられ、5 年プロジェクトを通じて最高の $1.23\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ の生産性が達成された。第 3 回実験では、7 日間の連続運転を含む 23 日間の粒鉄製造を実現した。粒鉄の生産性は $0.8\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ であった。第 2 回実験での生産性を若干下回る水準ではあったが、圧密体だけではなく、粒径 0.1mm 以下の粉鉱石でも同水準の生産性が達成された点に意義があった。第 4 回実験では、21 日間の粒鉄製造実績を収め、生産性の向上も実現された。すなわち粉原料では $1.14\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ 、圧密体では $1.23\text{t/m}^2\cdot\text{d}$ の生産性であった。圧密体では粉原料を 7.9% 上回る生産性が記録されたのである。

最終年度となる 2005 年には、粒鉄製造よりもダスト処理プロセスの開発に重点が置かれた。粒鉄の製造関連では、製造実験の繰り返しではなく、パイロット・プラントから実機へのスケール・アップ

プの考え方を整理する作業が進められた。具体的には、実機の設備検討や、操業推定などである。さらに高炉との間で操業費、設備費等の比較が実施された。その結果は高炉プロセスに対するHi-QIPプロセスの経済性の高さを証明するものであった。年産200万トン規模の設備を想定した場合の建設費は高炉:970億円に対して、Hi-QIPプロセスでは600億円程度に収まるものと推定された。Hi-QIPプロセスでは粉鉱石、炭材を、そのまま活用するため、焼結設備、コークス炉等の事前処理設備が必要ないからである。原料として一般炭が利用できるという利点は、Hi-QIPプロセスに製造コスト面でも大きなメリットをもたらすものと考えられた。すなわち事前処理設備分の減価償却費の軽減だけではなく、より安価な高粘度炭を採用できるため、製造コスト面でもHi-QIPプロセスは高い経済性が期待できるのである。具体的には、高炉に比べ製造コストが27%低減できることが示された¹¹。FASTMETプロセスに対抗できるコスト競争力の実現を目標としたHi-QIPプロセスの開発は、こうして所期の成果をほぼ達成することになったのである。

Hi-QIP プロセスが、こうしたコスト競争力を獲得した背景には、低コストのプロセス開発を徹底的に追求する開発スタンスが存在していた。この開発スタンスは、一見、生産性が高いように見える圧密体の原料を採用したプロセスを採用しないほど徹底されているものであった。上述の通り、NEDO からの受託研究では、少なくとも生産性の観点からは、粉原料に対する圧密体の優位性が立証されている。しかし、圧密体を採用するには事前処理工程を追加する必要がある。川崎製鉄の開発陣は圧密体を採用しないために生じる生産性上のデメリットが、圧密処理に用いられる事前処理設備の減価償却費の削減により帳消しになると考えたのである。

こうした観点は、武田が整理したHi-QIP プロセスの5つの開発コンセプトにも明確に反映されている。

「(1)還元材としては石炭を使用、(2)操業コスト低減のため焼結用の粉状鉱石の直接使用、塊成化のためのバインダーなし、(3)製品中の灰分、脈石を熔融、除去、(4)熔融時の耐火物損傷

¹¹ Hi-QIP プロセスは年産50万トン回転炉を4基建設する前提での試算である。回転炉の構造から、単一の回転炉で生産可能な粒鉄は50万トンが限界と考えられるからである。

の防止, (5) シンプルな設備構成による設備費の低減(武田, 2005, p.550)。」

実に5点中, (2), (4), (5)の3点がコスト競争力の強化を念頭に置いて掲げられた開発指針であった。澤も生産性と設備費とのトレード・オフに関して以下のように語っている。

「(ペレットではなく, 粉状での加熱を選択したのは)コストが安くなるはずだからです。(原料を)固めるということは固める設備が必要でランニングコストがかかるということですね。不安だったのはこれら不利な点以上に良い点が残ると負けてしまうのではないかということ。例えば固めた方が生産性には有利だろうというのはある程度は見えていたのです。期待としては生産性が少し落ちても, 固めるための設備費, ランニングコストないことが有利であること。固めても実は生産はできます。」

武田が上記(2)で言及しているバインダーの不使用は, 設備コスト面の考慮に加え, ペレット化に伴う技術課題も重要な検討要素であったことを示している。バインダーとは粉体をペレットにまとめる際に接着剤の役割を果たす物質で, FASTMET プロセスでは粉鉱石と炭材の混合粉に重量比で1.5%程度添加されている(田中他, 2006, p.331)。武田はFASTMET プロセスを念頭に置きながら, 回転炉床炉による還元鉄製造プロセスの課題としてペレットの強度維持を挙げている。

「(回転炉床炉による還元鉄製造プロセスの課題には)生ペレットの強度の維持がある。還元に必要な炭材をペレットに混入するため, その量は体積にして約半分にも達する。炉内挿入時, 還元時に粉化しないように, 微粉鉱石, バインダーを用いることで強度を確保している(武田, 2005, p.43)。」

さらにペレット強度の課題に加え, 原料面での制約も存在していた。川崎製鉄がHi-QIP プロセ

スの原料に想定している粉鉱石はペレット化に適しない粒径の大きな粉鉱石だったのである。上述したように Hi-QIP プロセスは東南アジアでの事業拡大を目的に開発が進められた製鉄法である。このため、粉鉱石の供給地にはオーストラリアが想定されていた。しかし、このオーストラリア産の粉鉱石は粒径が粗くペレット化には適さないのである。ブラジル産の粉鉱石のように粒径が 0.1mm 以下であればペレット化も可能だが、オーストラリア産の粉鉱石では粒径は 8mm 以下なのである。

ただし、山本らが下記に記しているように、オーストラリア産のような粒径の粗い粉鉱石を用いた製鉄プロセスが開発できれば、原料選択の選択肢が広がることになり、ペレット化を前提にしている FASTMET プロセスに対し競争力を獲得できるという側面も存在していた。

「さらなる原燃料条件の緩和のためには、石炭を還元剤として使用し、微粉鉱石よりも粒度の大きい焼結用粉鉱石(およそ<8mm)を使用できる還元鉄製造プロセスが望まれる(山本他, 2001, p.8)。」

Hi-QIP プロセスを FASTMET プロセスに対して、いかにして差別化するか、という課題は「研究者の意地」でもあり、Hi-QIP プロセスの特徴に強く影響することになったのである。澤は、混合粉とペレットととの選択を巡る議論を下記のコメントで締めくくっている。

「まあ、研究者の意地みたいなのがあって、同じことはしたくないというのが多少あったですね。」

VI. 残された開発課題と事業化への取り組み

NEDOからの受託開発を経てHi-QIPプロセスはパイロット・プラントでの連続操業を実証し、実機ベースでの経済性の高さも示された。残された課題は事業化であるが、JFEスチール(旧、川崎製鉄)では、まずダスト処理から手がけ、その後に粒鉄の製造に乗り出すという段階的な事業化を構想している。ダスト処理と粒鉄製造とは、商業生産に伴うスケール・アップのリスクが大きく異なるからである。すなわち、ダスト処理ではパイロット・プラントの10倍程度のスケール・アップで済むが、粒鉄製造の場合には100倍程度のスケール・アップが必要になるのである¹²。15トン/日レベルでの操業は実証できたが、100倍のスケール・アップとなると、どのような予期せぬ事態が生じないとも限らず、慎重な展開が必要であると考えられている。

さらに事業化に伴う投資原資の確保も大きな克服課題である。パイロット・プラントの開発、運用はNEDOの受託研究で賄ったが、事業化の原資は独自に調達する必要があるからである。澤が下記で語っているように他社とのアライアンスも選択肢の一つではあろう。

「(事業化については)今、社内で色々模索しているところです。次のステップでもやはりまだリスクはあるわけですよ。このときNEDOの時のようなお金が貰えるわけではありませんので、社内で全出資するか、どこかと明確なアライアンスを組んで行うかになると思います。多分1基目は自社で建設せざるをえないとは思いますが。そのときは相当な投資額になると思います。」

どのような形態を採用するにせよ、パイロット・プラントを100倍スケール・アップした実機への投資を伴う事業化ではNEDOの受託研究規模を大きく上回る投資が必要になる。東南アジア市場の開拓に代わる、新しいHi-QIPプロセスの位置づけ確立が事業化に向けた次のステップになっているのである。

¹² 定期修理・点検等のため年間30日程度の休止を前提に考えると、日産15トンの炉での年生産量は5,025トンであり、年産50万トンの99.5分の1である。

<参考文献>

1. 川崎製鉄株式会社社史編纂委員会(2000)『川崎製鉄五十年史』川崎製鉄.
2. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2002)『平成 13 年度成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
3. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2003)『平成 14 年度成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
4. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2004)『平成 15 年度委託業務成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
5. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2005)『平成 16 年度委託業務成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
6. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006a)『基本契約成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
7. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006b)『平成 17 年度委託業務成果報告書 基盤技術研究促進事業「フロートスメルターを用いた革新的製鉄技術の開発」』
8. 武田幹治(2004)「CO₂ 削減の次世代製鉄法「Hi-QIP プロセス」の実用化へ」『高圧ガス』Vol.41, No.7, pp.32-34.
9. 武田幹治(2005)「革新的な製鉄法 Hi-QIP プロセスの開発」『金属』Vol.75, No.6, pp.547~553.
10. 田中英年・原田孝夫・吉田昌平(2006)「石炭ベース還元鉄製造法のエネルギー評価」『R&D 神戸製鋼技報』Vol.56, No.2, pp.27-31.
11. 山本哲也・澤義孝・武田幹治(2001)「鉍石炭材混合粉の高温還元特性」『鉄と鋼』Vol.87, No.12, pp.734~740.
12. 米倉誠一郎(1999)『経営革命の構造』岩波新書.