

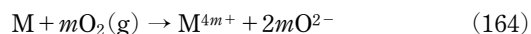
金属製錬の熱力学(第4回)

月橋 文孝*

14. 金属製錬反応とスラグの塩基度

(1) スラグの塩基度

金属製錬反応においては熔融金属中の不純物の除去効率や、熔融金属に添加した合金元素の歩留まりを上げることが必要であり、不純物は熔融スラグに除去される。熔融金属-スラグ間の平衡反応を考えると、これらは系の温度、酸素分圧、スラグの酸化物イオンの活量、スラグ中不純物の活量などに依存する。熔融金属中不純物 M がイオンとしてスラグに移動する反応は式(164)–(166)で表される。



これらの反応を支配するのは温度と酸素分圧(もしくは酸素ポテンシャル $\mu_{O_2} = RT \ln P_{O_2}$)とスラグの酸化物イオンの活量 $a_{O^{2-}}$ である。スラグ中の酸化物イオン O^{2-} 濃度が大きいほどスラグは塩基性になる。

イオン性融体であるスラグの性質から、スラグの塩基性の尺度を表す塩基度は酸化物イオンの活量により、 $RT \ln a_{O^{2-}}$ として定義される。しかし、この値は測定することができないため、実用的に生産現場で用いるのは難しい。塩基度を扱いやすい別の尺度で表すために、遷移金属イオンの酸化還元平衡と組み合わせて指標とすることや、光学的塩基度による指標の定量化が行われている。

スラグの塩基度として様々な定義が提案されているが、とくに生産現場では CaO/SiO_2 重量比(もしくは塩基性酸化物と酸性酸化物の重量比)の値が塩基度の指標として用いられ、しばしば塩基度とよばれる。この値は組成から計算しやすいという利点はあるが、スラグの構造を的確に表していない。

反応(164)では不純物は酸化除去され、酸化性雰囲気でスラグが酸性になるほど反応は右に進行する。反応(165)では

酸化性、塩基性で不純物はスラグに除去される。反応(166)では還元性、塩基性で不純物は除去される。たとえば製鋼精錬反応で、溶銑、溶鋼中のりんはりん酸イオン PO_4^{3-} の形でスラグ中に除去されるので、式(165)の反応の形の脱りん反応が起こる。酸素分圧が高いほど、また塩基度が大きいほど平衡論的には鋼中のりんはスラグに除去されることになる。

(2) スラグのキャパシティー

スラグの不純物の吸収能を定量的に示すために、スラグのキャパシティーが定義され、種々のスラグについて測定されている。キャパシティーとは一定の分圧下でのスラグの不純物吸収能であり、スラグの組成と温度の関数であるスラグ固有の値である。

製錬反応における熔融金属中の不純物である硫黄をスラグ中に除去する脱硫反応を考える。熔融金属とスラグ間の脱硫反応は式(167)で表される。この反応で熔融金属中の硫黄と気相の硫黄の反応(168)および熔融金属中の酸素と気相の酸素の反応(169)を考えると、気相とスラグ相の間の脱硫反応は式(170)となる。この反応の平衡定数は式(171)となるので、この式を変形して、サルファイドキャパシティーとよばれる硫化物イオンの吸収能が式(172)で表される。式(172)中で酸素分圧と硫黄分圧は熔融金属中酸素濃度、硫黄濃度から式(168)および式(169)により得られるので、測定できる量であるスラグ中の硫黄濃度、熔融金属中酸素濃度、硫黄濃度からサルファイドキャパシティーの値を求めることができる。

逆に、ある温度でスラグのサルファイドキャパシティーが報告されていれば、酸素分圧を決めると熔融金属-スラグ間の硫黄の分配比を推算できる。

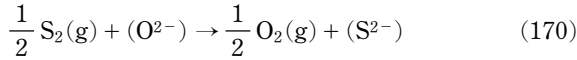
ここで式中の下線は熔融金属中に存在する物質を、()はスラグ中の物質を示す。また、(mass%)は、Gibbs エネルギー値が熔融金属中の元素の 1 mass% を基準とした値であることを示す。

* 東京大学名誉教授

Thermodynamics of Metal Smelting(N); Fumitaka Tsukihashi (Emeritus Professor, The University of Tokyo, Tokyo)

Keywords: thermodynamics, metal smelting, chemical potential, equilibrium, activity, solution, phase diagram, chemical potential diagram, basicity, capacity of slag

2020年10月16日受理[doi:10.2320/materia.60.639]



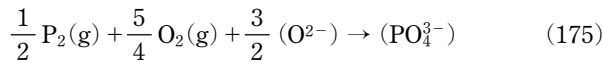
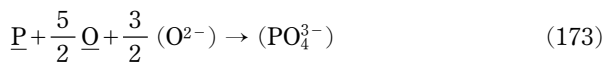
$$K = \frac{f_{\text{S}^{2-}}(\text{mass}\% \text{S}^{2-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{S}_2}^{1/2} \cdot a_{\text{O}^{2-}}} \quad (171)$$

$$C_{\text{S}^{2-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{S}^{2-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{S}_2}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}} \cdot K}{f_{\text{S}^{2-}}} \quad (172)$$

熔融金属中の不純物であるりんをスラグ中に除去する脱りん反応についても、フォスフェイトキャパシティーとよばれるりん酸イオンの吸収能が定義できる。

熔融金属とスラグ間の脱りん反応は式(173)で表される。この反応で熔融金属中のりんと気相のりんの反応(174)および熔融金属中の酸素と気相の酸素の反応(169)を考えると、気相とスラグ相の間の脱りん反応は式(175)となる。この反応の平衡定数は式(176)となる。変形して、フォスフェイトキャパシティーとよばれるりん酸イオンの吸収能が式(177)で表される。式(177)中の酸素分圧とりん分圧は熔融金属中酸素濃度、りん濃度から式(169)および式(174)により得られるので、スラグ中のりん濃度、熔融金属中酸素濃度、りん濃度からフォスフェイトキャパシティーの値を求めることができる。

式(172), (177)の右辺はイオン反応式の平衡定数や酸化物イオンの活量など直接測定できない量がまとめられており、これらは温度とスラグの組成のみの関数である。また、酸化物イオンの活量すなわちスラグの塩基度が大きいほどサルファイドキャパシティー、フォスフェイトキャパシティーは大きくなり、塩基度の尺度の一つであるともいえる。



$$K = \frac{f_{\text{PO}_4^{3-}}(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4} \cdot a_{\text{O}^{2-}}^{3/2}} \quad (176)$$

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2} \cdot K}{f_{\text{PO}_4^{3-}}} \quad (177)$$

図19, 20には鉄鋼製錬における代表的なスラグ系のサルファイドキャパシティーとフォスフェイトキャパシティーの測定値を塩基性氧化物の組成の関数として示す。スラグが塩基性になるほどサルファイドキャパシティー、フォスフェイトキャパシティーは増加する。

他に、りんを酸化でなく還元反応でスラグに除去する還元脱りん反応に関するフォスファイドキャパシティー(式(179)), 水蒸気吸収能を示すハイドロキシルキャパシティー(式(181)), 炭酸ガス吸収能を示すカーボネートキャパシテ

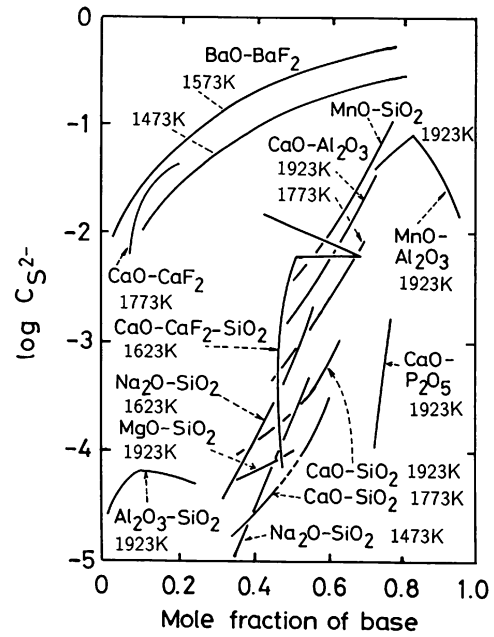


図19 各種フラックスのサルファイドキャパシティー。

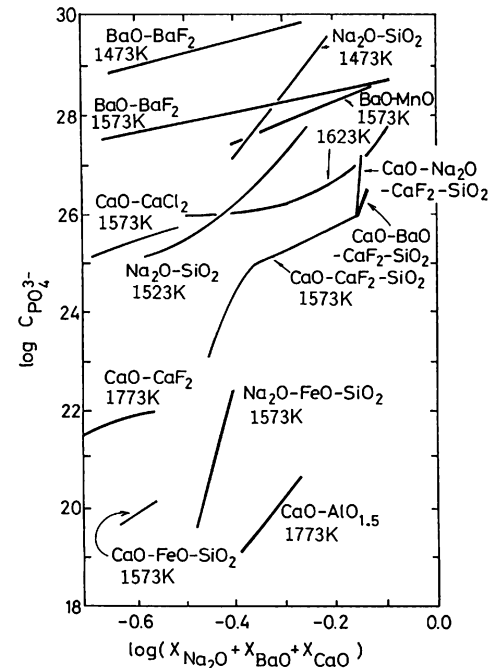
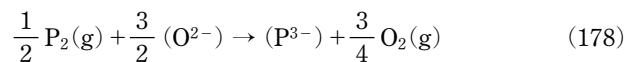
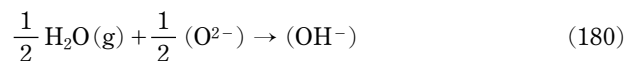


図20 各種フラックスのフォスフェイトキャパシティー。

ィー(式(183)), 窒素吸収能を示すナイトライドキャパシティー(式(185)), サイアナイドキャパシティー(式(187)), 塩素吸収能を示すクロライドキャパシティー(式(189))などが種々のスラグ系について測定されている。



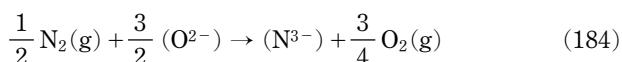
$$C_{\text{P}^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{P}^{3-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{3/4}}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2} \cdot K}{f_{\text{P}^{3-}}} \quad (179)$$



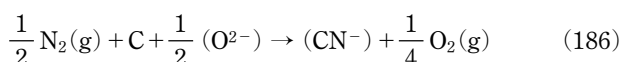
$$C_{\text{OH}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{H}_2\text{O})}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{1/2}} = \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{1/2} \cdot K}{f_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (181)$$



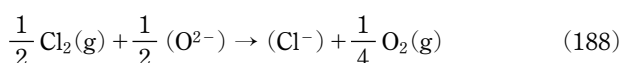
$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{CO}_3^{2-})}{P_{\text{CO}_2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}}{f_{\text{CO}_3^{2-}}} \quad (183)$$



$$C_{\text{N}^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{N}^{3-}) \cdot P_{\text{O}_2}^{3/4}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{3/2}}{f_{\text{N}^{3-}}} \quad (185)$$



$$C_{\text{CN}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{CN}^-) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{C}} \cdot a_{\text{O}^{2-}}^{1/2}}{f_{\text{CN}^-}} \quad (187)$$



$$C_{\text{Cl}^-} = \frac{(\text{mass}\% \text{Cl}^-) \cdot P_{\text{O}_2}^{1/4}}{P_{\text{Cl}_2}^{1/2}} = K \frac{a_{\text{O}^{2-}}^{1/2}}{f_{\text{Cl}^-}} \quad (189)$$

ある温度で、ある組成のスラグのキャパシティーが測定されていれば、ある雰囲気での M の熔融金属-スラグ間の平衡分配比 $((\text{mass}\% \text{M}) / [\text{mass}\% \text{M}])$ を求めることができる。

15. 金属製錬プロセスへの適用

これまでに述べてきた事項に基づいて、金属製錬への熱力学の適用例を述べる。以下の例では式(138)

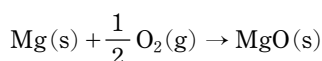
$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (138)$$

が多用されている。12節で述べたように、この関係式は、金属製錬プロセスの解析を行う上で、実用的に大変重要な式である。

(1) 不純物酸素の除去

アルゴンガスを加熱したマグネシウムチップ層を通過させることで、式(190)の反応によりアルゴン中の不純物酸素が除去される。873 K で反応させたときのアルゴン中酸素分圧は以下のように計算される。

反応は式(190)で表される。



$$\Delta G^\circ = -6.009 \times 10^5 + 107.6T \text{ J/mol} \quad (190)$$

Mg, MgO が純物質として固相として存在するので、活量を 1 とする ($a_{\text{Mg}} = 1, a_{\text{MgO}} = 1$)。873 K で平衡定数は式(138) ($\Delta G^\circ = -RT \ln K$) から

$$K = \frac{a_{\text{MgO}}}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{O}_2}^{1/2}} = \frac{1}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} = 2.16 \times 10^{30} \quad (191)$$

よって、 $P_{\text{O}_2} = 2.14 \times 10^{-61} \text{ atm}$ となる。Ellingham 図から読み取ると約 10^{-62} atm となる。これは平衡論で計算される酸素分圧であり、実際にはこのように非常に小さい圧力にはならない。

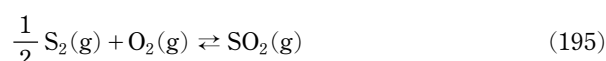
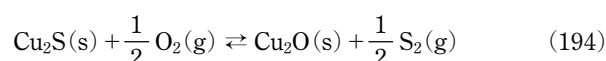
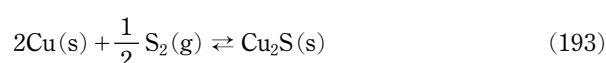
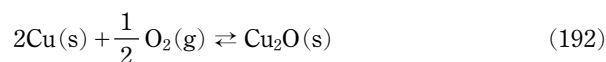
式(190)の反応では、平衡温度が上がると酸素分圧は増加し、温度が下がると酸素分圧は減少する。平衡酸素分圧は低

温ほど下げることができるが、低温で反応速度は小さくなるので、除去は難しくなる。また、反応速度を上げるため、温度を上げすぎると、反応するマグネシウムが溶融し(融点 650°C)、反応面積は小さくなり、酸素除去に不利になる。実際の不純物除去では平衡論と速度論による兼ね合いを考慮する必要がある。

(2) 銅製錬反応の化学ポテンシャル状態図

銅の製錬プロセスの基本の反応は原料である硫化銅と酸素を反応させ、硫黄を二酸化硫黄として除去して銅を得るプロセスである。

図21⁽³⁾は 1473 K での Cu-S-O 系化学ポテンシャル状態図で、Cu, Cu₂S, Cu₂O が安定に存在する酸素分圧、硫黄分圧の領域を示す。安定相の間の反応および SO₂ の生成反応は式(192)–(195)で表される。



図上の点 A の Cu₂S 相が酸素と反応すると、 P_{SO_2} 一定の線に沿って高酸素分圧側への点 B に向かって反応が進み、Cu が安定な領域となる。さらに酸素と反応して硫黄が除去され銅中硫黄が少なくなり、点 C に到達する。精製炉で溶銅中酸素、硫黄を除去して点 D の組成とし、酸化銅が生成する前に反応を終了して粗銅を得ることができる。このように化学ポテンシャル図により、製錬プロセスの解析をすることができる。

(3) 酸化鉄の還元反応平衡

図17に示した酸化鉄の還元平衡図について検討する。データブックに載っている式(196)–(200)の酸化反応の Gibbs

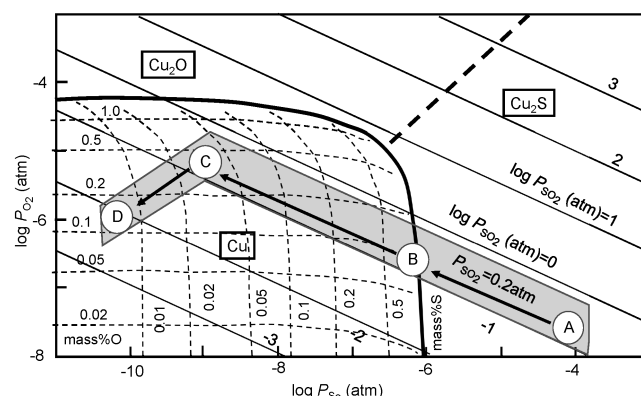
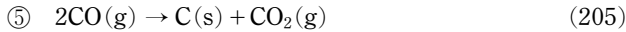
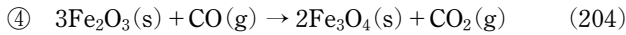
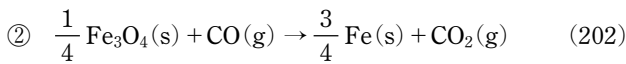
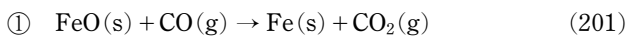
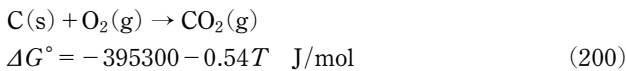
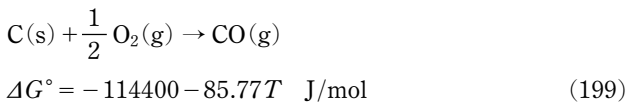
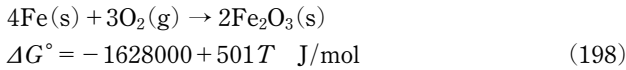
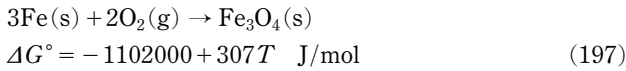
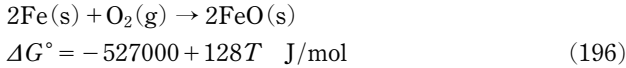


図21 1473 K での Cu-S-O 系化学ポテンシャル状態図と銅製錬プロセス(文献3より)。

エネルギー変化から、図17に示す相の境界線①-⑤を表す反応式(201)-(205)のGibbsエネルギー変化を求める。



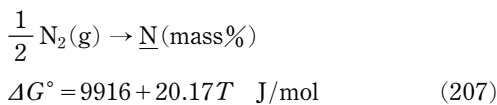
例えば、線③の反応 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{(s)} + \text{CO(g)} \rightarrow 3\text{FeO(s)} + \text{CO}_2\text{(g)}$ (g)について、固相は純物質が共存するので活量を1とすると平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{FeO}}^3 \cdot P_{\text{CO}_2}}{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot P_{\text{CO}}} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} \quad (206)$$

となるので、温度が決まれば $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$ 比が決まるので、線③が得られる。他の線も同様に得られる。

(4) 溶鉄中への窒素の溶解度

1873 K で 1 atm の窒素と平衡する溶鉄中の窒素濃度を求める。熔融金属溶液中に二原子分子気体は原子状に溶解することが知られている。溶鉄への窒素の溶解反応は



で表される。(mass%)は、Gibbs エネルギー値が溶鉄中窒素 1 mass% を基準とした値であることを示す。平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{N}}}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} = \frac{f_{\text{N}} \cdot [\text{mass}\% \text{N}]}{P_{\text{N}_2}^{1/2}} \quad (208)$$

で表される。Fe-N 二元系溶液で窒素の活量係数 $f_{\text{N}} = 1$ であるので、

$$[\text{mass}\% \text{N}] = K \cdot P_{\text{N}_2}^{1/2} \quad (209)$$

となる。窒素の溶解度は、圧力の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。これは二原子分子が原子状に溶解することによる。Sieverts の法則と呼ばれている。

1873 K での反応の Gibbs エネルギー変化と式(138) ($\Delta G^\circ = -RT \ln K$) より、窒素濃度は $[\text{mass}\% \text{N}] = 0.0468$ となる。

熔融 Fe-N 二元系に第三元素が加わると、第三元素との相

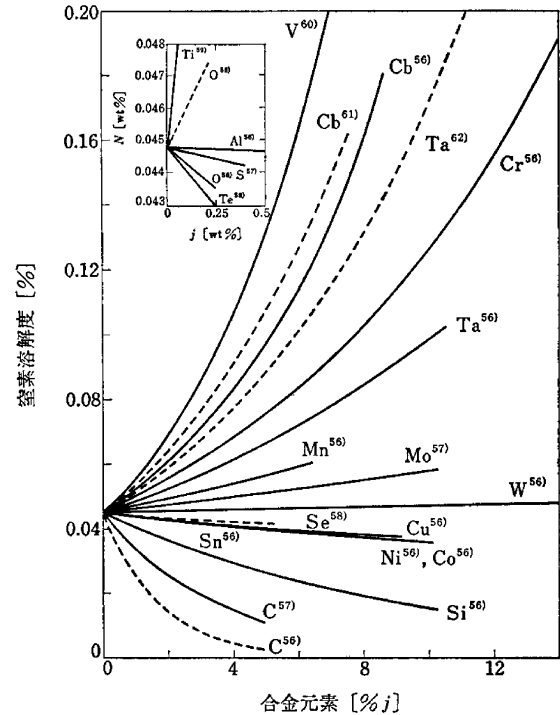


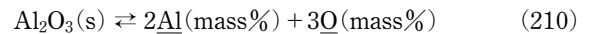
図22 1600℃での溶鉄への窒素溶解度に及ぼす第3元素の影響。鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎 図3.26.

相互作用により窒素の溶解度は変化する。図22(2)に1600℃での窒素溶解度に及ぼす第三元素の影響を示す。窒素の活量係数に及ぼす第三元素の影響(相互作用助係数, 相互作用母係数)がわかっているれば、熱力学計算により求めることができる。

(5) 溶鋼の脱酸反応

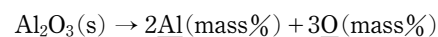
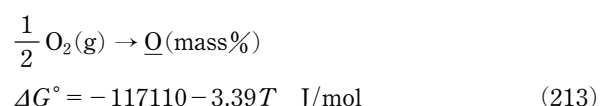
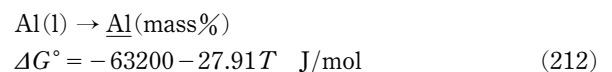
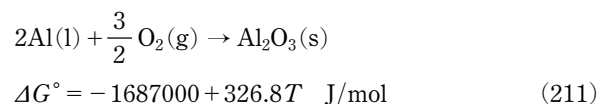
鉄鋼製錬の製鋼プロセスでは、溶鋼中の酸素を除去するために酸素と親和力の大きい金属元素を使って、酸化物として酸素を除去する脱酸反応が用いられる。たとえば酸素と親和力の大きいアルミニウムを用いたときの脱酸平衡を見積もることができる。1873 K でアルミナと平衡する溶鉄中の酸素とアルミニウムの濃度の関係を推算する。

平衡反応は



で表される。

反応(211)-(213)の Gibbs エネルギーデータから式(214)となる。



$$\Delta G^\circ = 1209000 - 392.8T \quad \text{J/mol} \quad (214)$$

平衡定数は

$$K = \frac{a_{\text{Al}}^2 \cdot a_{\text{O}}^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \frac{(f_{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}])^2 \cdot (f_{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}])^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (215)$$

と表される。固体 Al_2O_3 と溶鉄が平衡しているので、 $a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1$ とし、1873 K で式(216)となる。

$$2(\log f_{\text{Al}} + \log [\text{mass}\% \text{Al}]) + 3(\log f_{\text{O}} + \log [\text{mass}\% \text{O}]) = \log K = -13.20 \quad (216)$$

溶鉄中で Al と O の相互作用があるので、Al と O の活量係数を求めるには相互作用を考慮しなければならない。相互作用助係数の値

$$e_{\text{Al}}^{\text{Al}} = 0.043, \quad e_{\text{Al}}^{\text{O}} = -1.98, \quad e_{\text{O}}^{\text{Al}} = -1.17, \quad e_{\text{O}}^{\text{O}} = -0.17$$

を用いて、式(217)(218)により活量係数を計算する。

$$\begin{aligned} \log f_{\text{Al}} &= e_{\text{Al}}^{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] + e_{\text{Al}}^{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \\ &= 0.043 \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] - 1.98 \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \end{aligned} \quad (217)$$

$$\begin{aligned} \log f_{\text{O}} &= e_{\text{O}}^{\text{Al}} \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] + e_{\text{O}}^{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \\ &= -1.17 \cdot [\text{mass}\% \text{Al}] - 0.17 \cdot [\text{mass}\% \text{O}] \end{aligned} \quad (218)$$

以上から式(219)となる。

$$\begin{aligned} -3.42[\text{mass}\% \text{Al}] + 2 \log [\text{mass}\% \text{Al}] \\ -4.47[\text{mass}\% \text{O}] + 3 \log [\text{mass}\% \text{O}] &= -13.20 \end{aligned} \quad (219)$$

解析解は得られないが、これより数値解を求め、溶鋼中 Al 濃度 $[\text{mass}\% \text{Al}]$ と酸素濃度 $[\text{mass}\% \text{O}]$ の関係が得られる。溶鋼中酸素濃度をどの程度まで下げることができるかを見積もることができる。各種脱酸素素についても同様にして、図23⁽²⁾の脱酸平衡の関係が得られる。

(6) 溶鋼-スラグ間のりん分配比の推定

1873 K でフォスフェイトキャパシティー $C_{\text{PO}_4^{3-}} = 10^{18.5}$ の $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}-\text{P}_2\text{O}_5$ 系スラグと溶鋼(酸素濃度 0.05 mass%) が平衡しているとき、溶鋼-スラグ間のりん分配比 $\frac{(\text{mass}\% \text{P})_{\text{in slag}}}{[\text{mass}\% \text{P}]_{\text{in steel}}}$ を推算する。

フォスフェイトキャパシティーは式(177)で定義される。

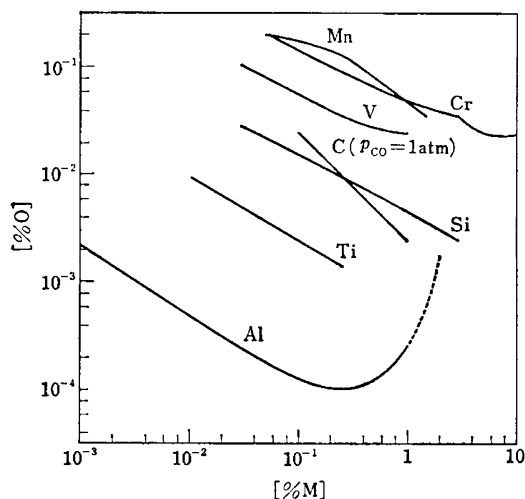
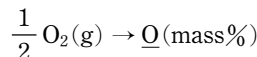


図23 1600°Cでの溶鉄の脱酸平衡。鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎 図3.38。

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = \frac{(\text{mass}\% \text{PO}_4^{3-})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} = \frac{95}{31} \frac{(\text{mass}\% \text{P})}{P_{\text{P}_2}^{1/2} \cdot P_{\text{O}_2}^{5/4}} \quad (177)$$

式(213)より 1873 K での溶鋼中酸素濃度から酸素分圧が式(221)式により得られる。



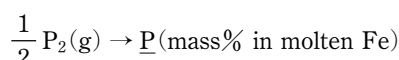
$$\Delta G^\circ = -117110 - 3.39T \quad \text{J/mol} \quad (213)$$

$$K = \frac{f_{\text{O}} \cdot [\text{mass}\% \text{O}]}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} = \frac{[\text{mass}\% \text{O}]}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} \quad (220)$$

$$P_{\text{O}_2} = 1.299 \times 10^{-7} [\text{mass}\% \text{O}]^2 \quad (221)$$

溶鋼中酸素濃度 0.05 mass% より $P_{\text{O}_2} = 3.25 \times 10^{-10}$ となる。

式(222)(223)式より 1873 K での溶鋼中りん濃度とりん分圧の関係として式(224)が得られる。



$$\Delta G^\circ = -157700 + 5.4T \quad \text{J/mol} \quad (222)$$

$$K = \frac{f_{\text{P}} \cdot [\text{mass}\% \text{P}]}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} = \frac{[\text{mass}\% \text{P}]}{P_{\text{P}_2}^{1/2}} \quad (223)$$

$$P_{\text{P}_2}^{1/2} = 7.655 \times 10^{-5} [\text{mass}\% \text{P}] \quad (224)$$

これらを式(177)に代入して、りん分配比 $\frac{(\text{mass}\% \text{P})_{\text{in slag}}}{[\text{mass}\% \text{P}]_{\text{in steel}}}$ は109となる。

16. お わ り に

製錬反応において、熱力学は実験室規模の小さな反応でも製造プロセスでの反応のような大きなプロセスでの反応でも同じ原理で記述でき、金属製錬分野で実際のもの作りに大変大きな役割を果たしてきた。熱力学という言葉を知りただけで拒否反応を示さず、金属製錬反応を扱うときに、実際に使える熱力学となるように具体的な使い方を身につけていただくのに、本稿がお役に立てれば幸いである。

著者が金属製錬熱力学、化学熱力学に初めて接したのは、大学時代の佐野信雄先生(東京大学名誉教授)、増子昇先生(東京大学名誉教授)のお二人の東京大学における講義である。本稿の内容は両先生の講義で勉強した内容とその後のご指導が基になっており、参考にさせていただいたことを両先生に御礼申し上げる。また、本稿の執筆にあたり原稿の準備にお世話になった東京大学大学院工学系研究科准教授松浦宏行先生に感謝申し上げます。(完)

文 献

- (1) 日本金属学会, 金属化学入門シリーズ1 金属物理化学, (1996), 81.
- (2) 日本鉄鋼協会, 鉄鋼便覧 第3版, 第1巻 基礎, 丸善, (1981), 図1.2, 図1.3, 図2.7, 図2.8, 図3.26, 図3.38.
- (3) 日本金属学会, 講座・現代の金属製錬編2 非鉄金属製錬, (1980), 84.

[本稿で熱力学データを引用した文献]

- (1) Steelmaking Data Sourcebook, The Japan Society for the Promotion of Science, The 19th Committee on Steelmaking (日本学術振興会製鋼第19委員会), Gordon and Breach Science Publishers (1988).
- (2) E. T. Turkdogan: Physicalchemistry of High Temperature Technology, Academic Press (1980).

- (1) J. G. Kirkwood, I. Oppenheim(関 集三, 菅 宏訳): 化学熱力学, 東京化学同人(1965).
- (2) I. プリゴジーン, R. デュフェイ(妹尾 学訳): 化学熱力学 1, 2, みすず書房(1966).
- (3) 久保亮五: 大学演習熱学統計力学, 裳華房(1998).
- (4) 松下幸雄, 盛利貞, 不破 祐, 館 充, 森 一美, 瀬川 清: 冶金物理化学, 丸善(1970).
- (5) 増子 昇: 化学ポテンシャル状態図の作り方, 使い方, 電気化学, **38**(1970), 153, 236, 307.
- (6) 大谷正康: 鉄冶金熱力学, 日刊工業新聞社(1971).
- (7) F. D. Richardson, Physical Chemistry of Melts in Metallurgy, vol. 1,2, Academic Press (1973).
- (8) 大谷正康, 水渡英昭, 早稲田嘉夫: 冶金物理化学演習, 丸善(1975).
- (9) C. H. Lupis: Chemical Thermodynamics of Materials, North-Holland (1983).
- (10) O. Kubaschewski, C. B. Alcock and P. J. Spencer: Materials Thermochemistry 6th edition, Pergamon Press (1993).
- (11) E. T. Turkdogan: Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials (1996).
- (12) 佐野信雄: エリンガム図と化学ポテンシャル状態図, ふえらむ, **1**(1996), 847.
- (13) N. Sano, W. Lu, P. V. Riboud and M. Maeda: Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy, Academic Press (1997).
- (14) H. Lee: Chemical Thermodynamics for Metals and Materials, Imperial College Press, (1999).
- (15) 伊藤公久: マテリアルサイエンスの基礎 熱力学, 八千代出版(2000).
- (16) イリヤ・プリゴジン, ディリブ・コンデブディ: 現代熱力学, 朝倉書店(2001).
- (17) D. askell: Introduction to the Thermodynamics of Materials, Fifth Edition, Taylor & Francis (2008).
- (18) 早稲田嘉夫, 大藏隆彦, 森 芳秋, 岡部 徹, 宇田哲也編: 矢澤彬の熱力学問題集, 内田老鶴園(2011).
- (19) P. Atkins, J. de Paula 著, 中野元裕, 上田貴洋, 奥村光隆, 北河康隆訳, アトキンス物理化学(上)第10版, 東京化学同人

(20) 伊藤公久, 平田秋彦, 山本知之: 基礎材料科学, コロナ社 (2020).

- (1) J. F. Elliott, M. Gleiser and V. Ramakrishna, *Thermochemistry for Steelmaking*, Pergamon Press (1963).
- (2) R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley and D. D. Wagman: *Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements*, Am. Soc. Metal. (1973).
- (3) R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser and K. K. Kelley, *Selected Values of the Thermodynamic Properties of Binary alloys*, Am. Soc. Metal. (1973).
- (4) G. K. Sigworth and J. F. Elliott: *Metal Science*, **8**(1974), 298.
- (5) O. Knacke, O. Kubaschewski and K. Hesselmann: *Thermochemical Properties of Inorganic Substances Second Edition*, Springer Verlag (1977).
- (6) NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph No.9, American Institute of Physics and American Chemical Society, (1998).
- (7) *Steelmaking Data Sourcebook*, The Japan Society for the Promotion of Science, The 19th Committee on Steelmaking (日本学術振興会製鋼第19委員会), Gordon and Breach Science Publishers (1988).
- (8) Y. Kawai and Y. Shiraishi: *Handbook of Physico-chemical Properties at High Temperatures*, Iron Stel Inst. Japan (1988).
- (9) S. Ban-ya and M. Hino: *Chemical Properties of Molten Slags*, Iron Stel Inst. Japan (1991).
- (10) I. Barin, *Thermochemical Data of Pure Substances*, VCH Verlagsgesellschaft mbH (1993).
- (11) M. Hino and K. Ito: *Thermodynamic data for steelmaking*, Tohoku University Press (2010).



月橋文孝

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1982年 3月 東京大学大学院工学系研究科金属工学
専門課程博士課程修了，工学博士

1982年 4月 東京大学工学部金属工学科助手

1986年10月 東京大学工学部金属工学科講師

1988年 1月 東京大学工学部金属工学科助教授

1999年 4月～2020年 3月 東京大学大学院新領域創
成科学研究科物質系専攻教授

2020年 6月 東京大学名誉教授

専門分野：金属製錬学，鉄鋼製錬学

◎金属製錬，鉄鋼製錬プロセスの物理化学に関する研
究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★