

新しい高温プロセス設計に向けた基礎研究



研究室紹介

竹内 栄一*

Fundamental Approach to High Temperature Process Design in the Next Generation

Key Words : Process Metallurgy, Steelmaking, Reduction,
Refining, Continuous Casting

1. はじめに

これまで我が国の産業全体を牽引してきたのは「素材」であるといっても過言ではない。その中で鉄鋼は長きにわたって産業の競争力を支え続けている。鉄鋼自体、導入期における技術体系の確立から発展期の技術開発、そして今日の世界最高水準の製造技術の確立と大きく進歩してきた。ところがここに来て世界的な鉱物資源や化石燃料消費の急速な伸びが資源枯渇や地球温暖化に拍車をかけ、鉄鋼産業は今までになかった新たな課題に直面している。特に原料から鉄鋼素材を製造する高温プロセスにおいては、最大限の省エネルギー化や環境対応が喫緊の課題であり、産官学で種々の取り組みが始まっているところである。我国だけでなく世界全体の鉄鋼業の持続的発展がその成否に掛かっているといっても過言ではないだろう。

当研究室においては、CO₂やスラグなど従来困難とされてきたプロセスエミッションを大幅に削減すると同時に、これまでの生産性や品質を超える機能を持つ新プロセスをデザインするための基盤研究を行っている。本稿ではその研究手法である高温プロセスメタラジーについて簡単に触れると共に、研究課題の幾つかを紹介する。

2. 高温プロセスメタラジーについて

プロセスメタラジーというターミノロジーは、高温プロセス、特に精錬をはじめとする化学冶金領域の学術を指すもので、1960年代に熱力学で著名な Imperial College の F. D. Richardson の下に集まった研究者達が、熱力学の域にとどまらず反応速度論、輸送現象論を駆使して高温プロセスの定量的記述を目指した研究活動に端を発する。その後、彼らはこの領域を凝固プロセスまで拡大し、プロセスの中で進行する冶金現象のメカニズムを物理モデルや数学モデルを使って表現し、課題解決や最適化に繋げる研究活動を展開した。

筆者は企業の研究部門において電磁力というアクチュエータを加え、より能動的なプロセスメタラジーを目指しつつ、生産効率や品質向上に向けたプロセス研究開発を行ってきた [1]。企業では総合的な取り組みができる半面、基礎的な理解や機構解明に十分な時間をかけることが難しくなりつつある。昨年春より大学にて教育・研究に携わる機会を得、反応プロセス工学領域を担当することになった。エネルギー、環境といった新たな課題を背景にした鉄鋼の高温プロセス領域を対象に、基礎的視点を強化した新しいプロセスメタラジーを軸に革新プロセス設計に繋げる諸元を提案していきたいと考えている。

3. 当研究室の研究領域と取り組み例

(1) 水素利用還元に関する基礎研究

(原料から CO₂ 発生無しに鉄を取り出すプロセス)

水素による酸化鉄の還元プロセスは古くから模索されているが、安全性や還元に伴う温度低下、強度低下が大きな課題である。また鉄鉱石の水素による還元反応そのものについても未解明の部分が多い。図1はコークスを含有する酸化鉄ペレットの還元に関与するガス中水素濃度の影響を示すものであるが、



* Eiichi TAKEUCHI

1951年12月生
九州大学大学院工学研究科 (1977年)
現在、大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授 Ph.D.
反応プロセス工学
TEL : 06-6879-7477
FAX : 06-6879-7477
E-mail : takeuchi@mat.eng.osaka-u.ac.jp

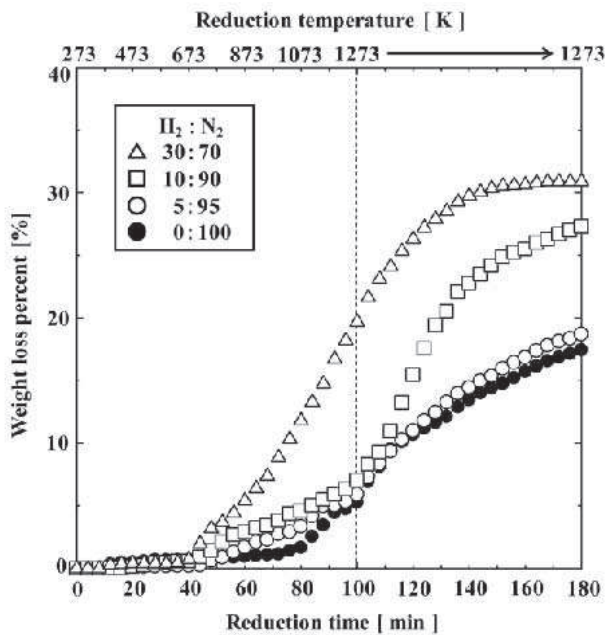


図1 酸化鉄の水素含有ガスによる還元挙動

酸化鉄 (FeO) 塊成鉱の気孔・粒界を制御

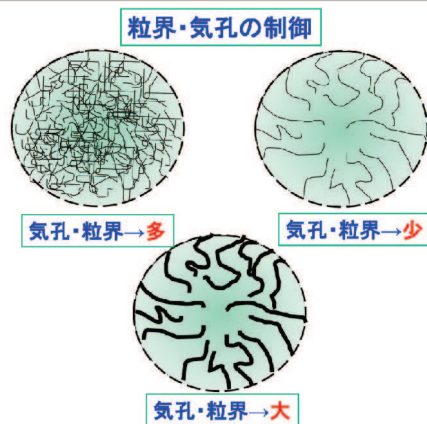


図2 気孔や粒界などを合成した酸化鉄サンプルの模式図

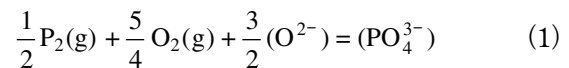
10%の水素含有で、低温域に限らず高温域においても還元が大きく促進されている。また水素還元によって被還元体の組織が微細化する傾向があることも分かりつつある [2]。この組織変化に注目し、図2に示すように予め構造設計し合成した塊成鉱を用いた還元の研究を行っている。塊成鉱中の還元速度や反応時の強度に及ぼす酸化鉄粒径、気孔、粒界のサイズの影響の定量的解明を目的とするものである。また既存の還元反応モデル（未反応核モデル、多段反応帯モデル）では限界がある非還元体の構造やガ

ス組成の影響を記述できる新たなモデルの開発を進めている。

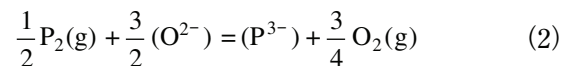
(2) スラグレス精錬に関する基礎研究

(環境に負荷を与えず高純度鋼を製造するプロセス)

エネルギーやCO₂問題と並んで重要な課題が、精錬プロセスにおいて多量に発生するスラグである。現在、溶鋼中の磷（鋼材の脆化を引き起こす元素）は(1)式で示される酸化反応によって除去されているが、その原理上多量のスラグを必要とし、資源環境の点から大きな問題となっている。



一方、酸素分圧が -18 乗気圧以下の還元雰囲気では(2)式に従って(P^{3-})としてスラグ中に溶解することが確認されている。



例えば図3に示すようにCa添加により溶鋼中に極低酸素ポテンシャル環境を安定して作ることができれば、スラグ中に磷が(P^{3-})として吸収される還元脱磷処理が可能となる。スラグ中の(P^{3-})は酸化性ガスにより P_2 ガスとして分離回収することができるため、スラグの発生を伴わない精錬が可能となる。

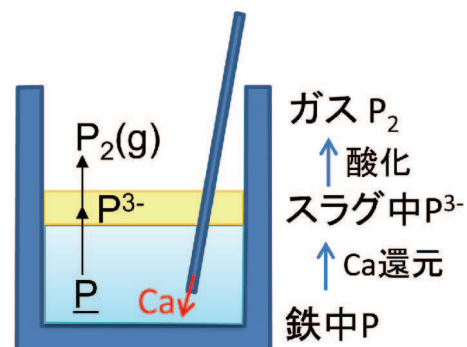


図3 Caインジェクションによる溶鋼の脱磷プロセスの概念図

溶鋼中に添加されたCaは瞬時にガス化して溶鋼中にインジェクトされる。これらの気泡がどのように

挙動して周囲に反応場を形成するかを理解することは、図3のプロセスを設計するに当たって不可欠である。溶鋼中の気泡の挙動については従来水モデルなどコールドモデル実験による解釈があるが大きな物性の差は必ずしも有益な概念を与える結果に繋がるとは言えない。当研究室では高輝度X線を使い溶融金属中の気泡の挙動を解析している。図4は水銀中に吹き込まれた気泡が活発に合体する様子を撮影したものである [3]。



図4 高輝度X線による水銀中の気泡合体挙動の直接観察

(3) 酸化物層を介した伝熱と潤滑の基礎研究 (連続 casting プロセスの品質と生産性の最大化)

casting 速度の高速化の限界は casting 型内の熱流束（水冷 casting 型により溶鋼から抜熱される単位時間・単位面積あたりの熱量）で決まるという考え方がある。しかしながら海外で実施されている薄スラブ連続 casting プロセスでは従来の連続 casting プロセスにおけるこのクライテリア（臨界熱流束）を大きく上回っており、必ずしも casting 型内熱流束が casting 速度を制約するインデックスとはならないことが分かってきた。当研究室では casting 型と凝固シェル間に流入する酸化物であるモールドフラックスの構造やフラックス/ casting 型界面状態に着目した伝熱・摺動解析を通じてこの問題に取り組んでいる。

図5は結晶化フラックス（fluxA）と非結晶化フラックス（fluxB）のフラックス/ casting 型界面の熱抵抗（y軸切片）と放射率を含む熱伝導項が関与する熱抵抗（フィルム厚と共に増加する値）についての実験結果であるが、図6に示したように、フラックス/ casting

型界面の状態が熱伝導に大きく影響していることが分かる [4]。 casting 型内潤滑に関する摺動性についても界面状態やフィルム構造が影響していることが予想され、当研究室で基礎的な解析を行っている。

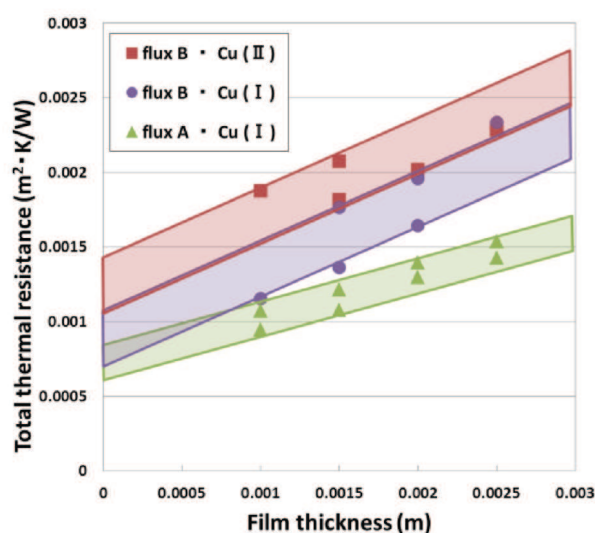


図5 モールドフラックスフィルムの厚みと熱抵抗の関係
(最大表面粗さ；Cu(I)9 μm 、Cu(II)54 μm)

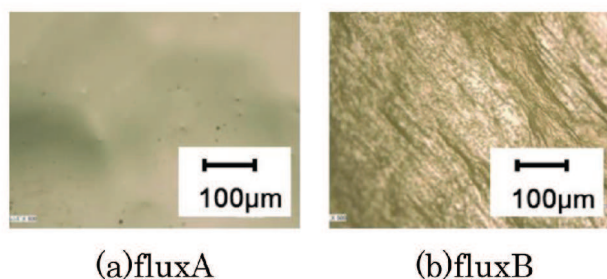


図6 非結晶化フラックス (a)と、結晶化フラックス (b)の表面状態

4. おわりに

環境、エネルギー、資源といった前提が大きく変化する中で、プロセスを再設計するためには、現状プロセスの最適化ではなく原点に還ったアプローチが求められる。今までに確立されたと思われていた要素や機構をもう一度基礎的な視点から見直す必要がある。また“プロセスメタラジー”という学術について振りかえると、熱力学、反応工学、高温物性、移動現象論などの複合化に加え、機械、電気、制御も加えた展開も今後の課題である。企業との研究連携は勿論のこと、大学側においてもプロジェクト

ブな研究活動の必要性を強く感じるところである。

<参考文献>

1. E. Takeuchi; Bulletin of ISIJ, 10(2005), 105.
2. H. Konishi, K. Ichikawa, T. Usui, and H. Ono; Journal of JSEM, 10(2010), 273.
3. E. Shimanaka, H. Kawabata, E. Takeuchi, Y. Morisada, H. Fujii, and M. Iguchi; CAMP-ISIJ, 17(2012). 256.
4. M. Kawabata, E. Takeuchi, H. Kawabata, H. Utsunomiya, S. Mineta, and H. Yamamura; to be presented at 164th ISIJ Symposium (Sept. 2012).

