



# アラカルト

## 高炉のコークス中心装入技術開発の顛末

Progress to the Coke Central Charging in Blast Furnace

稲葉 晉一 (株)コベルコ科研 顧問  
Shinichi Inaba

### はじめに

神鋼加古川製鉄所の大型高炉はNo.1高炉の火入れ以来、10年近くに亘って変動の多い操業を続けていた。その状況を打開すべく、研究所と現場製鉄部が一体となってコークス中心装入技術を開発、念願の安定操業を継続できるようになった。さらに、この安定操業をベースに微粉炭の多量吹き込み操業技術も確立して現在に至っている。

コークス中心装入技術の開発は幾つもの幸運に支えられて完成できたと言えるが、その過程で数々の感動と教訓を得た。少しでも研究開発、技術開発に関係する諸兄のご参考にならむことを願って、その一部を紹介したい。

### 1 高炉研究事始め

加古川No.1高炉(内容積; 2843 m<sup>3</sup>)は神戸製鋼全社員の期待を担って1970年8月7日に稼働を開始した。この高炉は当時としては大型高炉で、しかも装入原料としての焼成鉱は開発されて間もない自溶性ペレット100%(高炉装入物としてはペレット77%+塊鉱石23%)を使用する。このため、炉頂での装入物の堆積状態を制御するムーバブル・アーマー(装入時の原料の反撥板)を設備し、炉内のガス流れと温度分布を監視して最適な装入物分布状態を得る手段としてガスサンプラーが設置されていた。

筆者を含む中央研究所員が加古川に駐在して、このガスサンプラーのデータを含む操業データとムーバブル・アーマー操作をリンクさせて、最適な装入物分布を得るための解析を開始した。その結果、中心ガス流制御の重要性が明確になってきた。解析結果を基にムーバブル・アーマーを制御するものの、中心部と周辺部のガス温度がシーソー状態で変化し、適度な中心流を継続してくれなかった。その結果、高炉の操業もしばしば不安定になった。

高炉炉頂でのペレット、鉱石とコークスの堆積状態を実験でデータとして把握するために、大ベルとムーバブル・アーマーを備えた高さ約5mの半裁縮尺模型と40°扇形のシャフト上部実物大模型を製作した。加古川での駐在で、操業データの解析を通して高炉を知った筆者ら研究員は、皆、自らの手で大型高炉の操業を安定にするとの意気込みに燃えての研究であった<sup>1,2)</sup>。しかし、ムーバブル・アーマーによる装入物の分布制御とはいえ、所詮、装入物の堆積は成り行き任せである。ムーバブル・アーマーの操作法に最適点があったとしても、それで高炉が長期安定操業を継続できるかどうかの一抔の不安を抱きながらの研究であったことも事実である。

1974年9月、突然No.1高炉の炉腹部が10m近くに亘って割れた。羽口部から上の装入物が掻き出され、融着物が残ったままの炉内で炉壁付着物や融着層らしきものを観察した。この観察を通して、情熱を傾けているとはいえ炉頂部の装入物分布制御だけでは高炉の安定操業技術を完成できない、高炉プロセスの基本に立ち返った研究が必要であることを痛感した。

### 2 高炉内の応力分布と固体の降下挙動

まず最初に浮かんだ疑問は、「なぜ、80mm近くある鉄皮が破れるのか」、「高炉内ではどんな力が作用しているのか」であった。そこで、高炉のシャフト角度を変更出来る半裁模型を作製して、layer by layerに装入されたコークスと鉱石が層を維持して降下し、炉壁近傍で混合層を形成する様子を観察した。その結果、シャフト角83°の場合が最も安定に降下し、炉壁近傍の混合層が最も少なくなることが判明した<sup>3)</sup>。この角度より大きくても、また小さくても混合層が拡大してしまう(図1)。このシャフト角約83°はほとんどの高炉で採

用されているシャフト角度で、先人の知恵に感服した。

次に高炉の全周模型によって、炉内の堆積層内と炉壁への応力分布を解明することを試みた。炉壁への応力の測定では、何とか市販の土圧計を使用できたが、堆積層内の場合には土圧計がコークや鉱石を前後することなく降下でき、しかも感度よく計測するために、計測研究の専門家の指導を受けて小型の埋設移動型土圧計を自作した。

測定結果の一例が図2であるが、炉壁面への垂直応力  $\sigma_w$  は装入物の断続的な降下のために振幅は大きいが、炉腹部で急激に増加して炉壁への応力集中が認められた。堆積層内の水平応力  $\sigma_h$  も炉腹部で最大ピークを示し、炉壁に近いほど大きくなる<sup>3)</sup>。この実験では常にマーカーを使用して、図3に示すような降下する固体粒子の流線 (Stream line) と等時間線 (Time line) を測定した。この流線を見ると、半径方向のどの位置の粒子もレースウェイ部 (実験装置の粒子排出部) に向かって降下しているが、中心の粒子の行き先が不明であった。観察写真を見ながら、また想像を逞しくして鳩首議論を重ねるも、この時点では中心粒子の挙動を解明できなかった。

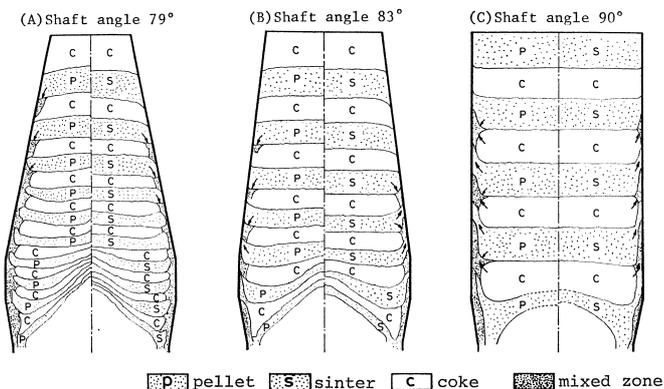


図1 半裁模型実験で観察された高炉シャフト角度変化に伴う周辺部混合層の形成状況

このころ、高炉の解体調査の解析から、高炉内には鉱石が還元されて軟化し、融着した軟化融着帯の存在していることが報告された。固体の降下挙動と軟化融着帯の形成を組み合わせれば、高炉の操業状態を再現できると考えた筆者ら研究グループは熱間模型 (図4) の作製を決断し、研究案件申請の準備に入った。最大の課題は、中途半端ではない高額予算の獲得と火傷などすることなく、観察・計測のしやすい温度で軟化溶解する擬似鉱石の選定であった。

### 3 熱間模型による研究

筆者は駆け出しの主任研究員ではあったが、研究所の新調予算会議に、研究グループの期待を担って室長の代理として出席した。メンバーは所長をはじめ各研究室を率いている室

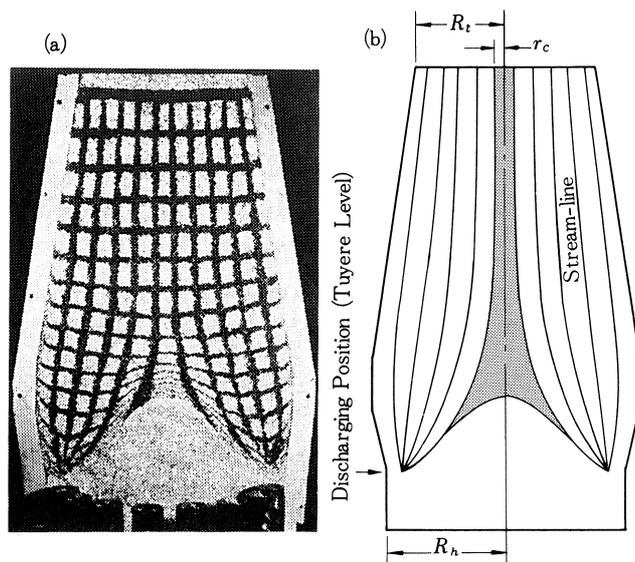


図3 高炉冷間模型内における固体粒子の流線と等時間線 ( $r_c$ : 中心装入半径,  $R_r$ : 炉口径,  $R_h$ : 炉床径)

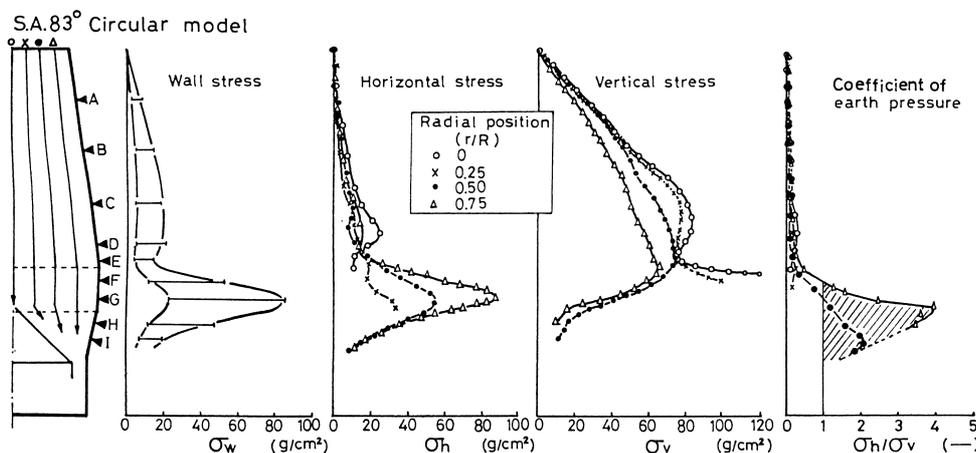


図2 模型実験で測定された高炉内の炉壁応力  $\sigma_w$ 、水平応力  $\sigma_h$ 、垂直応力  $\sigma_v$  および土圧係数  $\sigma_h/\sigma_v$

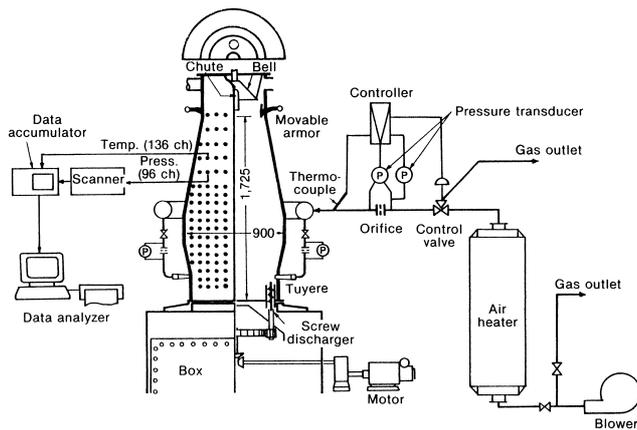


図4 高炉の熱間模型実験装置

長達である。事前に研究企画室において予算の申請内容がチェックされ、A、B、Cにランク分けされて予算配分案が作成されていた。我々の提案はCランクである。Aランクのみでも全予算を超過してしまうことから、とてもCランクの審議などなされない。材料研究が主体で、製鉄に回す予算など無いという。一言の発言もせぬまま会議は終了しようとしていた。所長に「5分間だけ説明をさせて下さい」とメンバーの足を止めた。筆者らのこれまでの研究経過を踏まえて新しいテーマの考え方を説明し、「この研究により必ず当社の大型高炉を安定した好成績にしてみせる。申請額の半分でも認めて欲しい」と訴えた。必死だった。自分では本当にそのような成果を得られると信じていた。常には「製鉄の言うことはよう解らんなあ」と言っていた所長が研究企画室に対して一言「この研究を出来るようにしてやれ」と指示されたのである。嬉しかった。研究の予算が取れたことに加えて、筆者ら製鉄研究者の言うことを理解してくれたのが何としても嬉しかった。

ところが、製鉄所の製鉄部の中には予想される研究成果に懐疑的な人がおり、実験が危ぶまれたが、研究所長は再度筆者ら研究グループ員を感動させてくれた。「これは中央研究所独自のテーマとして実施する」。

今ひとつの課題は、擬似鉱石を如何にして造るかである。調査の結果、複数種類のワックスを混合することによって、適当な軟化温度領域を持ち溶融温度が100℃程度の粒子の出来を確認した。問題は、大量に製造する方法である。模型実験とはいえ、高炉操業を再現して定常的な軟化融着帯まで造るには、一回の実験に約2 m<sup>3</sup>の擬似鉱石が必要であった。議論を重ねるものの知恵はなく、もはや人海戦術に傾き掛けていたある朝、研究者の一人が満面に嬉しさを表して、ラムネ菓子を持ってきた。「これっ！これだよ。昨日帰宅したら子供が食べていたっ！」。ラムネ菓子のプラスチックの瓶に小さく製造所名と電話番号が記されていた。早速製造所

に擬似鉱石の製造を依頼するも、にべもなく断られた。製造所に向いてお願いするも「わしらは子供向けの菓子を作っている家内工業だ。衛生面では保健所の厳しい指導を受けている。ワックスを打った機械で子供の菓子が打てるか。業務停止にされて生活できんようになる。」と取り付く島もない。研究者も必死である。やっと見つけたグッド・アイデアである。何度も交渉に通い、ラムネ菓子の製造ラインを洗った菓子はすべて引き取ることで提案し、とうとう親父さんは「君らには敵わんなあ」と引き受けてくれた。情熱の成せる業と言うべきだろう。

実験が開始されてみると、軟化融着帯の形成状況がよく解る。現場も、部長の指示でスタッフをはじめ職長まで頻繁に見学に訪れた。

しかし、またまた問題が持ち上がった。熱間模型装置の炉頂で如何にムーバブル・アーマーを操作して擬似鉱石とコークスの堆積状況を変化させても、狙いとする逆V型の軟化融着帯が出来ない。模型装置のムーバブル・アーマーではコークスを中心部に多量に装入できないのである。現場に配属された新入社員が研究所での実習中で、実験に参加していた。装入を担当させられ、ついに業を煮やした彼は規定の秤量分とは別に手で一握りのコークスを中心部に装入しだした。結果は、中心部のガス流が助長され好結果が期待された。そこで、中心部にコークスの別装入用のパイプを取り付け、装入物分布と軟化融着帯形状との関係を定量的に把握した。ここにコークス中心装入技術の起点があったと見る事が出来るが、この時点では未だこの技術の本質の意味は十分理解できていたとは言えなかった。この熱間模型実験と平行して、正規の研究テーマとしては登録されていなかったが、冷間模型実験で未解決であった中心部のコークスの行き先を当初の冷間模型を改造してしつこく追究していた。当然正規の研究テーマの研究費は当初予算の2～3倍に膨れあがっていた。その結果、炉頂で装入された中心部のコークスは炉芯部に入っていくのではないかと考えが持たれるようになっていた(写真1)<sup>4)</sup>。

## 4 大型高炉模型による連続移動層実験

従来、高炉は炉頂の装入物分布と羽口部の送風条件でしか制御出来ないと考えられていた。炉床部の熱的状态や通液性は結果として現れるもので、制御は不可能であると考えられていた。筆者らグループの研究員の心はほのかではあるが新しい技術への希望が湧くのを感じ、徐々に大きくなるのを覚えていた。各研究者は自身の気持ちに急ぎ立てられ、日々の実験が楽しかった。「もっと行け。早くやれ。きっと旨く行

くぞ」と。もし、この中心部のコークスが炉芯を形成するという考えが事実なら、不可能と考えられた高炉下部の制御が可能になるのだ、自分たちがその技術を創るのだと意気込み始めた。

この考えを確認するために、高炉上部の装入物が8時間に入れ替わるのに対し炉芯コークスの入れ替わりは2週間という速度差を持つ全高約10 mの高炉の全体模型を作製し、連続移動層としての実験を開始した。かなり高額な製作費が必要であったが、今回は比較的容易に予算を獲得できた。数回の実験で、中心部に装入されたコークスが炉芯を形成することが確認された。数ヶ月後気付いたときには、この装置はもうお役ご免と見る影もなくバラバラに解体され、多数設置されていた計測装置は全く別の新しい研究の探索に流用されていた。現在九州大学大学院の教授として活躍されている、某研究員の仕業であったが、上司として、グループ員が前向きに自らの考えに従って高炉技術の確立を目指していることに大変な嬉しさを感じたことを今でも忘れられない。ここで、高炉上部のガス流れと高炉下部の制御が出来るコークス中心装入技術がはっきりと意識された。残るは実機高炉による試験である。

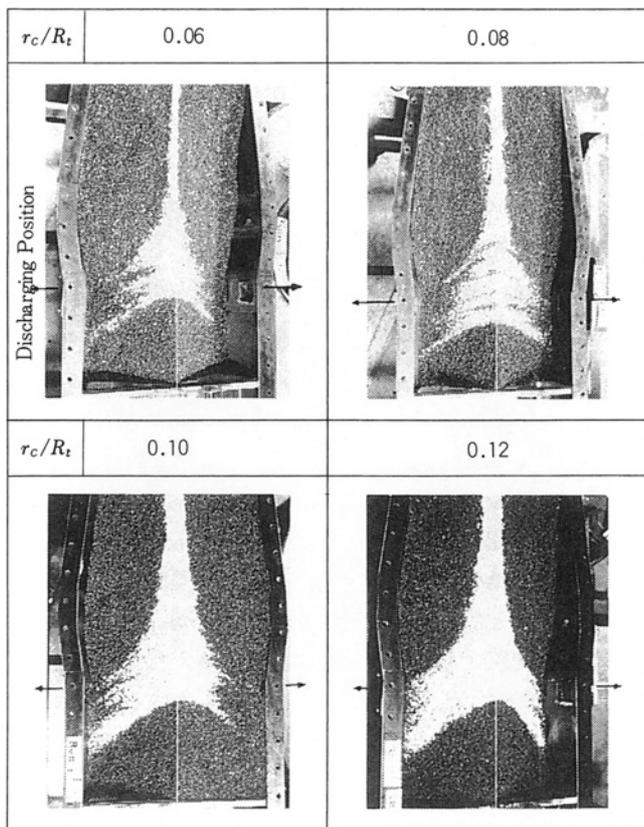


写真1 トレーサコークスによる炉芯の更新状況

## 5 実炉テスト

実高炉でのテストに向けて製鉄部と何度も打ち合わせを行った。製鉄部スタッフは「本当に狙い通りに中心にコークスを装入できるのか」と慎重な態度を取りつつも、前向きに対処し、高炉鑄床下で実機規模の装入・落下実験も行った。実機テストは厳冬期になる。加古川流域は北風が強く、しかも海岸近くにある高炉の地上50 mでのテストで並の厳しさではない。関係者は厳冬期のテストに逡巡していた。しかし、製鉄部長は可及的速やかに、1月中旬から2月末までの実機テストを加古川No.2高炉で実施するとの決断を下したのである。「良いと考えることを先送りする必要はない」と。テスト中のある夜、テスト現場を視察し、厳しい寒さを実感した。実験作業を請け負った関係会社の社員は、装入用に地上50 mのデッキに積み上げられたコークスを手作りの缶ストロープで燃やして僅かな暖を採りながら「5分毎に秤量して、装入せねばならない。トイレに行く暇もない」とこぼした。これによって、コークス中心装入技術が完成した<sup>5)</sup> (図5)。

## 6 外部発表と受賞

1987年の鉄鋼協会秋季講演大会で口頭発表することとし、その発表日に合わせてプレス発表を行った。高炉鉄鋼メーカーの中で最も歴史が浅く、大型高炉の操業に苦しんでいた神戸製鋼が、高炉の長期安定操業技術を開発したということで各紙とも大々的に取り上げてくれた。講演大会での口頭発表も3件連続で、1時間を要したが、会場を溢れんばかりの皆さんが聴講してくれた。

筆者はすべての研究員に出来る限り若いうちに海外出張を経験させたいと考えていたが、当時、研究者が海外の学会に参加するためには発表することが条件とされていた。しかし、海外の発表に耐え得る、質の高い研究成果は限られてくる。

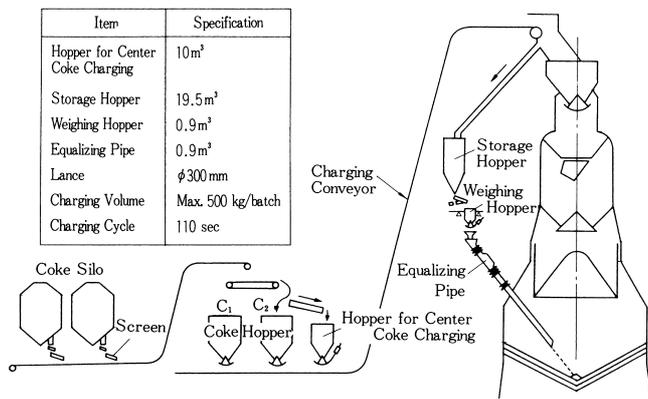


図5 加古川No.2高炉コークス中心装入システム

鉄鋼協会の会員である筆者らではあったが、この研究の成果を海外で発表することを決断した。AIMEの春季大会に投稿・発表し、数多の質問を受けて好評であった。発表から2ヶ月ほど経過した学振54委員会研究会の折りであったと記憶しているが、当時東北大学選鉱製錬研究所長をされていた大森康男先生より、先ず、鉄と鋼に投稿すべきであると強く叱責された。海外発表を優先することに多少の後ろめたさを感じていたこともあり、先生のお言葉は身に応えた。社内からも幾つか非難の声を聞いた。結果的には、AIMEからJosef S.Kapitan賞を授与され、気持ちが楽になった。

## 7 コークス中心装入の意義

高炉は中心部の狭い領域にガスが強く流通している場合に経済的で長期的に安定な操業が得られる。中心断面積は周辺断面積に比してきわめて小さいために中心部のガス流が多少増加したとしても、ガスの利用率等への影響はきわめて小さい。コークス中心装入の意義は図6のように纏めることが出来る。

コークス堆積層の通気抵抗は鉍石堆積層の約10分の1で、通気性がきわめて良好である。高炉中心部にコークスが相対的に多量に存在すると、羽口で生成したCOを主体とする高温のガスは中心部に集中し、軟化融着帯のコークス層を通過して周辺部に分配される。また、炉内のコークスは、その降下過程で鉍石の還元反応によって生じたCO<sub>2</sub>ガスによりカーボンソリューションロス反応(CO<sub>2</sub>+C→2CO)を受ける。この反応を著しく受けたコークスは気孔が増大して強度が低下し、多量の粉を発生する。とくに、炉芯を形成する中心部のコークスがこの反応を受けると、炉芯内に大量の粉を持ち

込み、炉芯の通気、通液性を悪化させる。しかしながら、コークス中心装入によって中心部の鉍石量を減少させた場合には、中心部でのCO<sub>2</sub>ガスの発生量が減少し、カーボンソリューションロス反応が抑制され、粉発生の少ない健全なコークスが炉芯に供給されることとなる。その結果、炉床の通液性が良好となり、出鉄に際して溶鉄は炉床の中心部を通過して流出する。すなわち、炉床における環状流が抑制されて、炉床側壁温度の上昇を防止できる。

## 8 成功のポイント

技術確立に至る過程を振り返ったとき、成功に繋がったいくつかのポイントがあったことに気が付く。

### 1) よく考え、議論し続けた

実験装置や測定手法をはじめ計測端まで自分たちで考え、作り出さねばならなかった。しばしば時間を要したが、突き当たった壁を避けることなく自分たちの考えを一步でも前進させるべく議論を重ね、「中心部コークスの行き先」に見るように仮説を立てて実験を推進した。実験的なKnow Howというより、Know Whyをトライ&エラーで支えたと言える。

### 2) 基本を外れなかった

先行的には高炉の装入物分布技術という高炉炉頂部に限ったKnow How的な開発研究を行っていたが、固体の降下挙動という基本的課題を追究した。鉄鉍石やコークスを“高炉装入物”と捉えず、“固体”と一般化して捉えたことが基本から外れなかった一つのポイントであろう。図7に示すように、“基本”に近いほど問題点が一般化でき、広い領域の人の意見を得やすくなる。

### 3) 現場が前向きで勇気ある決断をした

現場スタッフが研究成果を真剣に評価し、少しでも操業改善に取り込もうとする熱意と意欲を持っていた。また、研究者の数年間に亘る現場駐在により、研究所と現場が一体感を

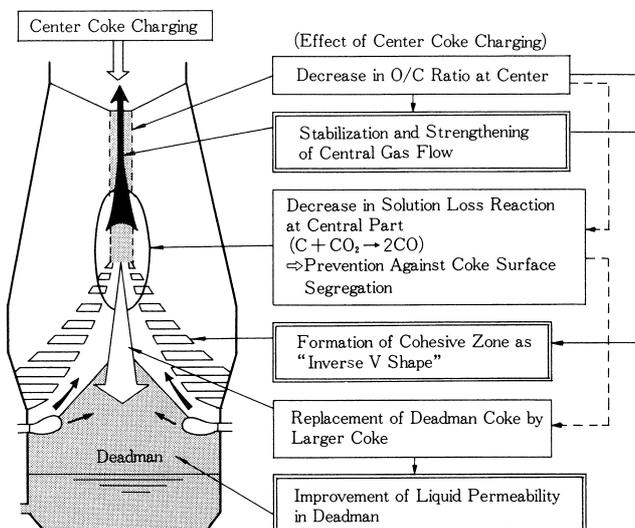


図6 コークス中心装入による高炉内プロセスの制御

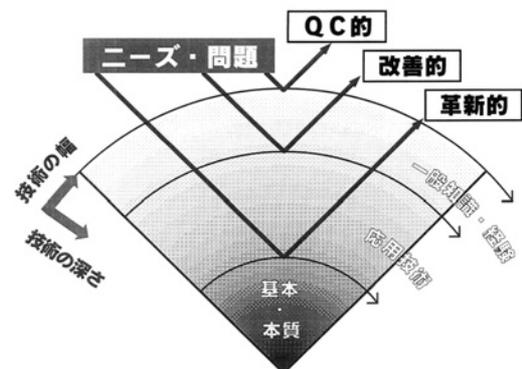


図7 研究開発における技術の幅と深さの関係

持っていた。さらに、季節柄厳しい実機実験となるにもかかわらず、人を張り付けて実施するという鬼の決断をした部長の英断が技術の完成を早めた。

#### 4) 研究所トップが研究員を信頼して支援した

研究所トップが研究員を信頼して全面的な支援をしてくれた。このことが研究グループの士気高揚に繋がり、研究遂行の driving force となった。

## 終わりに

ある日、研究所の近くで、当時の新調予算を決断して下さった元中央研究所長に偶然お会いした。既に関連会社に席を移されてはいたが、時間を取って研究室に来ていただき熱間模型による研究がコース中心装入技術の完成に至った経緯と高炉操業の現状をお話した。元所長は当時のことをよく覚えておられて、我が事のように喜んでくださり、「当時の君の主張はよく理解できたが、本当に高炉操業の安定化に繋がるとは考えなかった。しかし、このグループにやらせたら、失敗しても別の何らかの成果は出してくるだろう」と決断したと当時の心の内を明かして下さった。我々の熱意に賭けて下さったことに、あらためて感謝した。

特許は国内とともに欧米を中心に海外にも出願し、国内でのライセンスに加え、海外では技術協力として活用された。ただ、特許の海外出願に際して、従来の工業先進国に目を奪われ、韓国、台湾、中国等の工業の発展スピードを読み切れず、アジア地域に出願しなかったことが悔やまれる。

我々はグループを組んで常に議論しつつ、種々のアイデアを出し合い、いろいろな専門家の意見を取り込んで研究開

発を推進することが出来た。しかし、これからの研究・開発は一人あるいは少人数でテーマを遂行せねばならず、ややもすると自分の考えだけで推進しがちになろう。しかも早期に成果を要求されるとなれば、必然として、Know How 開発的になりやすい。このような傾向を避けるためには課題を徹底的にブレークダウンして技術の“本質”を見極め、“基礎”を追究するよう心掛けることが重要と考える。“本質”、“基礎”であれば大学の先生方も十分アイデアを提供し、議論して下さるのではなかろうか。結果として、自分のパワーが、あるいは会社の技術力が増大することになる。

## 参考文献

- 1) K.Narita, S.Inaba, I.Kobayashi, K.Okimota, M.Shimizu, T.Yabata and S.Tamada: Tetsu-to-Hagane, 65 (1979), 358.
- 2) K.Narita, S.Inaba, I.Kobayashi, K.Okimota, M.Shimizu, T.Yabata and S.Tamada: Trans. ISIJ, 19 (1979), 667.
- 3) M.Shimizu, A.Yamaguchi, S.Inaba and K.Narita: Tetsu-to-Hagane, 68 (1982), 936.
- 4) M.Shimizu, H.Iwakiri, S.Inaba, H.Miyatani, S.Kitano and F.Noma: CAMP-ISIJ, 3 (1990), 14.
- 5) T.Uenaka, H.Miyatani, R.Hori, M.Shimizu, Y.Kimura and S.Inaba: I&SM, (1998) November, AIME, 34.

(2003年3月12日受付)