



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-18

高炉の進化論

Evolution of Blast Furnace

有山達郎

東北大学 名誉教授

Tatsuro Ariyama



1 はじめに

この記事に依頼されて、あらためて今までに掲載された一連の本記事を読む。大学の研究者の方が豊富な研究経験談を執筆されておられることが多い。私は鉄鋼の研究に飛び込んで以来、概ね40年になるが、正確には31年間、企業研究者、技術者として鉄鋼、特に製鉄の研究に関わり、その後の7年間は大学に奉職した。その約40年の間、産学を通じて高炉、溶融還元法、環境技術、将来プロセスなどの研究に従事した。特定の研究テーマに集中した訳でないが、主軸になるのは高炉研究である。しかし、その間、高炉を極めつくしたという実感はない。研究経験を重ねるにつれて、高炉の奥深さ、魅力、まだ未解明の部分の存在、そして更なる可能性も感じた。コークス高炉を近代高炉の原点とすると約300年になる。20世紀以降、溶融還元法など新製鉄法の研究が活発になり、いずれ主役の座は変わるだろうとされながらも、高炉法は粗鋼生産量の70%以上を占める。原料炭への依存など課題を抱えながら、絶え間ない技術開発によってそれらを克服し、現在でも主流の製鉄プロセスである。ただし、現在、資源対応力、地球環境問題など新たな課題も生じ、今後、製鉄プロセスはどのようなだろう、現行の高炉はどこまで対応できるだろうか、鉄鋼研究者にとって大きな関心事である。以前から、「高炉以外の新製鉄法」とは何か、期待をもって語られることが多い。しかし、高炉法がどこまで変えられるかを知ることが先決である。本稿はアラカルト記事であり、従来にならって個人的な経験談を主にしようと考えたが、それ程、豊富な研究経験を持つ訳ではない。むしろ、その研究経験を踏まえ、これからの命題へのアプローチを示すのが私の役割と思い、将来的に高炉がどこまで進化するのかを私見として記してみた。

2 近代の高炉の歴史をたどる

今では内容積6000m³の高炉も出現している。日本ではほぼ半数が超5000m³の高炉である。高炉はどこまで大きく出来るのか、大きくする得失は何かなど、関心、同時に疑問もわく。将来の高炉を論じる前に、現在までの高炉の歴史を知る必要がある。高炉設計の考え、これは長い歴史の中で経験的に培われ、それが基盤となり、特定の理論はない。しかし、高炉の機能を考慮し、設計について体系的にまとめた書もある。かなり前に遡るが、1937年にPavloffがそれまでの世界の高炉のプロファイルを総括している。日本では「高炉の設計」として戦時中の1943年に翻訳本が出版されている¹⁾。私は日本鋼管に在職中、顧問をされていた相馬胤和先生から翻訳本のコピーを頂いた。欧州、旧ソ連、米国など当時の主要鉄鋼生産国の高炉を比較し、歴史的変遷をまとめている。今でも参考になる。

図1に1900年前後のドイツの代表的な高炉を示す。GHH (Gutehoffnungshütte) のOberhausenの高炉である。1912年に八幡製鉄所の宿老田中熊吉ら一行が渡独し、Oberhausenで実習しているが、その時に見た高炉に近いかもしれない。その高炉プロフィールは現代高炉とかなり異なる。高炉では装入物の円滑な降下を助けるためにシャフト部は傾斜している。また炉腹で下方に向けて径を絞っている。鉱石溶融によって空間消失と、下方から見れば直接還元によってガス量が増大する現象に対応したものであろう。これらは共通であるが、初期のGHHの高炉では炉腹位置は高く、極端に炉下部は絞り込まれている。当時は、熱風を炉床部の狭い領域に集中的に炉内に吹き込むなど炉下部の溶解能力が重視されていたようである。また、上方からの荷重は炉腹で支えるような設計が有効とされ、このような形状となったと推察される。Pavloffの書でも炉高と炉腹径の比率が重視されている。その後、原料処理技術の進歩により、コークスなど装入原料

の性状は著しく向上し、同時に設備改善もあって多量の高温熱風を高速で炉内に送り込むことが可能になり、徐々にシャフト部の還元機能に重きを置いた現代の高炉のプロフィールに近づいていく。米国では古くから良質なコークス入手が可能であったせいか、米国の高炉のプロフィールは早くから今の高炉プロフィールに近い。その高炉の炉内拡大、プロフィールの歴史の変遷を図2に示す。その変化に注目すると、初期では高さ、径方向の両方向に高炉は大きくなっている。この炉容拡大、炉プロフィールの変化には先の原料性状の改善が大きく寄与している。図2の右は1982年火入れの日本鋼管福山5BFである。これ以降、内容積は5000m³を超え、6000m³に近づいて行くが、炉高はほぼ一定である。至近の高炉の炉容拡大は主に径方向の拡大によってなされている。炉内圧損の増大を

回避していることも影響していると思われる。この炉容拡大によって生産量確保は容易になってきたが、一方、径方向の拡大によって径方向の不均一性は助長される傾向にある。性状のそろった高品質原料が必要になる。近代の大型高炉は精密な分布制御と一定の性状に管理された良質な原料供給によって、安定操業を確保しているとも言ってよい。巨大化した大型高炉は最新製鉄技術の象徴であるが、言い換えれば、原料の選択幅及び生産弾力性には融通が利かないことにもなる。このあたりに、次展開への課題も見えてくる。

3 高炉の良さと課題

高炉の将来を考える上で、高炉以外の製鉄プロセスとの比較も論じなければならない。高炉以外の製鉄プロセスにはシャフト炉などの直接還元、溶融還元プロセスなど多岐にわたるが、原料、還元材によって大別できる。図3は使用する還元材種、鉱石種類によって製鉄プロセスを大別した図である。鉱石は焼結鉱など塊成鉱と粉鉱に分け、還元材は石炭系、天然ガスによって分類した。また現状のプロセスの規模感を原点からの距離で示した。大型高炉の生産規模はほぼ400万トン/年であり、MIDERX、HYLなどシャフト炉プロセスも最大で200万トン/年を超えつつある。一般に高炉以外の新プロセス開発の主目的は一般炭、劣質原料の利用にあり、これに対応した溶融還元、回転炉床など多数の方式が生まれ、粉鉱と一般炭利用の領域に集中している。回転炉床など石炭と粉鉱の直接利用は焼結機、コークス炉を不要とし、概念として資源対応力では優れるが、後述するように生産性の制約から現状では規模的には高炉スケールには達しない。多くは

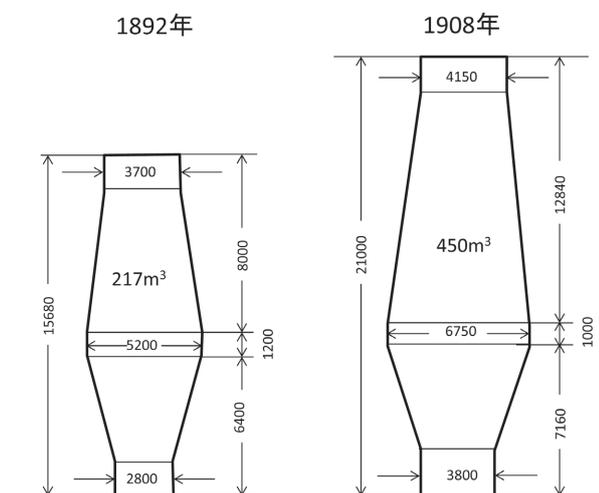


図1 1900年前後のドイツ Gutehoffnungshütte 社の高炉

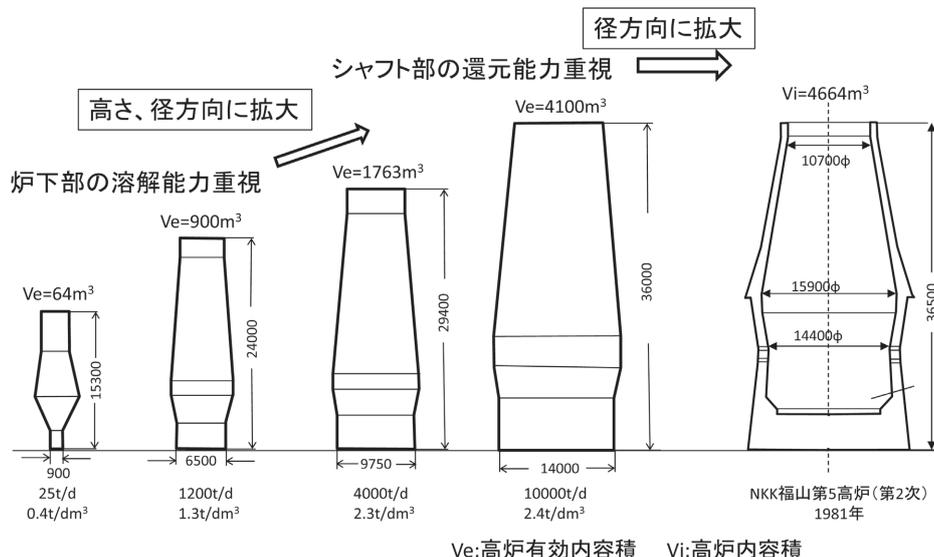


図2 歴史的な高炉大型化に伴うプロフィール変化

グリーンフィールドに建設される小規模製鉄向けに位置づけられる。

以前に、コークス炉の更新対策として日本では鉄浴式溶融還元法、DIOS (Direct Iron Ore Smelting Process) の開発が行われた。私も1990年前後にこの技術開発に関わった。コンセプトとしてはエネルギー事情、原料事情など日本の実情に合ったプロセスを指向し、究極的には高炉の代替を目指した。DIOSは500t/dの中間プラント運転まで進み、優れた点をいくつか列挙できるが、高炉と比較した時、反応器としての本質的課題も抱えている。図4は高炉との比較図である。これは1990年代半ば、中国にて新製鉄法について講演した際に作成した図である。高炉は向流型の反応器であり、レースウェイで高温の還元ガスが生成し、自然に上方に向かい、鉄鉱石を加熱、還元し、効率に優れる。溶融還元法の反応機構に着目すると、溶銑の上層のスラグ浴内における酸化鉄の液相還元が主体である。高速還元が達成できるが、この領域に多量の熱供給を必要とする。還元で発生し、上方に移動したCOガスを二次燃焼させ、発生した熱を下方の還元帯に戻さねばならない。つまり、熱を必要とする還元帯が下部に、発熱帯が上部に位置し、高炉とは逆である。着熱効率上昇の

ために強攪拌が必要となるが、完全混合に近くなり、排熱温度も同時に上昇する。反応器内の熱制御が難しい。炉体への負荷も大きい。溶融還元ではこの課題解決が不可欠である。この問題を軽減するためには予備還元炉を設け、酸化鉄を予熱・予備還元すれば良いが、鉱石移送、高温ガスの導入などの問題を併発する。COREX、FINEXは予備還元率を90%程度と大きくし、溶融還元炉の負荷は小さくしているが、固気還元が主体になり、溶融還元の良さから離れる。設備も複雑化し、稼働率で高炉に追いつけるかが懸念される。欧州では、ULCOSプロジェクト (Ultra Low CO₂ Steelmaking) の一環として軽い還元と鉄浴の溶融還元を組み合わせたHIsarnaの開発が進行中である。元々、豪州のHIsmeltを母体に、底吹きなしで進んでいる。豪州で中間プラントを見学したこともあるが、私見では攪拌力不足であり、着熱効率の確保、スケールアップ時の温度均一性維持が難しいと思われる。

MIDREXなど天然ガスベースのシャフト炉は完成度が高く、規模的にも高炉に迫りつつある。元々、成立する地域が在来型の天然ガスの豊富な場所に限定されていた。しかし、直近、シェールガス採掘技術の急発展で米国を始め、多くの地域で安価な天然ガスの入手が容易になり、状況が一変しつつある。至近、米国ではNucor社のTENOVA-HYLの250万トンプラントが建設され、MIDREXの大型プラントも建設に向けて動いている。溶融還元、回転炉床、高炉いずれもいずれもカーボン依存であるのに対し、天然ガスは含水素系ガスであり、石炭系に比べ、電気炉も含めてもCO₂排出削減で優れている。これまでの地域限定を脱することができるか注目される。

高炉に戻ると、焼結機、コークス炉など付帯設備を必要とするが、高炉自体は予熱、還元、製錬を一つの反応器内で達成でき効率に優れる。コークス炉はガス発生装置でもあり、大型一貫製鉄所における最終製品までの所要エネルギーなどとバランスし、エネルギー単価の高い日本に適している。原料炭確保の軽減、天然ガス、バイオマスなど新しい補助還元材への対応力、CO₂発生抑制に対応した工夫が課題となる。

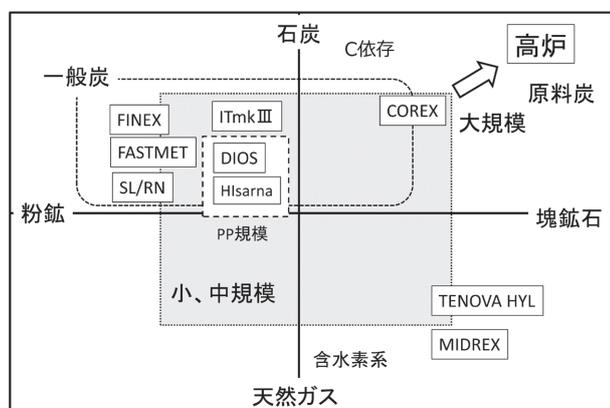


図3 各種製鉄プロセスと使用還元材、原料の関係

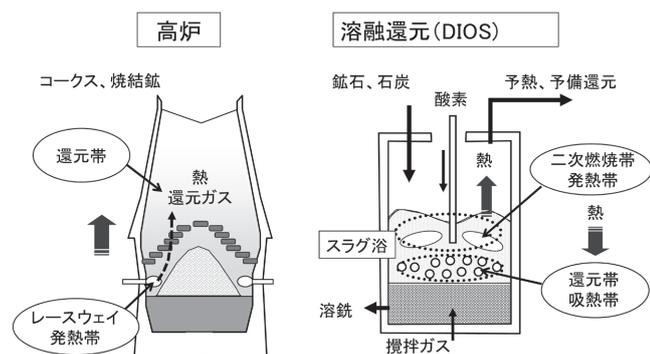


図4 高炉と溶融還元プロセスの原理的比較

4 今後の進化があるか

高炉は生産量拡大を大型化によって達成し、生産合理化などの有利性を発揮できるようになったが、上述のように炉容拡大に伴い高炉内現象も不均一化、複雑化傾向にあり、それを補うために一定品質の原料供給が必要になる。現在のように原料価格の高騰が常態化している状況では、経済性も損なわれやすい。今まで、コークス炉で石炭の事前処理強化など新しい技術開発が活発に行われ、非微粘炭使用比率は徐々に増え、原料炭依存は緩和されているが、コークス品質への

影響を考えると限界にも近い。先の高炉大型化の歴史に戻ると、大型高炉では高品質原料が必須であるが、使う側で原料性状の緩和を図り、その原料性状と高炉の生産性を含めて高炉の設計を再考すれば、高炉の更なる展開があるのではないかとこの発想も湧く。

今後の改善の方向を検討するために、プロセスの生産性について触れる。図5は製鉄の主要プロセスの生産性比較を示したものである。生産性は反応器の断面積基準で示した。既に述べたように高炉が向流型の反応器であり、熱移動、ガス利用に優れる。炉床基準の生産性で言えば、60～80t/m²dになる。なお、高炉の大型化によって出鉄比は向上していない。むしろ、一般には2000～3000m³の中型高炉の方が最大出鉄比に関して良い数字を出している。焼結機は塊成化が目的で機能が異なるが、十字流の反応器であり、処理速度はやや小さい。回転炉床では粒子単位の還元時間は短い、輻射を主体とする熱供給の関係から平面的な反応器となり炉床面積当たりの生産性は低い。高炉と同じ向流型のスクラップ溶解用キュボラに注目すると、同一内容積でも処理量は高炉の10倍以上に達する。高炉内の固体滞留時間は約6時間であるが、溶解機能のみに徹したキュボラでは30分程度ではるかに小さい。共に反応器として効率は優れるが、高炉では還元に必要な時間を要していることがその差異を生む。

高炉で還元速度を高速化できれば、生産速度の大幅向上が可能になる。高炉の出鉄量は増加する。一定の生産量ねらいであれば、高炉をダウンサイジングできる。小型化すれば、強度補償に不可欠であった良質な原料確保の問題を軽減できる。高炉特有の原料炭依存を緩和できるのではないかと、そんな着想も出てくる。還元速度を上げるのが焦点になるが、塊成鉄の被還元性向上は限界に近い。還元ガス分圧を上げるのが得策である。現行高炉は熱風送風であるが、窒素フリーにすれば還元ガス分圧は倍加する。いわゆる酸素高炉に帰着するが、生産性向上に関しては既に1980年代の一連の酸素高

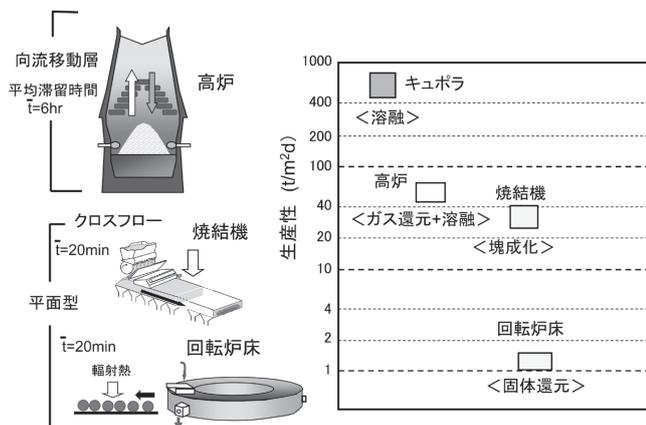


図5 種々の製鉄プロセスにおける生産性比較

炉研究で答が出ている。図6はモデル計算で生産性向上を検討した結果である²⁾。還元速度は向上するために融着帯レベルに余裕が生じ、2倍の出鉄比でも操業可能である。ガス原単位も減少し、流動化、炉下部のフラッディングなど物理的な制約も緩和される。試験高炉でもその効果は実証されている²⁾。従来の検討ではここまでであったが、生産性倍加の効果を利用し、高炉の炉内容積、プロフィールを再検討したらどうかという次の展開も見えてくる。同一生産量で生産性を2倍とすれば高炉内容積は半分にはできる。すなわち、先のダウンサイジングと連結させ、高炉の歴史にあったような伝統的な炉容拡大の考えを脱却すれば、原料制約も緩和できる。図7は東北大学在職中の研究の一部であるが、高炉内容積と粒子にかかる荷重の関係を離散要素法で求めた結果である³⁾。5775m³から3223m³に相似的に高炉内容積を縮小すると、高炉炉腹部の原料にかかる荷重は約2/3になる。稲田らも手法が異なるが、高炉炉容と荷重の関係を解析し、ほぼ同様な結果を得ている⁴⁾。炉高、壁間距離の縮小によって粒子への荷重は減少し、圧潰による粒子崩壊は軽減される。必要な原料強度条件の緩和になり、その余裕で劣質原料の多量使用も可能になる。また、高炉下部には炉芯が不可避免的に形成され、レースウェイ深度は一定であるために、大型高炉では炉芯比率が相対的に増大する。炉芯には粉が蓄積しやすく、不活性な領域とされ、通気性、通液性を妨げる傾向にある。大型高炉特有のデリケートな現象であるが、小型化すれば確実に炉芯は縮小する。高炉内全体が活性化し、操業の安定性は増すと思われる。

全体像を図8に示した。酸素高炉がベースであり、一定生産量のもとに生産性を倍加することにより高炉内容積を縮小する。圧潰による粒子崩壊の頻度減少に基づく原料性状の緩和によって劣質原料の使用が可能になる。優れた高炉の機能を保持しながら、高炉特有の特定原料依存を緩和できる。窒素フリーであり、炉頂ガスの熱量は増大し、高効率発電などその利用価値は増す。高炉内では熱のキャリアーである窒素がないため、高炉上部は熱不足になるが、熱補填のための

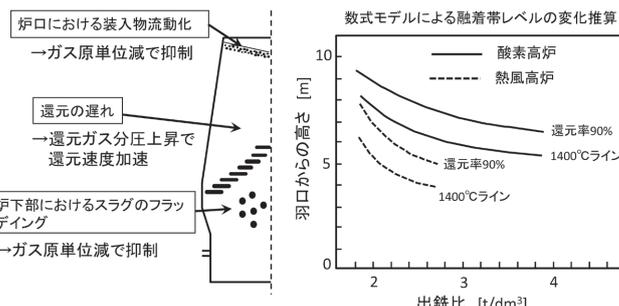


図6 酸素高炉における生産性の向上

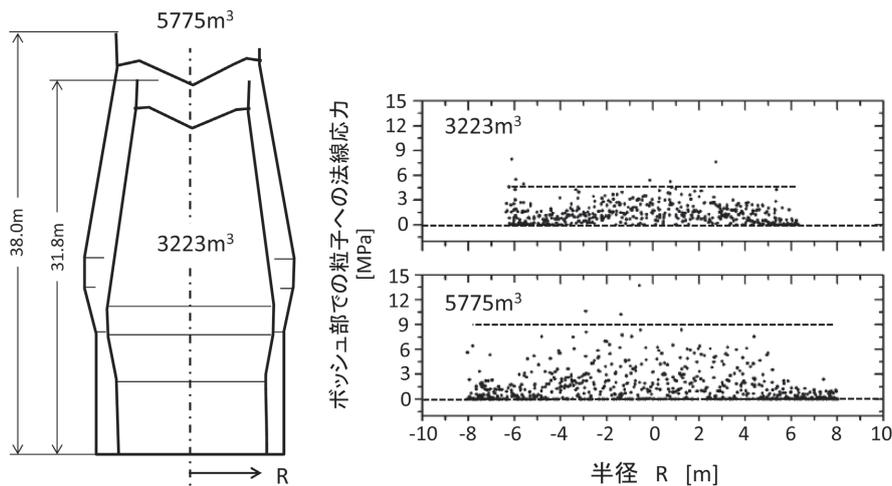


図7 離散要素法シミュレーションによる高炉内容積と高炉内荷重の関係

軽い炉頂ガス循環によって対応できる。酸素送風であり、微粉炭に限らず、注目を浴びている天然ガスなど多様な補助還元材の多量使用が可能になり、低炭素指向に向く。CO₂削減に関しては、高炉、溶融還元などを問わず主還元材を炭素に依存している限り、大きくは変わらない。炉頂ガスの還元能力再生のためにCO₂分離を施せば、炉頂ガス循環で炭素消費量は減少する⁵⁾。特に、炉径が小さければ、炉頂ガス循環に伴う高炉内ガス浸透の問題は軽減される⁶⁾。下工程へのエネルギー供給を切り離し、高炉への還元ガス吹き込みに利用する、これが現在のULCOSなど炉頂ガス循環の基本思想になっているが、窒素フリーであれば、CO₂濃度上昇によってCO₂分離に要するエネルギーは減少し、将来的なCO₂削減への対応力が大幅に向上する。特に高騰している原料炭価格に対し、劣質原料の使用拡大などによって大きな経済効果も有すると思われる。

5 おわりに

鉄鋼生産は発展途上国の旺盛な需要に応じてこれからも大きく伸びるとされている。2050年には現在の2倍の30億トン／年にもなるとの予測もある。しかし、どこで、どのようにして鉄が作られていくのかは見えていない。資源問題、環境問題など鉄鋼製造に伴う課題もいくつかあり、それに対応しつつ現在の連続性も考慮しなければならない。従来は課題に対して設備を付加すること、部分的な改造で対応してきたが限界もある。また、一方向的な進化であり弾力性を狭めていたようにも思える。鉄鋼生産国が類似した発想で進める限り、国際競争力にも欠ける。高炉は優れた特徴、機能を持つ完成度の高いプロセスであり、その原理的な特徴を再考すれば、時代への柔軟性を取り戻すこともできる。ダーウィン

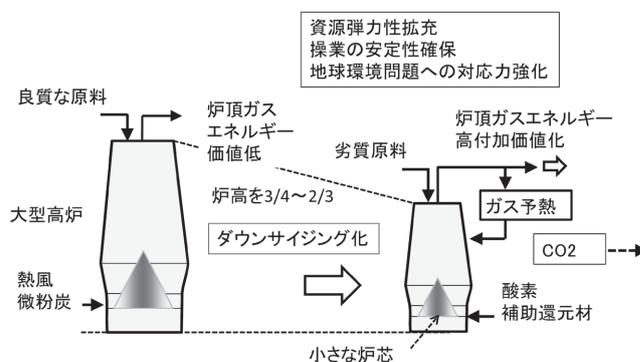


図8 将来に向けた高炉内容積のダウンサイジングとその効果

の「進化論」ではないが、変化に対応できること、これが次の新しい製鉄プロセスになるのではないかと。

参考文献

- 1) M.M.A.Pavloff, 石山一郎訳：高炉の設計，昭和17年科学主義工業社出版。
- 2) Y.Ohno, M.Matsuura, H.Mitsufuji and T.Furukawa：ISIJ Int., 32 (1992), 838.
- 3) Z.Fan, S.Igarashi, S.Natsui, S.Ueda, T.Yang, R.Inoue and T.Ariyama：ISIJ Int., 50 (2010), 1406.
- 4) T.Inada, K.Takatani, K.Takata and T.Yamamoto：ISIJ Int., 43 (2003), 1143.
- 5) R.Murai, M.Sato and T.Ariyama：ISIJ Int., 44 (2004), 2168.
- 6) S.Natsui, S.Ueda, H.Nogami, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama：ISIJ Int., 51 (2011), 1410.

(2013年8月28日受付)