



# 入門講座

## 鉄鋼精錬プロセス工学概論 8

Introduction of Refining Process Engineering 8

北村信也  
Shin-ya Kitamura

東北大学 多元物質科学研究所  
教授

前々号 (Vol.15 No.11 P.697) からの続き

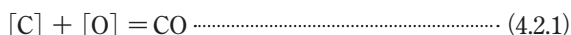
### 4.2 転炉プロセス

溶銑脱磷の普及に伴い、我が国では転炉の機能が脱炭に特化されてきた。転炉に脱炭以外の精錬能を求めなければ、同じ炭素濃度で吹き止めた時の  $(T \cdot Fe)$  が低い方が優れた精錬能であることになる。これは溶銑脱磷による多段分割精錬の理想像であるが、現実には、転炉で脱炭以外の精錬能を全く求めないことはなく、磷やマンガンの挙動も解析する必要がある。ここでは、脱炭については吹き止めでの炭素濃度と酸素濃度との関係、磷やマンガンについては分配比についての解析例を示す。

#### 4.2.1 脱炭

転炉での脱炭については既に2.1章で述べたが、台形則に従い脱炭最盛期と末期とを区別して解析すべきであり、その臨界炭素濃度は、送酸速度と攪拌力で計算されるISCO等のパラメータで解析される。また、末期の脱炭酸素効率や  $(T \cdot Fe)$ 、溶鋼中酸素濃度などは、炭素濃度の影響を強く受けるため、ISCOではなくBOC等のパラメータで解析されるべきである。

上底吹き転炉や底吹き転炉での脱炭挙動は、炭素濃度が低い場合にCO分圧を1.0とおいた場合の(4.2.1)式の平衡関係とは一致しないことがよく知られている(図124)<sup>131)</sup>。



これが底吹き羽口冷却ガスによる希釈効果であるという考え方もされているが、図125のように底吹き羽口の内管ガスを、酸素+Arとした場合と酸素+CO<sub>2</sub>とした場合で差がなく<sup>132)</sup>、さらに、図126のように、供給されるガス組成から計算されるCO分圧と、溶鋼組成から計算されるCO分圧とは

全く関係がない<sup>133)</sup>ことから、希釈によるものとは考えられない。この理由は、攪拌が強くなると反応帯(火点部に相当する)での脱炭速度が増加してFeO生成が抑制され、その結

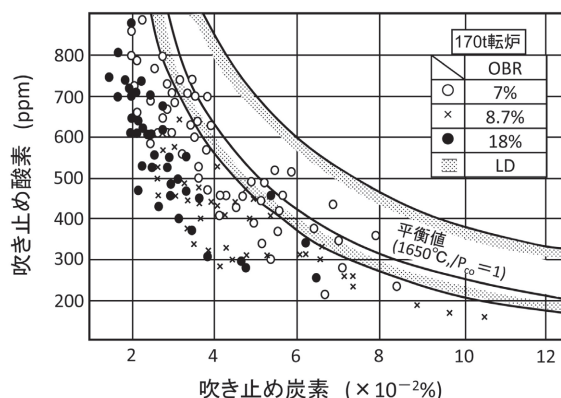


図124 上底吹き転炉での吹き止め炭素濃度と酸素濃度の関係(文献<sup>131)</sup>による。OBRは酸素ガスの底吹き比でLDは上吹き転炉を意味する。)

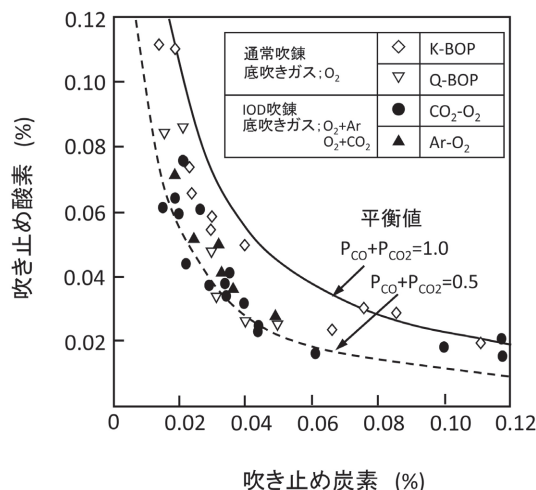


図125 底吹き内管ガス種類による影響(文献<sup>132)</sup>による)

果、スラグの酸化度が低くなるため、スラグ・メタル界面ではスラグによる脱酸が進行することによるとされている<sup>132)</sup>。図127には酸素ガスの底吹き比（全酸素供給速度に対する底吹きの割合）と溶鋼組成から計算されるCO分圧との関係を示す<sup>131)</sup>。

吹き止め時点でのスラグ中の(T・Fe)は、吹き止め炭素が同一範囲でも、図128のように底吹きが強くなるほど低下してくる<sup>134)</sup>。上底吹き転炉では(T・Fe)から熱力学的に計算される平衡酸素濃度が、測定される酸素濃度にほぼ等しいとされている<sup>133)</sup>（図129）。図130は実測したスラグと溶鋼の酸素ポテンシャルの差を示すが<sup>135)</sup>、上吹き転炉では、スラグの酸素ポテンシャルの方が溶鋼よりも高いのに対して、底吹き転炉では差が小さくなっている。また、上底吹き転炉で

あっても差が小さいという実験結果もある<sup>132)</sup>。

これらの結果から、上底吹き転炉や底吹き転炉では、炭素と酸素の関係はCO分圧を1.0とした平衡関係よりも低く、その意味では非平衡にあるが、スラグとメタルの酸素ポテンシャルは平衡に近いことがわかる。

転炉精錬では、上吹き、底吹き、それぞれの送酸速度と攪拌力しか操作因子がないが、図128のように底吹き攪拌が強い方が脱炭特性としては良くなり、また、末期に上吹き送酸速度を低下させても図131のように改善されている<sup>136)</sup>。しかし、高炭素濃度で吹き止めた上で脱磷が必要の場合は、スラグ中の(T・Fe)を高くする必要がある。このような場合は底吹き攪拌は必要最低限とし上吹きランス高さを制御して、スラグの過酸化状態を作り出している。

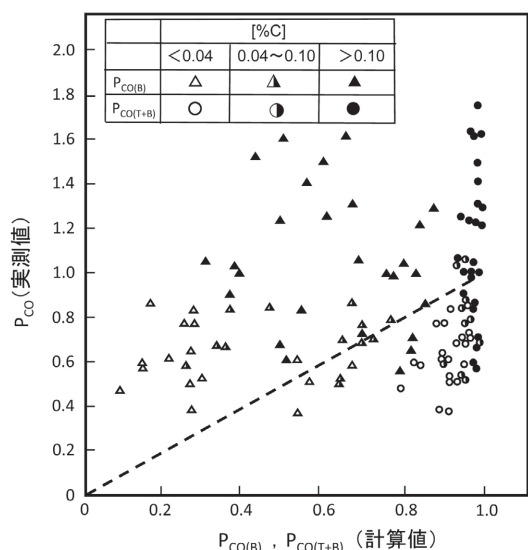


図126 供給ガス組成から計算されるCO分圧と溶鋼組成から計算されるCO分圧との関係(文献<sup>133)</sup>による。P<sub>CO(B)</sub>は底吹きガス組成での計算値でP<sub>CO(T+B)</sub>は上吹きも加えたガス組成での計算値)

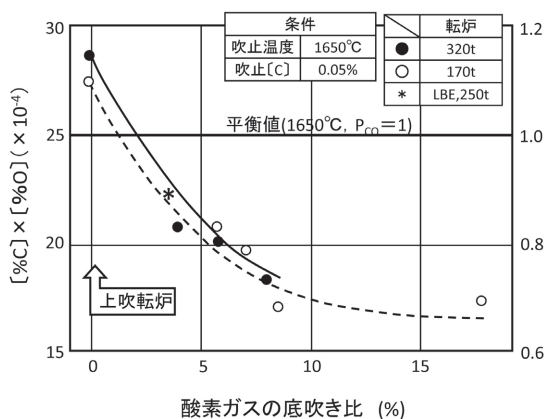


図127 酸素ガスの底吹き比と溶鋼組成から計算されるCO分圧との関係(文献<sup>131)</sup>による)

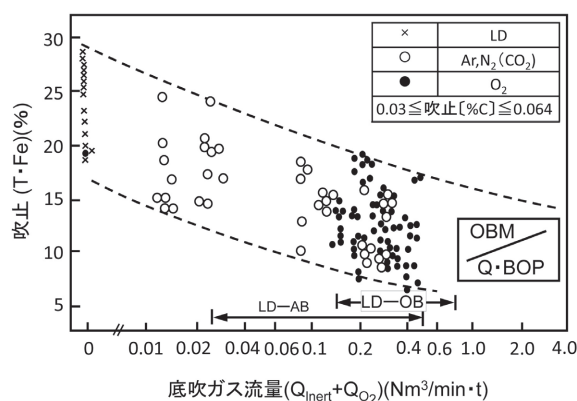


図128 スラグ中の(T・Fe)と底吹きガス流量の関係(文献<sup>134)</sup>による)

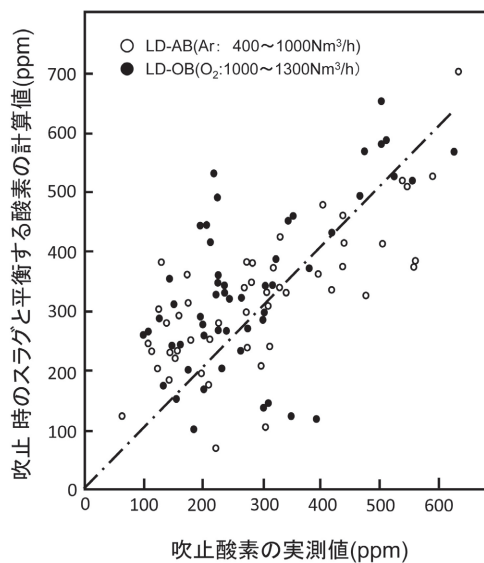
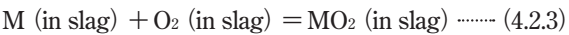
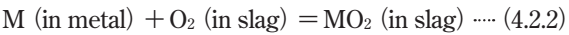


図129 (T・Fe)と平衡する酸素濃度と測定される酸素濃度の関係(文献<sup>133)</sup>による)

4.2.2 燐、マンガンの挙動

前記のように上底吹き転炉の吹き止め条件でのスラグとメタルは、溶銑予備処理に比べると、はるかに平衡に近い。(4.2.2) 式の反応の自由エネルギー変化 ( $\Delta G_M$ ) は (4.2.4) 式で表されるが、スラグ内では (4.2.3) 式の平衡が成立すると仮定すれば、(4.2.4) 式はスラグと溶鋼中の成分 M の化学ポテンシャル差、つまり平衡からの解離度を示すことになる<sup>137)</sup>。



$$\Delta G_M = \Delta G^0 + RT \ln (a_{MO_2} \text{ (in slag)} / (a_M \text{ (in metal)} \times P_{O_2} \text{ (in slag)}))$$
$$= \mu_M \text{ (in slag)} - \mu_M \text{ (in metal)} \cdots (4.2.4)$$

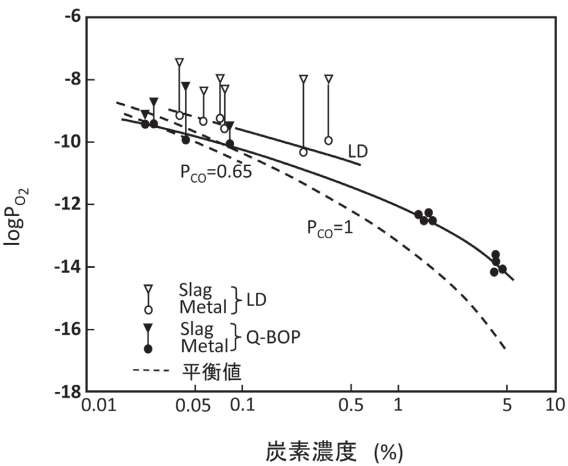


図 130 実測したスラグと溶鋼の酸素ポテンシャルの差(文献<sup>135)</sup>による)

$P_{O_2}$  (in slag) に図 130 で示した実測値を入れて計算した結果を図 132 に示すが、上吹きに比べて底吹き転炉では燐、マンガンとも平衡からの解離度が非常に小さくなっていることがわかる<sup>137)</sup>。尚、横軸は溶鋼中の酸素濃度であるため、この値が増加するほど炭素濃度が低下していると見なせる。

転炉での燐やマンガンについては分配比で解析されることが多い。

図 133<sup>134)</sup> は吹き止めでの燐分配を Healy の平衡式<sup>138)</sup>と比較した例であるが、上吹きに比べて上底吹きや底吹きの場合には平衡に近づく傾向が見られる。これに対して完全に平衡に到達しているという見解もある<sup>139)</sup> が、図 134<sup>140)</sup> のように、平衡燐分配は 200 程度のスラグであっても 50 程度の燐分配しか得られていない場合もあり、速度的要素が無いとはいえない。

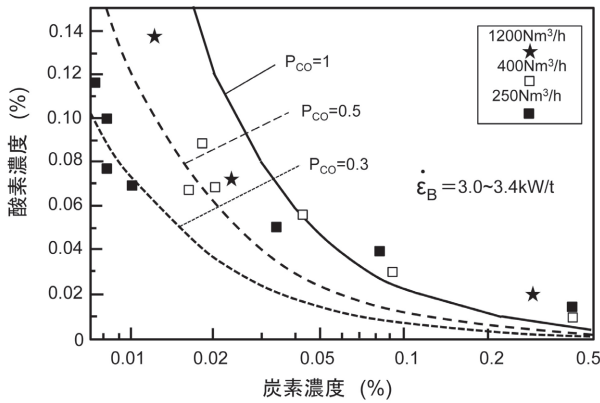


図 131 上吹き送酸速度の炭素濃度と酸素濃度の関係に及ぼす影響(文献<sup>136)</sup>による)

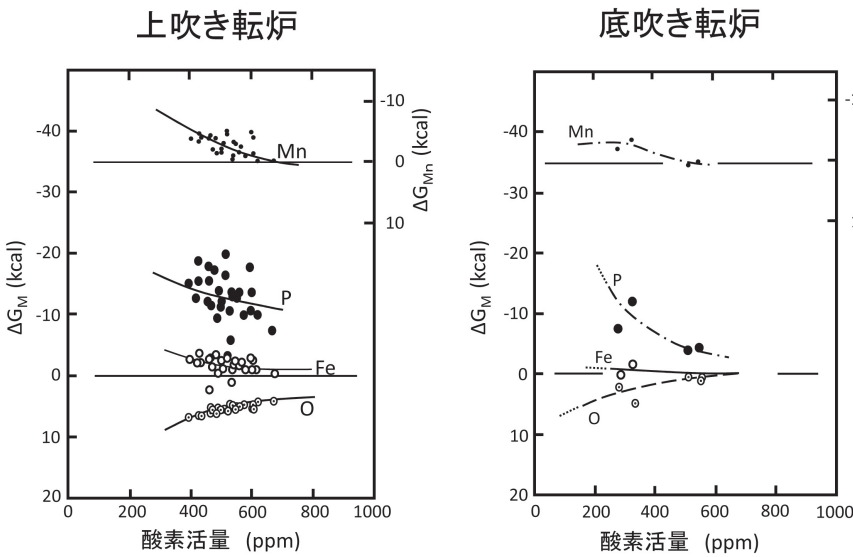


図 132 上吹き転炉と底吹き転炉での平衡からの解離度(文献<sup>136)</sup>による)

吹き止め時点でのマンガンの濃度は底吹き攪拌力が強い方が増加し、マンガン歩留が向上するが(図135)<sup>131)</sup>、マンガン分配式で整理するとほとんど変化がない(図136)<sup>131)</sup>。これは、底吹き攪拌力の影響は $(T \cdot Fe)$ に表れ、 $(T \cdot Fe)$ が変化した結果、マンガン濃度も変化していることを意味する。

上底吹き転炉でマンガン歩留が向上することを利用して、マンガン鉱石を転炉脱炭中に添加して還元する試みがなされている。この場合のマンガン濃度は図137<sup>141)</sup>のように平衡に近いもののマンガン鉱石の種類によって差があり、速度論的な改善の余地があると言える。

ここで、留意すべきことは、現場操業結果が平衡関係に近いからといって、平衡であると結論付けるべきではないという点である。多くの場合、オーダーとして一致していれば、ほぼ平衡であると言っているが、2倍の差があるということは、同一濃度まで精錬するなら半分の原単位で、逆に同一の原単位で操業するなら半分の濃度まで精錬ができることを意味しており、とても無視できるような差ではない。鉄鋼精錬において冶金熱力学が重要であることは異論のないところで

あるが、現場で問題になるのは、上記のような僅かな平衡値からの「ずれ」や、平衡値を中心とした「ばらつき」であり、それであればこそ「精錬制御」が重要とされるのである。

(Vol.16 No.2に続く)

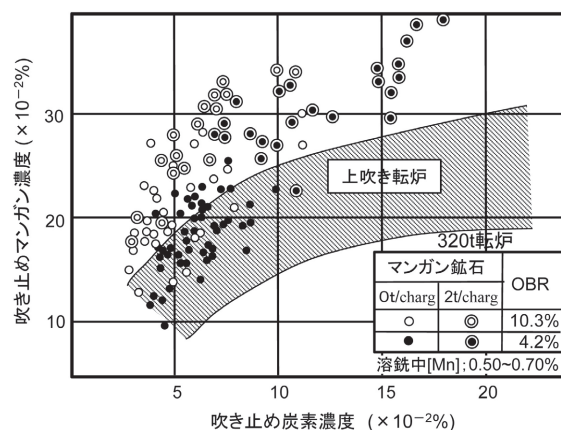


図135 吹き止めのマンガン濃度と炭素濃度の関係(文献<sup>131)</sup>による)

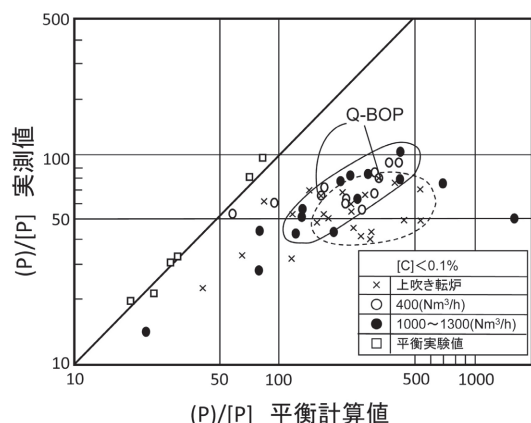


図133 吹き止めでの磷分配の平衡値との比較(文献<sup>134)</sup>による)

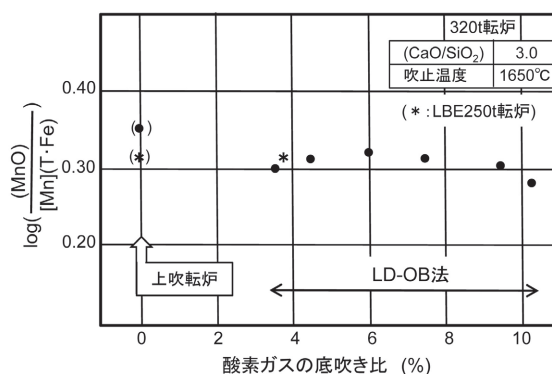


図136 底吹き酸素ガス比とマンガン分配の関係(文献<sup>131)</sup>による)

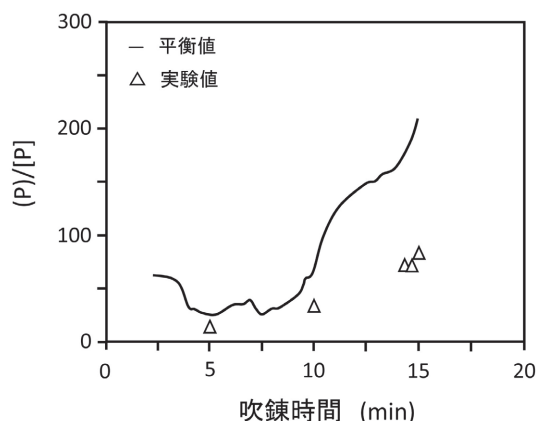


図134 吹錬中の磷分配の平衡値との比較(文献<sup>139)</sup>による)

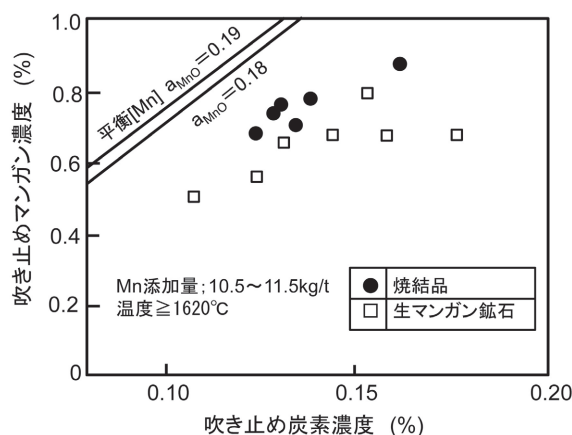


図137 吹き止めのマンガン濃度と炭素濃度の関係と平衡値との比較(文献<sup>141)</sup>による)

# 参考文献

- 131) 村上昌三, 大河平和男, 吉井正孝, 有馬慶治, 村上義男: 製鉄研究, 315 (1984) , 71.
- 132) 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, 75 (1989) , 1300.
- 133) 大河平和男, 平居正純, 村上昌三, 甲斐幹: 製鉄研究, 315 (1984) , 91.
- 134) 甲斐幹, 大河平和男, 平居正純, 村上昌三, 佐藤宜雄: 鉄と鋼, 68 (1982) , 1946.
- 135) 永田和宏, 中西恭二, 数土文夫, 後藤和弘: 鉄と鋼, 68 (1982) , 277.
- 136) K.Naito, S.Kitamura and Y.Ogawa: Ironmaking & Steelmaking, 29 (2002) , 209.
- 137) 後藤和弘, 山口周, 永田和宏: 鉄と鋼, 71 (1985) , 958.
- 138) G.W.Healy: J.Iron Steel Inst., 208 (1970) , 664.
- 139) 梅田洋一, 増田誠一, 多賀雅之, 姉崎正治, 平田武行: 住友金属, 32 (1980) , 264.
- 140) S.Basu, A.K.Lahiri, S.Seetharaman and J.Halder: ISIJ Int., 47 (2007) , 766.
- 141) 金子敏行, 松崎孝文, 釘宮貞二, 井出和夫, 熊倉政宣, 笠間昭夫: 鉄と鋼, 79 (1993), 941.

(2010年8月4日受付)