



日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-1

## 高品質製鉄用塊成鉱製造を目指すHPSプロセスの開発

Development of Hybrid Pelletized Sinter Process Aiming at Production of Iron Ore Agglomerates with Superior Properties

坂本 登

日本鋼管テクノサービス(株) 特別技監

Noboru Sakamoto

### 1 はじめに

2002年6月、筆者はブラジルのベルゴ・ミネイラ社モンレバーデ製鉄所のHPS (Hybrid Pelletized Sinter) プラント建設現場にいた。当時海外初のHPSプラント技術移転が決定し筆者はベルゴ社の製鉄技術者に対しHPSプロセスの紹介を行うための訪問であった。日本で開発された技術が日本のみならず遥か19,000キロメートル、地球の裏側ブラジルに新しい技術として芽吹こうとするその時期に立ち会える感動を噛みしめていた。5m径のディスクペレタイザー設置工事を前にHPSプロセスの基礎研究から工業化まで一貫して関与してきた一研究者としてこの光景を感無量で眺めたことを思い出す。

HPSプロセスは既存塊成鉱プロセスの延長上に位置し、これらのプロセスの改善技術によって成り立つプロセスではない。このため研究開発に伴う投資効果、工業化段階での開発リスク、工業化規模の大きさと投資額等どれをとっても一企業で行う研究としては平坦な道程ではなかった。製鉄分野の技術開発とこれに基づく工業化は投資額の大きさ、開発リスク、下工程への波及効果の大きさにより決して多いとは言えない。ここでは製鉄分野技術開発の一例としてHPSプロセス開発を取り上げ今後の企業における技術開発の参考になることを願いその開発経緯を報告する。

### 2 理想的な高炉用塊成鉱を求めて：基礎研究時代(1978～1986)

#### 2.1 NKKの原料研究環境とペレット研究の必要性

1970年代後半、高炉解体調査の結果高炉下部における原料の高温性状の重要性が指摘され<sup>1)</sup>これに対応する焼結鉱の品質と製造研究が活発となった<sup>2)</sup>。この様な状況下、JFE(旧NKK)では原料研究の主体を福山地区に移し研究活動を

開始した。これは焼結鉱の生産主体が福山製鉄所であること、焼結研究を分散せずにマンパワーと研究資金を集中的に投入することが研究開発投資面からも有利であるとの方針に基づいている。その結果京浜地区研究所に属す筆者は焼結鉱以外の原料研究を担当することになった。入社以来現場で高炉を、研究所で直接製鉄研究を担当した筆者にとって原料研究は学生時代の一時期<sup>3)</sup>を除き初めての経験である。

先ず手掛けたのが輸入ペレットの品質調査である。当時京浜地区には大型高炉2基に対し焼結機が1基で処理鉱の不足分は海外輸入ペレットに依存する原料供給体制であった。このためペレットの品質評価は重要ではあるものの限られた実験設備のもとでペレットの圧壊強度、被還元性、ふくれ等を測定するだけではとても研究とはいえない状況であった。海外のペレットプラントにユーザーとして品質の要求を行うにはペレット製造条件まで遡る徹底した品質管理が重要であり、製造条件を再現できるシミュレータにより定量的な製造情報を保有することが必要である。このため高炉での使用量の多いインド、ブラジル、ペルーから入荷するペレットがグレート方式で生産されていることに着目しポットグレート炉設置による製造研究の重要性を社内関係部署に説いて廻った。しかしこの説得は自社でペレットを製造する計画がないことを考慮すれば設置の必然性は無いとの判断から社内では当然反対意見が強く実現性は困難であった。この様に厳しい研究環境下、ペレット研究及びペレット研究を基礎とした新たな塊成鉱研究の重要性を社内関係者に熱心かつ辛抱強く説いてくれた一人の上司がいてくれたお陰でポットグレート炉の設置がようやく決まった。結果的には多額の設備費を要するこの設置がHPSプロセス開発につながるわけで、この上司にはそれ以後HPSという新たな名称の命名を含めプロセスの工業化まで終始世話になりつづけることになる。

図1はシミュレータとしてのポットグレート炉の外観である。本シミュレータは軌道を介し乾燥、焼成、冷却の3ゾー

ンに分割されている。この領域をペレットの充填したポット(内径300 mm φ、深さ400 mm)が軌道上を移動することで各ゾーンの最適操業条件を評価することが可能となるシミュレータである。別途開発した塊成鉱焼成シミュレーションモデル<sup>4)</sup>との組み合わせでグレート式ペレットプラントの最適製造条件の探索を行い海外ペレットプラントとの定期技術交流会でユーザー側の意見を操業に反映するように要求できるようになった。

一方ペレットを含め高温で処理する塊成鉱は人工鉱物の集合体でありその構成鉱物、形態によって塊成鉱の品質は大きく変わることを単一鉱物相の合成により明らかにした。図2は焼結鉱及びペレットの組織観察から代表的な鉱物組織を選択しこれを化学試薬により焼成温度と酸素分圧を制御して単一相として合成した結果である<sup>5)</sup>。この合成試料を還元反応

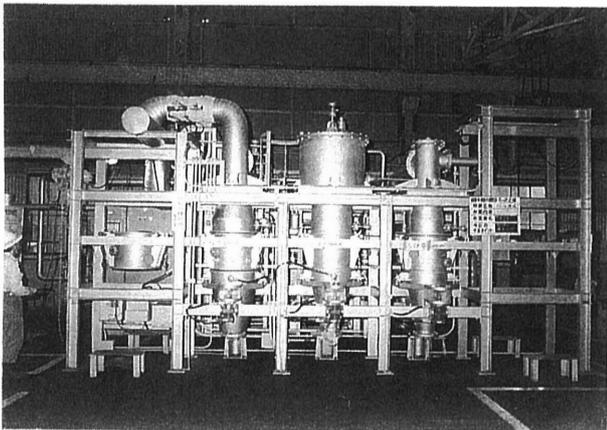


図1 塊成鉱製造実験用ポットグレート炉

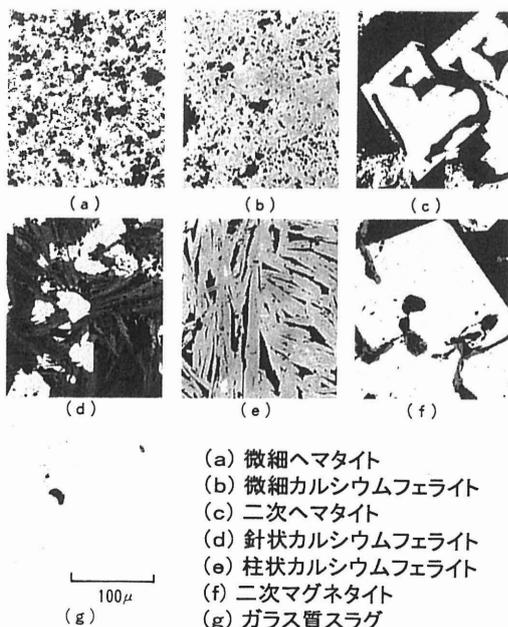


図2 塊成鉱を構成する代表的な鉱物相と形態

速度及び還元粉化の品質面から評価した結果、図2に示す(a)微細ヘマタイトと(b)微細カルシウムフェライト及びこれらの混合組織が望ましいことを結論づけた<sup>5,6)</sup>。80年代より低シリカ焼結鉱製造の機運が高まった<sup>2)</sup>とはいえシリカ含有量が5%台では融液生成量が多くここで示す(a)、(b)組織主体の塊成鉱製造は困難である。(a)、(b)組織を有する塊成鉱はシリカ含有量が4%台で融液量を制御しないと組織設計が達成できない。それゆえこれを達成するには焼結プロセスを基礎にかなりペレットプロセスの考えを導入する新たな塊成鉱プロセスの必要性を考えるようになった。この様な背景のもと究極的な高炉用塊成鉱としてHPSプロセスの概念が少しずつ固まっていた。もっとも社内ではこの様な焼結ともペレットとも異なる新しい考えは理解されず依然として筆者独りで地道な研究を行うに留まっていた。

## 2.2 ペレット研究からHPSプロセス開発へ

1979年から勃発した第2次オイルショックによって80年代に入り海外のペレットプラント、なかんずく燃料転換の難しいグレート式ペレットプラントの停止が相次いだ。このような状況に対し筆者は液体燃料の一部を固体燃料に置換しこれを造粒工程で添加することにより重油使用量の削減を図るペレットプロセスを提案する。ここでは固体燃料の種類、成品ペレット強度及び炭材燃焼速度からみた内装量の限界と新たな添加方法等の技術提案を行っている<sup>7)</sup>。これらの成果は当初、稼働間もないインドのマンドビペレットプラントに適用すべく努力したものの残念ながらプラントの停止に至り努力は報われなかった。但しこの考えはブラジルのニプラスコペレットプラントにおいて造粒工程で炭材の一部を内装する技術として工業化されている。

この時期海外ペレットプラントの停止により微粉ペレットフィードが使用されずに蓄積し続けることになる。ペレットフィードは44 μm以下粒度比率が通常70%以上あり当時低コストにもかかわらず焼結原料への配合には限界があった。但し高品位であり製造方法によっては図2の(a)、(b)組織形成には最適な原料でもある。またこの頃までにはペレットのポットグレート炉による製造研究を通じバースティング抑制のためのグリーンペレット粒径限界、限られた点火時間で内装炭材を完全燃焼させるためのグリーンペレット添加炭材内外装比率の適正化、品質面からみた最適組織設計のための原料配合条件等も明らかにしている。これらの研究成果をもとにペレットフィードを大量に使用する条件下で新たな高品質塊成鉱としてのHPS製造プロセスの基礎概念を構築した。

図3にHPSの外観を既存焼結鉱との比較で示す。これより高品位原料から構成されるHPSはその製造過程で不足する結合融液の代わりに徹底した事前造粒でペレット並みの嵩

密度を有する10 mm以下のペレットを製造する。次にこれを燃焼速度向上と燃料原単位削減を目的に粉コークスの大部分を擬似粒子に被覆する。そして多少の乾燥工程を経て点火焼成することにより図3 (2) に示す外観を有するHPSが得られることを実験的に明らかにしている。もっとも、筆者の思惑とは異なりHPSプロセスの社内での評価は相変わらず低く本格的な開発研究テーマにあげるまで更に数年かかることになる。HPSプロセスが理解されない主原因は微粉原料を造粒するという単位操作はペレットプロセスであるから会社の技術開発ニーズに合致しないこと、焼結機を使用し生産する単位操作は焼結研究に属し福山地区で研究中ゆえ不要との判断に専ら依存している。それでも数少ない賛同者の尽力もあり少しずつ社内製鉄分野関係者に理解されはじめる。提案後数年を経てようやく開発研究テーマにあげることができた時には今までの努力が報われた思いであった。この時期理解されるようになったもう一つの理由はHPSプロセスの基本概念と実験による概念の検証を学振54委で報告し<sup>8)</sup>、ここで大学、他社から評価されたことも原因の一つになっている。発表当日会場からの賛否両論の質問が多く出され委員長より翌日も会場で質問を受けるよう要請されたことを鮮明に記憶している。

### 3 工業化に必要な技術開発： 応用研究時代 (1986～1988)

この時期に至りようやく社内でも検討に値するとの意見が大勢を占めるようになったが依然として開発に反対する意見も多かった。特に原料・焼結分野では根強い反対意見が社内技術部会等を通じ多く発せられている。主たる反対理由はペレットフィードの大量使用、成品塊成鉱のシリカ量5%以下の管理では造粒不足によるベッド内の通気性悪化、低シリカによる融液不足と返鉱量増大を引き起こす等の見解である。その結果高炉への処理鉱配合率確保が困難となり計画出鉱量確保が難しくなるとの意見が多かった。なによりもかつてこの様な極端な原料条件で操業の経験の無いことが強い危機感

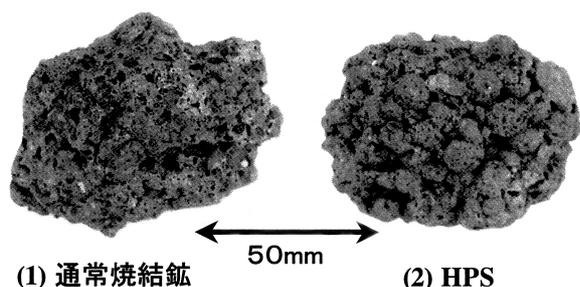
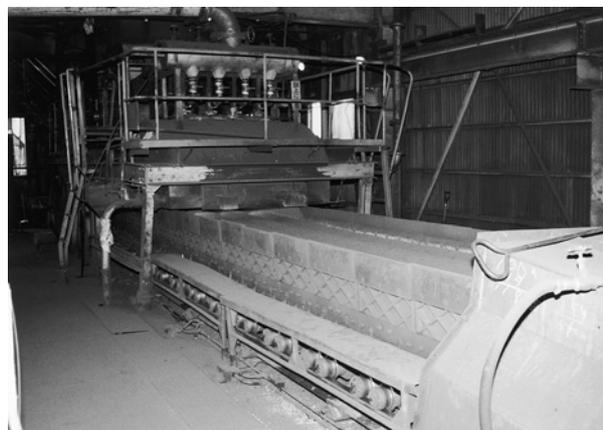


図3 通常焼結鉱とHPSの外観比較

となって現れている。

その様な意見が多い中、製鉄分野トップの意見でHPSプロセス工業化の可能性をセミコマーシャルプラントで検証することになった。この時期を境に研究所で細々行っていた研究が一転、全社を挙げた開発体制に移行することとなる。使用するプラントは新潟電気製鉄所 (当時) 設置フェロマンガン焼結機 (有効グレート面積：7m<sup>2</sup>) の改造で対応した。図4に焼結機の外観を示す。HPSプロセスは徹底した造粒による通気性改善を意図するためベッド層厚を設計値の300 mmから500 mmとし点火炉の嵩上げを行った。このため図4に示すようにグレートサイドプレートの上部に応急的に耐熱鋼板を溶接し高層厚化を図っている。その他4 m径ディスクペレタイザーによる造粒、同規模ペレタイザーによる粉コークスの被覆工程は焼結機脇に応急的に建設し早期の技術評価を指向した<sup>9)</sup>。1987年11月末より研究所、福山製鉄所、本社製鉄技術開発部の混成部隊による長期操業試験を開始する。単純な原因から本質的な原因まで様々な原因により、操業開始より1週間はほとんどまともな操業が出来なかった。先ず単純な理由はこの時期太平洋側で育った人間には想像もつかない雷鳴を伴う雲混じり横殴りの風雨が吹き続ける冬期日本海側気候である。この風雨によって屋外で造粒・炭材被覆を行っている事前処理工程では粉コークスが吹き飛びペレットへの被覆がほとんどなされないこと、その結果グレートでのムラ焼けの発生であった。また本質的な原因として造粒及び炭材被覆が安定して行われるもののパイロットプラントではグレートへの装入がサージホッパーからロールフィーダーを介し行われる方式を採用している。このため造粒ペレットのホッパー内での積みつけ荷重により崩壊比率が高く、また切出しゲートと接するペレットは摩擦により崩壊が顕著となる。その結果ベッド上層部に崩壊ペレットが装入され通気性悪化により下層部まで熱が移動せず返鉱のみが増える操業が



有効グレート面積：7m<sup>2</sup>

図4 200t/d HPSプロセスパイロットプラント

続くことになる。この様な状況に対し造粒監視の励行、サージホッパーレベル管理等の対策により2週間目より徐々に期待通りの操業が可能となった。特に品質面では焼結鉱との比較で優れたHPSが得られることを1ヶ月にわたる長期操業を通じて確認した<sup>9)</sup>。操業初期にはまともな操業ができず極度のストレスと日々続く悪天候により体調を壊し病院に運び込んだメンバーが複数であったことからこの時期の操業がいかに厳しかったかが窺える。

長期操業結果及び操業を通じて得られた問題点と課題を報告書として社内関係者に提出し最終評価を待つことになる。パイロットプラント操業では種々のトラブルはあったものの筆者は基礎研究より得られた成果とプロセス上本質的な違いはほとんど無いと考えていた。この様な状況下、あらゆる点からの技術評価を行いHPSプラントの福山製鉄所での工業化が決定した。決定に至るまでは社内意志決定機関で多くの論議がなされたと思うがその間の経緯については当時一介の課長であった筆者には窺い知るはずもなかった。おそらく製鉄分野のトップメンバーは責任の重大さのためこの時期の心痛は察するに余りある。一方原料戦略としてこの頃、豪州の微粉原料の長期契約<sup>10)</sup>を行うと共にコスト競争力の高い海外ペレットフィードの長期にわたる手当も完了している。もはや原料面からは焼結プロセスでは対応不可能な状況に移行することになった。

## 4 新たな出発：プラント建設と操業開始（1988～）

福山製鉄所でHPSプロセスを工業化する場合、焼結機の改造によって対応することが決定したがどの焼結機を改造するか決めかねていた。当初稼働中の焼結機の操業を阻害しないこと、稼働中の2基の大型焼結機ではリスクに対する波及効果が大きすぎることから著者を含めた開発部隊の総意として休止中の中型焼結機3DL（有効グレート面積：290 m<sup>2</sup>）の改造を答申した。これに対し会社幹部は大型プラントの方が利益率は高いこと、大型焼結機でリスクが高いとの意見は技術に自信がないのではとの見解があり最終的に当社最大の焼結機5DL（有効グレート面積：550 m<sup>2</sup>）のHPSプラント化が決定した。この頃までに伝熱面からグリーンペレットへの炭材被覆の有効性及びペレット芯部の十分な組織形成のための最大粒径限界等を更に実験的研究で明らかにし工業化に備えている<sup>11)</sup>。稼働中の5DLの改造は事前に造粒及び粉コークス被覆プラントを建設し最後に焼結機へのつなぎ込みを行った。ペレタイザーは当時世界最大級、内径7.5 mディスクペレタイザーを10基（後に12基に増強）、粉コークス被覆は効率を考えドラムミキサー1基、新潟パイロットプラント操業で課題を残した装入装置はシャトルコンベヤーとラバーベルトフィーダーの組み合わせシステム等がプラント化にあたり新たな導入設備である<sup>12)</sup>。図5に700万トン規模HPSプラ

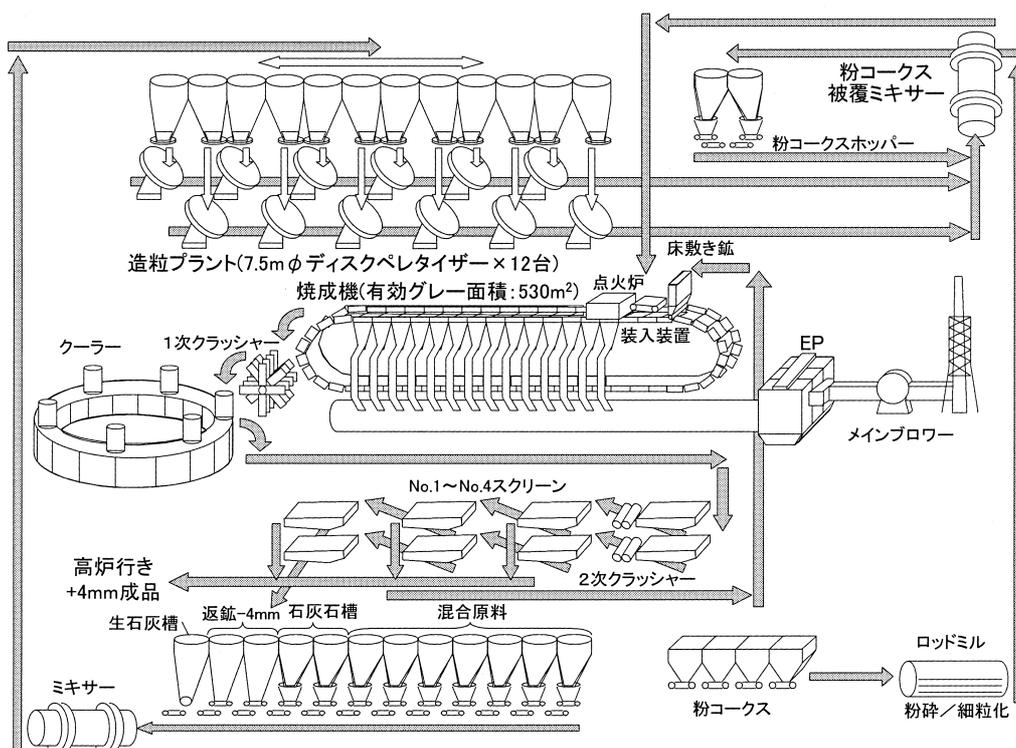


図5 700万トン規模HPSプラントプロセスフロー

ントのプロセスフローを<sup>13)</sup>、図6に本プロセスでは特に重要な造粒及び粉コークス被覆プラントの全景を示す。当初は操業開始後設備上或いはプロセス上重大な問題があった場合、元の焼結プロセスに戻せるようにとの配慮から既存のサージホッパー・ロールフィーダーを焼結機に設置したままとした。しかしこの対応策は大量のペレットフィードを長期契約で入荷することになる微粉原料条件下では気休めにしかならないことは明らかで既に賽は投げられていたと言ってよい。かくして5DLのHPSプラントは総額40億円<sup>14)</sup>を超える改造工事を経て操業を待つことになる。

1988年11月の秋季鉄鋼協会は大阪大学で開催されている。筆者は座長を拝命していたため出席せざるを得なかったが学会初日がHPS商用プラントの操業開始日と重なっていた。このため講演の合間毎に公衆電話に駆け込み焼結管理室に電話をして操業状態を確認したことを15年経った今でも昨日のように記憶している。開始直後から操業はおおむね順調であった。製鉄部を中心とした十分な事前操業検討、組織化された生産現場の操業・保全体制、全社を挙げてのバックアップなどが順調な操業立ち上げに貢献したことはいうまでもない。図7に福山5DLにHPSプロセスを導入する前後の操業を全国平均操業との比較で示す。HPSプロセス導入前の5DLは大型高炉に大量かつ安定して焼結鉱を供給することを第一目的としていた。このため強度管理及び生産率維持から焼結鉱シリカは全国平均に比較し高い設定で管理されていた。その後低シリカ焼結鉱の重要性が認識され全国平均値が徐々に下がるに連動し低下するものの全国平均値を下回ることにはなかった。この様な操業状況下、88年末にHPSプラントが稼働を開始した結果89年より5DLの操業に大きな変化が現れている。高品位ペレットフィードの多量使用と事前造粒の徹底により全国平均と比較し焼結鉱中のシリカの大幅低下を達成している。同時に微粉、低シリカ条件下ではあっても生産性が急速に上昇する傾向がみられる。これらの傾向は基礎研究及び応用研究で得られた結果<sup>9)</sup>と同様の傾向を現



図6 HPSプロセス造粒及び粉コークス被覆プラント全景

すものである。特にHPSの高被還元性は高炉塊状帯での還元性の改善、その結果としてのシャフト還元効率の改善が認められることを操業解析によって明らかとした<sup>12)</sup>。これに加え高炉下部における未還元FeOを含むスラグ量の低下により、この領域の通気・通液性を改善する効果もまた認められる。そしてこの効果は高PCI高炉で熱流比が相対的に低下する操業条件下で特に顕著な効果を発揮することを確認している。たとえば図8に福山4高炉で高PCI操業を指向したときのHPSが高炉下部通気性改善に果たした役割効果を示す<sup>15)</sup>。96年よりHPSの高被還元性のみならずその優れた高温性状

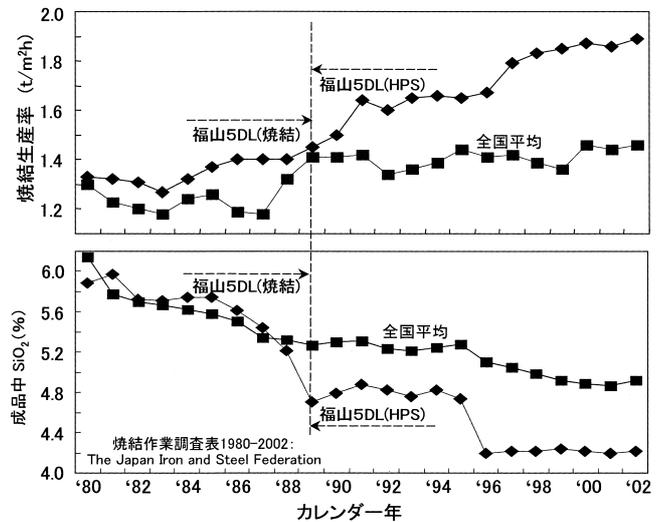


図7 HPSプロセス導入前後の操業と焼結全国平均操業の比較

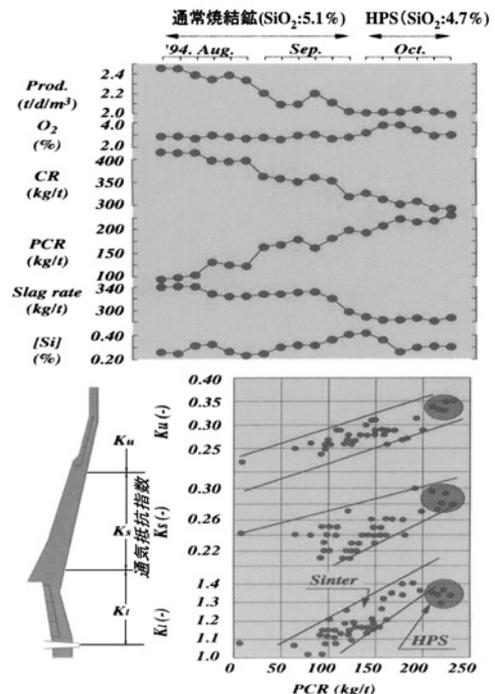


図8 高PCI高炉へのHPS多量使用と高炉下部通気性の改善<sup>15)</sup>

に着目し、それまで使用していたMgOフラックスの削減を図った。その結果高温性状は維持しつつ更にシリカは低下し最近では4.2%台で操業を継続している。この様な品質設計はその後の高PCI高炉側の原料ニーズにも合致するものである。

## 5 結果からHPS開発研究を振り返れば

いかなる技術開発といえども企業で行う研究には明確なニーズ、開発技術項目と期間、開発予算等が明らかでなくてはならない。技術寿命の短命化に伴い最近の大型技術開発は優れたプロジェクトリーダーのもとに技術横断的なメンバーを編成し最短時間で完了する方式を指向することが多いようである。HPSプロセス開発もパイロットプラント実験以降は社内プロジェクトを編成し目的に向かい最短時間で技術開発が完了し工業化に至ったといえる。しかしそこに至るまでの筆者の行った研究開発は既述のように目標、開発時期、開発技術どれをとっても明確な方針に貫かれていたとは言えない。ここでは筆者のおかれた不遇と思われた研究環境が結果から見ると必ずしも悪かったとは言えないことを示し、研究のあり方を再考してみたい。

### 5.1 原料研究の素人

筆者の過去の業務経歴から研究所で新たな研究を始める場合高炉及び高炉に関連する研究の選択肢があった。しかし個人的な理由もありあえて次の研究テーマを原料分野に求めている。原料分野の研究は初めてではあったが、当時社内では焼結研究以外であれば自己の評価を求めない限りかなり自由な発想のもと自由な研究の行える環境にあった。逆に言えば焼結分野で行われていた最先端の研究成果に惑わされることなく素人なるがゆえに自分の研究スタイルを構築することが出来たと言える。たとえば当時のペレット・焼結の研究は鉍物学に立脚した学術的には世界最先端の優れた研究がなされている。ただこれらの成果が高炉内現象とどう関連するのかが高炉と原料の横の情報交流が不十分なせいもあり高炉出身の筆者にははなはだ不服であった。このためHPSプロセス開発にあたっては最終目標が高炉原料であることをいつも念頭においていた。この様な考え方がもとになり図2に示す組織合成による高炉にとっての適正組織の確認が研究の出発点となっている。

### 5.2 長期にわたる研究期間

HPSプロセスは基礎研究から応用研究を経て工業化されるまでに約10年かかっている<sup>14)</sup>。最近の技術開発は技術進

歩に応じその開発期間は短縮される傾向にある。そのような状況下で基礎研究を入れると異例ともいえる10年の開発期間を要した本プロセス開発は著しく永いと言えよう。工業化を前提にした企業研究は前述のように目的、開発期間、開発予算が明確でなくてはならない。この様な観点から企業における開発研究はテーマ化されることになる。それゆえまだ漠然としたプロセスイメージと工業化シナリオがはっきりしない段階でHPSプロセスが開発テーマ評価の俎上にあがれば直ぐに開発中止の結論になったはずである。当時ごく少数の関係者が僅かな可能性を期待して永く地道な研究をさせてくれた研究環境に改めて感謝しなくてはならない。

### 5.3 研究分野の制約

2.1に既述したように80年代、社内の原料研究の中心をなす焼結研究は研究効率を考え京浜地区では禁止されており焼結以外の塊成鉍研究を行うことになっていた。このため自社で製造計画のないペレット研究をせざるを得ない環境にあった。当時この様な割り切りは研究効率面では効果を出すかも知れないが研究で一番重要な自由な発想を狭めるものと納得できなかった。しかしながらペレットと焼結鉍を比較した場合鉍物相の種類と量、鉍物のモホロジーは異なるにせよ人工鉍物の集合体であることに変わりはない。この様な状況下で当時大量に蓄積されつつあったペレットフィードを有効に活用するためにはHPSプロセスのような徹底した事前処理とグレートプロセスの組み合わせは必然的な発想であったかもしれない。いずれにせよ原料研究を5%台シリカ含有焼結鉍研究から始めていたら、また高炉から要求される塊成鉍物組織設計の発想がなかったならHPSプロセスはおそらく実現しなかっただろう。

以上開発結果からHPSプロセスを振り返ってみた。結果から見れば78年、社内の一部関係者以外まったく省みられることなく密かに萌芽した新プロセスが工業化されるにまで至った理由は大きな目標のもと、計画に則り着実に進んだとは程遠いものであった。終始一貫開発技術に間違いはないとの筆者の強い矜持はいささかも揺るがなかったがその様な一研究者の個人的な確信で工業化が決まるはずはない。結果的には技術の生い立ちを含め恵まれた偶然性と製鉄部門で新たなプロセスを工業化しようとする数少ない関係者の強い意志のもとでようやく実現できた技術開発といえよう。

## 6 おわりに

企業における技術開発の一例としてのHPSプロセスの基礎研究から工業化までを概説した。結果的には全社プロジェ

クトになるまでは技術開発の参考になるようなサクセスストーリーとはほど遠く、筆者の提案プロセスは無視され続け挫折の連続であったことが理解されたであろう。しかし改善研究を除き、過去いかに多くの研究が「研究は成功したが工業化には至らなかった」といった例が多かったか反芻する必要がある。その中で今回のHPSプロセス開発が多少なりとも読者の今後の技術開発に役立つものであれば望外の幸である。

操業開始以来15年を経てHPSという名称もようやく一般に認知されるようになった<sup>16)</sup>。この間、操業開始時に比較し大量に配合する高品位ペレットフィードのコスト優位性は国内では少なくなってきた。このため徐々に操業の見直しも必要になるであろう。反面、冒頭で述べたブラジルでのHPSプロセスは順調に操業を開始している<sup>17)</sup>。近い将来移転技術の咀嚼に加えブラジル産高品位微粉原料100%操業により福山HPSプロセスに比し操業面でも、品質面でも上回る可能性も出ている。この様に新たな環境下で技術開発の原点に立ち返り、理想とする塊成鋳造プロセスとして更に発展することを開発者の一人として強く望むものである。

#### 参考文献

- 1) 神原健二郎, 荻原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, 535.
- 2) 相馬英明, 和島正巳, 細谷陽三, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982) 15, 2200.
- 3) 原田種臣, 坂本 登, 黒沢信一: 鉄と鋼, 56 (1970) 7, 821.
- 4) 坂本 登, 宮下恒雄: 日本学術振興会製鉄第54委員会提出資料, No.1549 (1981)
- 5) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 6, 504.
- 6) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984) 6, 512.
- 7) 宮下恒雄, 坂本 登, 福与 寛: 鉄と鋼, 68 (1982) 15, 2238.
- 8) 斎藤 汎, 坂本 登, 野田英俊, 岩田嘉人, 福与 寛: 日本学術振興会製鉄第54委員会提出資料, No.1788 (1986)
- 9) 坂本 登, 熊坂 晃, 小松 修, 清水正安, 野田英俊: NKK技報, 126 (1989), 1.
- 10) 日刊鉄鋼新聞記事, 1987年6月2日版
- 11) 坂本 登, 野田英俊, 熊坂 晃, 谷中秀臣: 鉄と鋼, 75 (1989) 1, 50.
- 12) 丹羽康夫, 坂本 登, 小松 修, 野田英俊, 熊坂 晃: 鉄と鋼, 78 (1992), 7, 1029.
- 13) 酒井 敦, 野田英俊, 佐藤秀明, 塩原雅之, 橋本 健, 山下勝宏: NKK技報, 174 (2001) 8, 34.
- 14) 日刊鉄鋼新聞記事, 1988年11月12日版
- 15) A. Maki, A. Sakai, N. Takagaki, K. Mori, T. Ariyama, M. Sato and R. Murai: ISIJ Int., 36 (1996) 6, 650.
- 16) 鉄鋼便覧委員会: 第4版鉄鋼便覧, 第2巻, (社)日本鉄鋼協会, 東京, (2002)
- 17) W.O. Borges, C.C. Melo, C.T.V. Maria, R. Braga, E.A.A.B. Satos, H. Sato and O. Kojima: The International ATS Steelmaking Conf., Paris, 10-11, Dec., (2003)

(2004年5月6日受付)