

討17 攪拌操作を伴う反応の最適化とスケールアップ特性

日本鋼管(株) 中研 ○菊地良輝 中村英夫 高橋謙治
河井良彦
京浜 小倉康嗣 長谷川輝之

1. 緒言

鋼材の高品質化ニーズおよび製造プロセスの合理化に対応して、製鋼プロセスの分化は著しく、精錬能を向上させる溶銑予備処理法¹⁾や各種取鍋精錬法の導入²⁾がなされている。これらのプロセスの最適化には、スラグ-メタル間反応を効率的に促進させるスラグ組成のコントロールと反応速度の増大が重要である。このため、筆者らは、各プロセスを対象として、小型実験により平衡および速度論的検討を行なうとともに、実機規模での物質移動律速反応データも含め、反応速度を促進するための基礎的検討を試みた。

2. 攪拌精錬反応容器とスラグ組成

Fig.1は、現在、溶銑脱りん³⁾、溶鋼脱りん⁴⁾、脱硫⁵⁾および脱炭で用いられているガス攪拌装置と条件の概略を示す。攪拌については、転炉はフリーボードが大きく強攪拌が容易に得られ、取鍋では作業上攪拌ガス量は比較的少ないが、スラグ組成のコントロールも重要な課題である。

Fig.2は、溶銑脱りん処理の基礎実験と平衡論的検討から脱りん平衡式を導出するとともに、最適スラグ組成を決定した例である³⁾。高いりん分配値を得るため、融体を維持する $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 析出域と CaO 析出域近傍の高 CaF_2 スラグ組成を決定した。この最適スラグ組成は、極低りん鋼溶製やプロセスの合理化に役立てられる。また、Alキルド鋼の脱硫について、熱力学データにもとづき、従来提唱されていたマンネスマンスラ

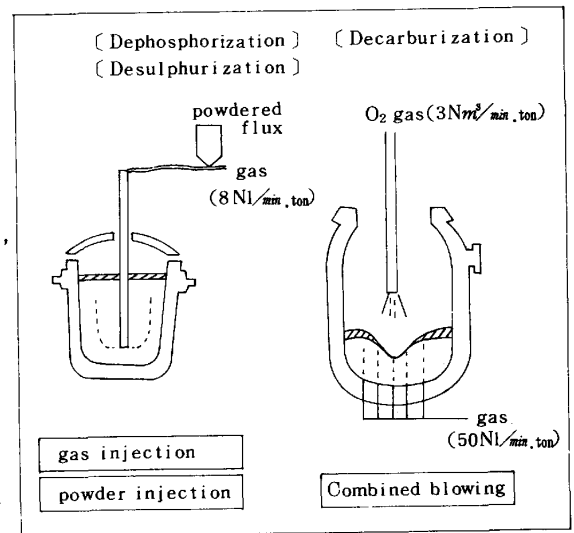


Fig.1 Schematic diagram of apparatus.

グインデックスよりさらに、スラグ組成を限定し、 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 析出域と CaO 析出域近傍の融体組成を最適とした⁵⁾。

Fig.3は、250トン取鍋での超低硫鋼溶製時の硫黄分配値を示したもので、処理中のスラグ組成の精密コントロールにより、 $(S) < 5\text{ ppm}$ の安定大量生産が可能となっている。

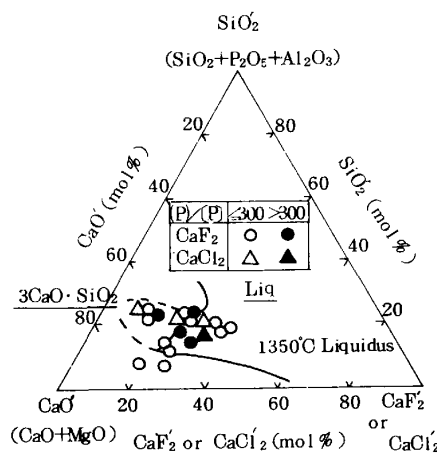


Fig.2 Maximum phosphorus partition ratios during dephosphorization treatment. Liquidus line is for $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ system.

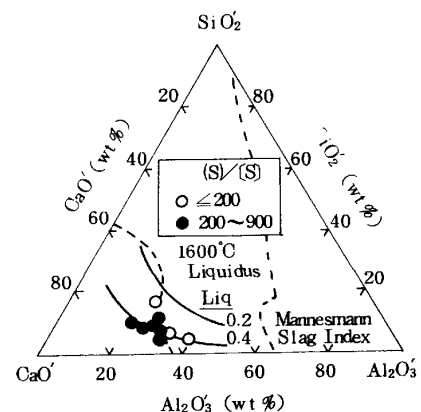


Fig.3 Sulphur partition ratios after desulphurization treatment. (250TON scale)

3. 反応速度の攪拌およびスケールファクター依存性

反応を短時間で効率良く完結するには、浴の攪拌やフラックス投入法など速度的な因子が大きな影響を与える。したがって、小規模実験から実機規模までの物質移動律速下での反応速度と浴の攪拌特性の定量化が可能となれば、反応速度の非常に大きい新プロセスの開発にも有効な武器となる。従来、総括容量係数を攪拌エネルギーおよびスケールファクターで整理しようとする試みは、いくつか報告されているものの、実炉を含めた種々のスケールのデータを系統的に解明できるまでには至っていない。

そこで、筆者らは、反応速度が物質移動で律速される場合、化学工学的経験則から、 $Sh = C_1(Re)^\alpha (Sc)^\beta$ (1) で整理されることが多いことに注目し、この整理が精錬反応にも適用できないか検討した。

(1)式は、物性値を一定とすると、 $kL = C_2(vL)^\alpha$ (2) となる。ガスインジェクションで、対流および乱流粘性支配下では、浅井らによれば、 $v \propto \epsilon^{1/3} L^{1/3}$ (3) が成立する。この関係については、例えば、Fig.4に示すように水モデル実験を行ない、確認した¹⁰⁾

(2), (3)式と、有効反応界面積率 r { = (反応界面積) / (容器横断面積) } から、実験データより得られる rk と ϵ と L の関係として、(4)式が求まる。

$$\log(rkL) = \alpha \log(\epsilon^{1/3} L^{4/3}) + \log r + \log C_3 \quad (4)$$

Fig.5は、溶銑脱りん、溶鋼脱りん、脱硫およびステンレス末期脱炭の場合、各種スケールの反応速度データから、 $\epsilon^{1/3} L^{4/3}$ と rkL の関係を求めたものであるが、各反応とも装置の大小にかかわらず、反応速度と攪拌の関係は、(4)式でマクロ的に良く整理できることがわかった。反応によらず傾きは一定で、小型炉データから大型炉の反応予測が可能である。

4. 界面積増加による反応促進の可能性の検討

溶銑脱りんにおいて、70%以上のフラックスをパウダーインジェクションした場合やステンレス脱炭時に上吹きガス量を増加した場合には、Fig.5で示すように、同一のスケール、攪拌条件でも、 rk が著しく向上している。これらは、界面積増加の寄与が大であると思われたので、検討した。

4.1 溶銑脱りん
Fig.5で、パウダーインジェクションのみかけの rkL は、上置ガスインジェクションの場合に比べ、若干上昇する。吹込パウダーを考慮した脱りんモデル式から、

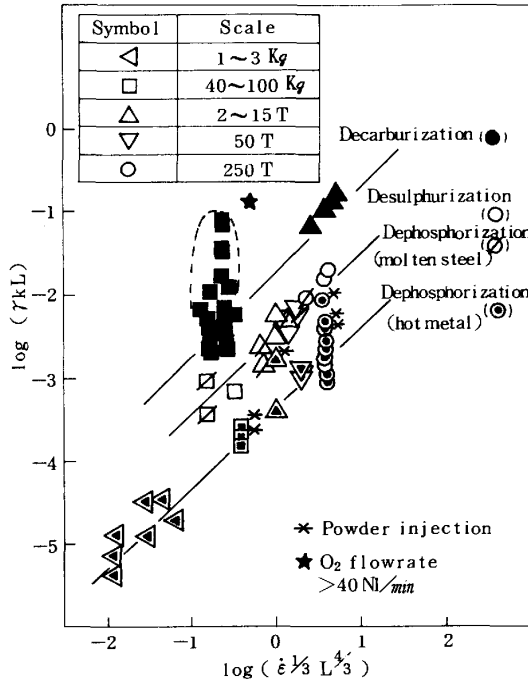


Fig.5 ($\epsilon^{1/3} L^{4/3}$) vs (rkL)

反応界面積増の効果が予想できた。

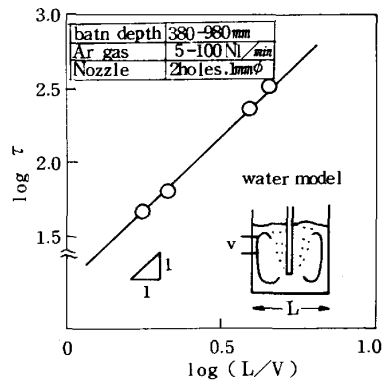


Fig.4 Relation between mixing time and flow rate.

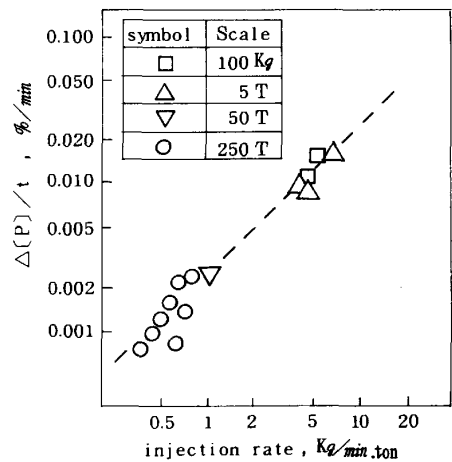


Fig.6 Effect of flux injection rate on dephosphorization.

一方、マクロ的な脱りん速度 ($\Delta[P]/t$) は、酸素供給速度により整理されるが、上置法では、投入速度を上げた場合、FeOの高いスラグとなり、過大なフォーミングが起こり、操業として成立しない。そこで、小型炉により、高速インジェクションの脱りん速度と操業性への影響を調べた。Fig.6に示すように、 $\Delta[P]/t$ と粉体吹込速度は、直線関係を示し、かつ、スラグの(FeO)は、低くでき、反応速度増加、操業の安定化に、有効であることがわかった。このことから、脱りん処理時間の短縮には、高速粉体吹込が非常に有効で、プロセス設計に役立て得ることがわかる。例えば、フリーボードの制約される容器には、ガス流量の増加を最小限にした高固気比インジェクション技術が重要である。

4.2 上底吹き転炉脱炭 Fig.7は、上底吹き転炉吹錬において、攪拌エネルギーを一定とした場合の上吹きガス流量の脱炭速度におよぼす影響について

調べたものである。小型炉での実験では、上吹きガス量が $1 \sim 2 \text{ Nm}^3/\text{min} \cdot \text{ton}$ 以上になると、脱炭速度の急激な増加が見られる。その臨界ガス量は、上吹きガスジェット¹²⁾の粒滴発生限界に良く一致し、さらに、 r_{kc} の増加傾向は、粒滴発生による表面積増加を考慮したモデル式によっても推定できた。また、同図中には、180トン炉のデータも示してあるが、上吹きガスの増加によって、大幅に反応速度向上となっていることがわかる。粒滴の寄与や反応界面の定量化など反応機構に関する正確な評価が、流動と反応速度の理論解析とともに、反応速度コントロールやスケールアップ予測の精度向上に重要と思われる。

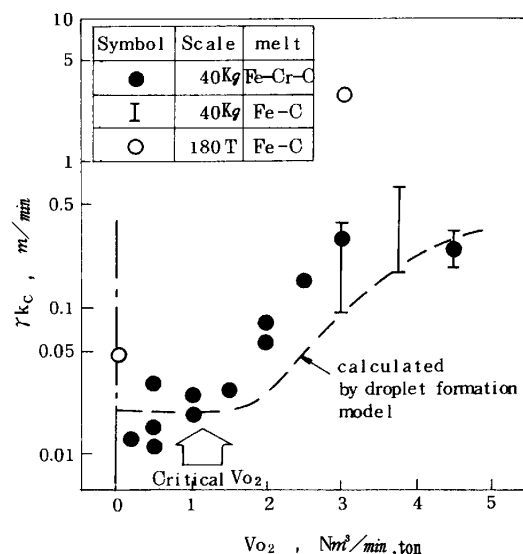


Fig.7 Effect of oxygen flow rate through top blowing lance on r_{kc}

5. 結 言

実操業で、効率的かつ迅速処理を可能にするために、スラグ組成の最適化とともに重要な、スケールアップ時の反応速度の予測について検討し、

- 1) スケールファクターを考慮した (r_{kL}) と ($\epsilon^{1/3} \cdot L^{4/3}$) により、反応特性と攪拌の整理ができ、小型実験によって、新プロセスハードの検討がマクロ的に可能である。
- 2) 界面積の増加は、反応速度向上の有効な手段であり、界面積の正確な評価が今後重要であることがわかった。

〔記号〕 Sh:Sherwood数, Re:Reynolds数, Sc:Schmidt数, k:物質移動係数 (m/sec), L:代表長さ (m), v:浴流れ速度 (m/sec), ϵ :攪拌エネルギー¹³⁾ ($watt/kg$), r:有効反応界面積率, $C_1, C_2, C_3, \alpha, \beta$:定数

〔文献〕

- 1) 例えば、丸川ほか:鉄と鋼, 67(1981), P323
- 2) 例えば、T.Usui et.al:Scaninject II (1980)12:1
- 3) 河井ほか:鉄と鋼, 69(1983), P1755
- 4) Y.Kikuchi et.al:Scaninject III(1983)13:1
- 5) K.Kawakami et.al:Stahl u. Eisen,102(1982), P227
- 6) J.Cameron et.al:J.I.S.I.204(1966),P1223
- 7) H.Gruner et.al:Stahl u. Eisen, 96(1976), P906
- 8) 例えば、森ほか:鉄と鋼, 69(1983), S240
- 9) 浅井ほか:鉄と鋼, 68(1982), P426
- 10) 高橋ほか:鉄と鋼, 69(1983), S961
- 11) 多賀ほか:鉄と鋼, 67(1981), S272, 加藤ほか:鉄と鋼, 69(1983), S255
- 12) 榊井ほか:鉄と鋼, 57(1971), S404, S405
- 13) Y.Sundberg:Scand.J.Met, 7(1978), P81