



入門講座

専門用語—鉄鋼プロセス編-4

反応速度論入門

—ガスと溶鉄の反応を例に—

平沢政広

東北大学 素材工学研究所 教授

Masahiro Hirasawa

Introduction to Reaction Kinetics

—Gas-metal Reaction—

1 はじめに

読者の多くは、溶鋼の精錬プロセスが、ガス、スラグ、スクラップとの反応により溶鋼中の不純物を減少させ、成分を調整する反応プロセスであることをご存知でしょう。効率的な精錬プロセスを実現するためには、精錬反応の色々な面についての知識が必要です。本稿では、精錬反応の速度に注目します。精錬の過程での反応速度が何によって決まり、どうすれば反応を制御できるか。このことは、『反応速度論』の知識と密接な関係があります。以下では、溶鉄へのガス吸収、脱ガス反応など、気体と溶鉄の間で起こる反応、すなわち、『ガス—メタル間反応』を例にとり、反応速度論の基礎的な事柄を概説します。

2 反応速度

『反応速度』は、普通、一種類の反応物や生成物に注目して、その化合物の濃度の単位時間あたりの変化で表されます。多くの場合、反応速度は反応物濃度のべき乗の項の積に比例することが実験により経験的に確かめられています。反応式：



反応速度

$$= \text{反応速度定数} \times (\text{反応物 1})^\alpha (\text{反応物 2})^\beta \cdots (\text{反応物 n})^\xi \quad (1)$$

ここで、(反応物 1)などは濃度を表わしています。(1)式の右辺の反応速度定数は、反応物濃度がすべて単位(=1)のときの反応速度にあたります。べき数 α 、 β 、 $\cdots$ 、 ξ は反応の次数と呼ばれ、反応によって、正・負の整数、分数のいろいろな値をとります。(1)式の反応では、 $\xi = \alpha + \beta + \cdots + \xi$ とすると、この反応は ξ 次反応であるといえます。

3 分子衝突と反応速度

反応速度はなぜ反応物濃度の関数であり、反応次数にはどのような意味があるのでしょうか？簡単な気体分子の反応を例にして考えてみましょう。



(2)式の反応がおこるのに必要なことは、分子Aと分子Bが出会うことです。図1-aはある空間中に分子がまばらにある場合、図1-bはぎっしりある場合です。図1-bのほうが、分子同士が出会い、衝突しやすいので、反応がおこりやすいでしょう。いま、体積Vの空間に分子Aが N_A 個、分子Bが N_B 個あるとします。気体中では、分子は無秩序に飛び回りますから、ある位置で、偶然、分子Aを見出す確率は N_A/V となります。同様に分子Bについては N_B/V です。すると、AとBが衝突する確率、すなわち、AとBを同時に同じ位置に見出す確率は $N_A/V \times N_B/V$ としてよいでしょう。

N_A/V と N_B/V をアボガドロ数で割り付けると、体積モル濃度になります。こうして、ある瞬間に分子Aと分子Bの衝突が起こる確率は、それぞれの成分の体積モル濃度の積に比例します。分子間衝突が、ある割合で、衝突分子間の原子配列の変化(すなわち反応)を惹き起こすなら、反応速

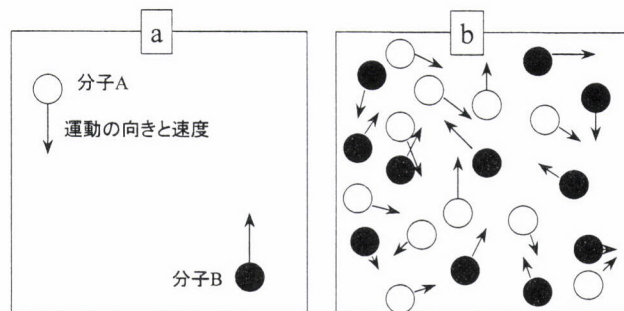


図1 自由に運動する気体分子
aはまばらな場合、bは密な場合

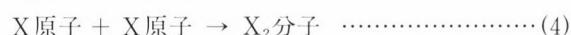
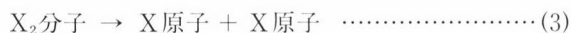
度は体積モル濃度の積に比例することになります。また、反応の次数は反応に関与する分子の数であり、分子Aの濃度について1次、Bの濃度について1次であわせて2次になるでしょう。以上の簡単な考察から、化学反応速度が濃度のべき乗の積で表わされることが理解できます。

4 素反応、素過程

反応式の表わすことは反応物と生成物の化学量論的な関係であり、反応式の左辺と右辺の間には、いくつかの反応段階が隠れているのが普通です。この隠れている個々の反応を『素反応』または『素過程』と呼びます。複数の素過程を経過する反応の場合、反応式中の分子数と実際の反応に関与する分子数は等しくなく、反応の次数を反応式からは推定できません。この場合、反応次数は反応の複雑さに応じてさまざまな値をとります。反応速度論の研究では、実験により速度定数や反応次数を求め、これらを基にして素反応を推定し、反応機構を探ります。

5 速度定数と平衡定数

次に、2原子分子 X_2 の分解反応(3)式が素反応であり、これと逆の素反応、すなわち X_2 の生成反応(4)式も同時進行するとします。



このような反応は、『可逆反応』とよばれ、(3)式を『正方向の反応』または『正反応』、(4)式を『逆方向の反応』または『逆反応』とよびます。さて、正・逆反応の速度は、それぞれ、(5)式・(6)式で与えられます。

$$X_2 \text{分解速度} = X_2 \text{分解速度定数} \times X_2 \text{濃度} \cdots \cdots (5)$$

$$X_2 \text{生成速度} = X_2 \text{生成速度定数} \times X \text{原子濃度}^2 \cdots \cdots (6)$$

X_2 分子のみ存在する状態から正方向の反応が始まると、次第にX原子が増えてきて逆反応もおこるようになります。そして、正反応(X_2 の分解反応)の速度と逆反応(X_2 の生成反応)の速度が等しくなったとき、見かけ上、それ以上 X_2 の濃度変化がなくなり、反応が進まない状態になります。このとき、反応は『化学平衡』の状態です。この場合、

$$(X_2 \text{分解速度})_{\text{化学平衡}} = (X_2 \text{生成速度})_{\text{化学平衡}} \cdots \cdots (7)$$

です。(5)、(6)、(7)式から(8)式が得られます。

$$(X \text{濃度}^2 / X_2 \text{濃度})_{\text{化学平衡}}$$

$$= X_2 \text{分解速度定数} / X_2 \text{生成速度定数} \cdots \cdots (8)$$

(8)式の左辺は化学平衡での反応物と生成物の濃度の関係から与えられる『平衡定数』です。したがって、(9)式の関係が成り立ちます。

$$\text{平衡定数} = X_2 \text{分解速度定数} / X_2 \text{生成速度定数} \cdots (9)$$

以上より、可逆な素反応については、正方向、逆方向の速度定数の比が平衡定数と等しくなることがわかりました。ただし、この関係は、素反応でなければ成り立たないことに注意してください。

6 律速段階

複雑な過程をたどる反応で、一連の素反応が連続的に、つまり、直列につながっている場合には、どれか一つの素過程が非常に遅いとき、その遅い素過程が全体の反応速度を決めるようになります。このような素過程のことを反応の『律速段階』とよびます。

図2は、交通量調査のたとえで反応を模したものです。反応過程を道路に、分子を自動車にたとえます。道路上のa、b、c地点で観測される、毎分の通過自動車台数が反応速度です。平均通過量が、a、b、c地点のどこでも毎分10台だったとします。すなわち、単位時間当たりの平均通行量は道路のどこでも同じです。このように、経路(反応過程)のどこでも時間当たり同じ数の車が通過する(同じ数の分子反応が起こる)とき、その状態を『定常状態』と呼びます。一方、車の平均スピードは、a地点で20km/h、b地点で5km/h、c地点で60km/hだったとします。この場合、車のスピードは区間ごとに異なり、区間Bでは一番遅くなっています。これが律速段階です。区間Bでは工事のため渋滞が起これ、そこでの時間当たりの車両通過台数(反応速度)が道路全体の値を決めたわけです。

律速段階は全体の速度を決めますから、一連の反応過程の中で、どこが律速段階になるか知することは非常に重要な課題になります。

7 ガス-メタル間反応の律速過程

それではガス-メタル間反応の反応過程について、大気から溶鉄への窒素吸収反応を例にとって考えてみましょう。

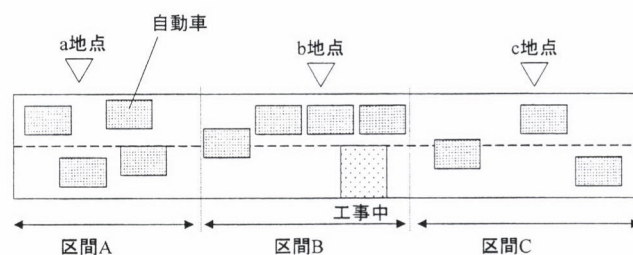


図2 律速段階の模式図

図3に示すように、反応がガスと溶鉄という二つの性質の異なる原子・分子の集合の境界面をはさんで進行します。この境界面のことを『界面』とよびます。

空気中では、窒素は分子 N_2 の形で存在しています。一方、溶鉄中に、窒素は原子Nの形で溶解します。すると、(10)式のような反応がおこっていることになります。

空気中の N_2 分子 $\rightarrow$ 2 溶鉄中のN原子 …………… (10)

一個の N_2 が空気中から溶鉄中へ溶解する過程は、図4から、次のような3つの直列の素過程に分けられるでしょう。

- ①空気中から一個の N_2 分子がガスと金属の界面へむけて移動
 - ②この N_2 分子が界面で2個のN原子に分解(解離反応)
 - ③2個のN原子が界面から離れて金属内部へ移動し、溶解完了
- ①と③の、分子・原子の移動の過程を『物質移動』過程と呼びます。

さて、分子・原子の物質移動過程が反応過程に含まれるので、溶鉄の窒素吸収反応の速度は、界面での分子から原子への解離反応速度のみでなく、分子、原子がガス中、金属中を移動する速度にも依存することになります。

8 拡散

気体中の N_2 分子が界面に向けて移動する理由を考えてみましょう。まず、濃度の濃い方から薄い方へと物質が移動していく、『拡散』、という現象について理解する必要があります。

自由に運動している2種類の気体分子A、Bからなる混合気体での拡散現象を例にとります。簡単のため、運動方向は一次元とし、分子は同じ確率でランダムに右または左に運動するものとします。図4-aのように、仕切られた空間の片方、空間I、に分子Aを、空間IIに分子Bを同じ濃度になるように入れ、仕切りを取り外します。

空間IとIIの境界あたりの分子Aの集団に注目すると、最初のステップで、右向きに運動するいくつかの分子が、空間IからIIに飛び込み、次のステップで、その半分がさらに深く右に移動します。一方、最初IIに飛び込んだ残りの半分は次のステップでは空間Iに逆戻りしますが、これをやや補うだけの分子Aが空間Iの内部から境界のあたりにやってきます。こうして、図4-bに示すように、空間IIでは分子A濃度が次第に上昇してきます。同様の過程により、空間Iでは分子Bが次第に増えます。自由な分子運動により、分子AとBの混合が生じることに留意してください。

放っておくと、分子AとBの混合は次第に進み、最終的に空間I、IIの分子A、Bの濃度は一定になります。ここで、

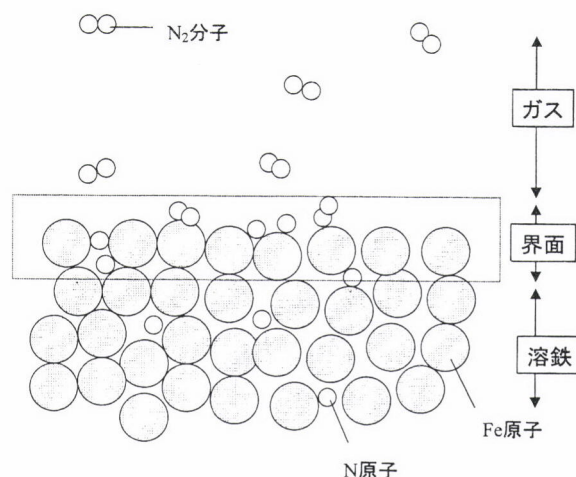


図3 ガス-溶鉄間反応の模式図

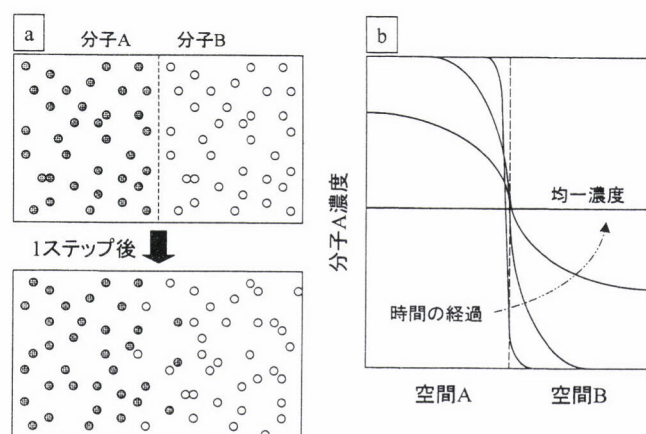


図4 気体分子運動の模式図(a)と分子Aの濃度変化(b)

もっとも重要なことは、分子A、分子Bともに、最初、濃度の勾配が存在し、濃度の高い方から低い方へと分子の移動が生じたことです。このような濃度の勾配によって生じる分子の移動現象のことを『拡散』と呼びます。

拡散の速度は、単位面積、単位時間あたりの拡散方向への移動モル数で定義され、(11)式のように表わされます。

$$\text{拡散速度} = - \text{拡散係数} \times \text{濃度勾配} \dots\dots\dots (11)$$

『拡散係数』は、気体(や液体、固体中)での分子・原子の移動のしやすさを表す量で、温度や組成があまり変化しなければ、一定です。なお、濃度勾配は、拡散方向の単位長さあたりの体積モル濃度変化であり、濃度の減少する方向と拡散方向が一致するので、拡散方向を正にとると、濃度勾配は負の値になります。

9 拡散と物質移動の関係

図5を見てください。ガス-金属界面では、 N_2 分子は

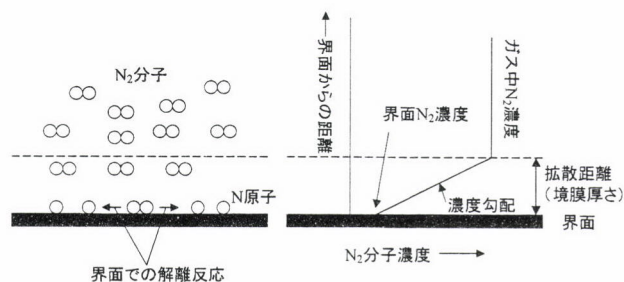


図5 界面での反応の模式図

反応により消費され、その濃度が低下します。このため、界面に近づく方向に N_2 分子の濃度勾配が生じます。この濃度勾配が N_2 分子の拡散をひきおこし、ひいては、ガス—メタル界面へ向けた N_2 の物質移動を促すのです。

物質移動の速度は、単位時間・単位界面積あたりに、 N_2 についてはガス内部から界面へ向けて、界面で生成したN原子については界面からメタル内部に向けて、それぞれ移動する分子・原子のモル数で定義され、 N_2 の場合には、次式のように表わされます。

N_2 物質移動速度

$$= N_2 \text{物質移動係数} \times (\text{ガス中} N_2 \text{濃度} - \text{界面の} N_2 \text{濃度}) \quad (12)$$

右辺の、ガス中の N_2 濃度と解離反応がおこる界面での N_2 濃度の差は、物質移動の原動力であり、しばしば、『推進力』とよばれます。

空気中の N_2 濃度は一定ですから、界面の N_2 濃度が空気中の濃度に比べて十分小さい場合には、物質移動の推進力はおおむね一定です。この場合、物質移動速度を変化させるには、(12)式の右辺の『物質移動係数』を変化させなければなりません。

物質移動係数は、 N_2 分子の拡散係数と、界面のごく近くの濃度勾配の存在する空間の厚さ、すなわち、拡散距離の二つの要因によって決まると考えることができます。そこで、(13)式を仮定します。

$$\text{物質移動係数} = \text{拡散係数} \div \text{拡散距離} \quad (13)$$

この式は、分子の拡散係数が大きいほど、また、拡散距離が短いほど物質移動係数が大きくなることを示します。ここで、拡散係数は、分子の種類と温度の条件が決まれば、大体ある決まった値になり、人為的に操作できるものではありません。そこで、物質移動係数をコントロールしようとすると、拡散距離の大きさを操作することになります。

10 物質移動係数と攪拌

前節までで、物質移動係数を操作するには、界面のごく

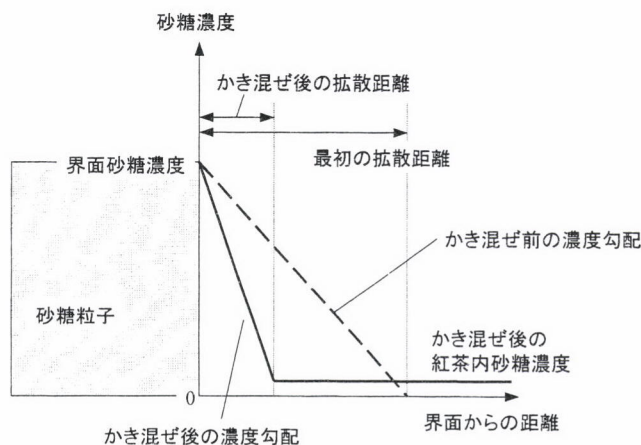


図6 砂糖—紅茶界面の模式図

近くでの拡散距離、すなわち、濃度勾配の存在する範囲の厚さを操作すればよいことを学びました。ガス—溶鉄界面の場合には、この濃度勾配の存在する範囲を、一様な厚さの膜のように考えることがよく行われます。そして、その膜のことを『境膜』、境膜の厚さのことを、『境膜厚さ』とよびます。境膜厚さは、ガスや溶鉄の流れによって変化します。身近な例からこのことを考えてみましょう。

紅茶にグラニュー糖を入れて飲むとします。このとき、放っておくと、砂糖は茶碗の底にたまり、そのあたりはゆるゆらとよどんだようになります。この部分は砂糖の濃度の高い紅茶です。この状態では、紅茶中の砂糖濃度は、砂糖の粒(固体)と紅茶(液体)の界面で高く、界面から紅茶の内部にかけて砂糖濃度の勾配が生じ、これによって砂糖分子が紅茶内部へと拡散していきます。この拡散の過程は、空気から溶鉄への N_2 の物質移動と基本的に同じ物質移動過程と考えてよいでしょう。

それでは、スプーンを使って紅茶をかき混ぜましょう。こうすると茶碗の底にたまった砂糖が速やかに溶けることは、経験から知っていることです。これを物質移動の知識から解釈してみましょう。

『攪拌』(かき混ぜのこと)により、紅茶中には流れが生じます。この流れにより、砂糖濃度が低い部分と濃度の高い部分の紅茶が混ざって均一になり、界面近傍の部分の砂糖濃度が低下します。すると、図6のように、界面から紅茶内部にかけて砂糖濃度の勾配が大きくなり、界面の境膜厚さが小さくなります。こうして、境膜厚さの減少、すなわち拡散距離の減少のために、砂糖分子の物質移動速度が大きくなり、砂糖は速やかに溶けるわけです。

このように、攪拌の強さ、流れの速度と物質移動速度は関係があり、攪拌によって流れを制御することができれば、界面の境膜厚さを制御することが可能です。

11 総括反応速度

溶鉄—ガス界面の化学反応過程と物質移動過程の速度をあわせて、溶鉄への窒素の溶解反応全体の反応速度、すなわち、『総括反応速度』を書き表してみましょう。

まず、ガス側の N_2 の物質移動速度は(14)式で表わされます。

$$N_2 \text{のガス側移動速度} = N_2 \text{物質移動係数} \times (\text{ガス中} N_2 \text{濃度} - \text{界面} N_2 \text{濃度}) \quad (14)$$

界面での N_2 から N への分解反応は可逆反応であり、その速度は(15)式で表わされます。

$$N_2 \text{分解速度} = N_2 \text{分解速度定数} \times \text{界面} N_2 \text{濃度} - N_2 \text{生成速度定数} \times \text{界面} N \text{濃度}^2 \quad (15)$$

ここで、界面での N_2 の分解速度定数と N_2 の生成速度定数について、速度定数と可逆反応の平衡定数の関係((10)式参照)から、(16)式を得ます。

$$N_2 \text{生成速度定数} = N_2 \text{分解速度定数} / \text{平衡定数} \quad (16)$$

(15)、(16)式から、界面での反応速度は(17)式で表わされます。

$$N_2 \text{分解速度} = N_2 \text{分解速度定数} \times (\text{界面} N_2 \text{濃度} - \text{界面} N \text{濃度}^2 / \text{平衡定数}) \quad (17)$$

また、(14)式と同様に、界面から溶鉄内部への N の物質移動速度も考えましょう。

$$N \text{の物質移動速度} = N \text{物質移動係数} \times (N \text{の界面濃度} - \text{溶鉄の} N \text{濃度}) \quad (18)$$

これで、ガス側の N_2 物質移動速度、界面の N_2 から N への分解反応速度、溶鉄側の N の物質移動速度、の以上3つの律速過程の速度を書き表すことができました。いま、3つの過程のうち、とくに遅い過程がない場合には、反応の定常進行を仮定して、

$$\begin{aligned} N \text{吸収の総括反応速度} &= 2 \times \text{ガス側} N_2 \text{移動速度} \\ &= 2 \times N_2 \text{分解速度} \\ &= \text{溶鉄側} N \text{の物質移動速度} \quad (19) \end{aligned}$$

とすることができます。(19)式の最初と2番目の等式の右辺に入っている倍数2は、原子 N についての速度と分子 N_2 についての速度の収支を合わせるための倍数です。

(14)式と(17)～(19)式より(20)式を得ます。

$$\begin{aligned} \text{総括反応速度} &= 2 \times N_2 \text{物質移動係数} \\ &\quad \times (\text{ガス中} N_2 \text{濃度} - \text{界面} N_2 \text{濃度}) \\ &= 2 \times N_2 \text{分解速度定数} \\ &\quad \times (\text{界面} N_2 \text{濃度} - \text{界面} N \text{濃度}^2 / \text{平衡定数}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$= N \text{物質移動係数} \times (\text{界面} N \text{濃度} - \text{溶鉄の} N \text{濃度}) \quad (20)$$

12 反応抵抗、物質移動抵抗

ここで、以下の関係によって、ガス側 N_2 の『物質移動抵抗』、界面の N_2 の分解反応の『反応抵抗』、および、溶鉄側の N の『物質移動抵抗』を定義しましょう。

$$N_2 \text{物質移動抵抗} = 1/2 \times \text{平衡定数} \times N_2 \text{物質移動係数}^{-1} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} N_2 \text{分解反応抵抗} &= 1/2 \times \text{平衡定数} \times N_2 \text{分解速度定数}^{-1} \\ &= 1/2 \times N_2 \text{生成速度定数}^{-1} \quad (22) \end{aligned}$$

$$N \text{物質移動抵抗} = N \text{物質移動係数}^{-1} \quad (23)$$

(21)～(23)式からわかるように、ここでの『抵抗』の基本的な意味は、物質移動係数、反応速度定数の逆数のことです。また、(21)式の物質移動抵抗の中には平衡定数が入っています。この点には注意しておきましょう。一方、 N_2 分解反応抵抗の方は、(22)式の二つ目の等号によって示されているように、 N_2 生成速度定数の逆数を用いると平衡定数が消えてしまい、平衡定数と直接の関係はありません。

また、ガス中 N_2 濃度について、反応式 $N_2 = 2N$ の平衡関係を用いて、

$$\text{平衡定数} = \text{見かけの平衡} N \text{濃度}^2 / \text{ガス中} N_2 \text{濃度} \quad (24)$$

のように、ガス中 N_2 濃度と平衡する『見かけの平衡 N 濃度』を定義します。

以上で定義した抵抗、見かけの平衡 N 濃度から、詳細は省きますが、総括反応速度および総括反応抵抗をそれぞれ表わす(25)、(26)式が得られます。

$$\begin{aligned} \text{総括反応速度} &= (\text{見かけの平衡} N \text{濃度}^2 / \text{界面} N \text{濃度} \\ &\quad - \text{溶鉄の} N \text{濃度}) \div \text{総括反応抵抗} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{総括反応抵抗} &= (N_2 \text{物質移動抵抗} + N_2 \text{分解反応抵抗}) / \text{界面} N \text{濃度} \\ &\quad + N \text{物質移動抵抗} \quad (26) \end{aligned}$$

13 律速段階の変化

(26)式の総括反応抵抗に注目しましょう。右辺には3つの抵抗の項があります。このうちのどれか一つが非常に大きい場合、その抵抗が総括反応抵抗を支配し、その抵抗の表わす過程が反応の律速過程となるのです。まず、物質移動過程が律速段階になる場合について考えてみましょう。

13.1 物質移動律速

N_2 分解反応抵抗が他の抵抗に比べて十分小さいとき、

(28)式の総括抵抗は

$$\text{総括反応抵抗} \cong \text{N}_2\text{物質移動抵抗/界面N濃度} \\ + \text{N物質移動抵抗}$$

となり、ガス側N₂および溶鉄側Nの物質移動過程が反応の律速過程になります。

13.1.1 溶鉄側物質移動律速の場合

このとき、N物質移動抵抗が非常に大きく、

$\text{N}_2\text{物質移動抵抗/界面N濃度} \ll \text{N物質移動抵抗}$ のときには、総括反応抵抗はほぼN物質移動抵抗によって決まり、反応は溶鉄側のNの物質移動により律速されます。

界面N濃度が大きい場合には、上の不等式の左辺が小さくなるので、この条件が達成されやすいことは容易にわかります。実際に、窒素の吸収反応の場合には、空気中の窒素濃度が高く、(吸収がおこるくらいですから)溶鉄のN濃度が低いので、界面N濃度が高くなり、窒素吸収反応は溶鉄側のN物質移動律速に近づくことが知られています。

また、(21)式から、平衡定数が小さい場合にもN₂物質移動抵抗が小さくなり、N物質移動の抵抗の影響が大きくなることが推定されます。これは、平衡状態でのガス側濃度が溶鉄側濃度に比べて非常に大きな場合で、反応の平衡がガス側に偏っている場合です。図7を見てください。平衡がガス側に偏っている場合、ちょっと反応すれば界面ではNが飽和になり、平衡になってしまいます。このNを速やかに溶鉄内部に移動させれば、また次のNが生成する、という具合に反応が進みます。したがって、溶鉄の攪拌を強くし、溶鉄側の物質移動を促進すれば、それだけ反応が早くなるわけです。

13.1.2 ガス側物質移動律速の場合

一方、N₂物質移動抵抗が非常に大きいとき、または、界面濃度が小さいときには、

$\text{N}_2\text{物質移動抵抗/界面N濃度} \gg \text{N物質移動抵抗}$ となることが考えられます。このときには、溶鉄側のN物質移動抵抗は無視され、反応はガス側のN₂の物質移動により律速されます。溶鉄への窒素吸収でこのような状況になるのは、溶鉄表面のガスの流れが非常に小さく、ガス側の境膜の厚さが非常に大きくなる場合、または、ガス中N₂濃度が非常に小さく、これに伴って界面N₂およびN濃度が非常に小さくなった場合です。ただし、後者の場合は、N₂吸収というよりはむしろ溶鉄からのNの脱ガス反応の場合に該当します。実は、(25)式のN₂吸収の総括速度の式の推進力の項のプラス・マイナスを逆向きにすれば脱ガス反応速度の式になるのです。

$$\text{総括反応速度}_{\text{脱ガス}} = (\text{溶鉄のN濃度} - \text{見かけの平衡N濃度}^2 / \text{界面N濃度}) \div \text{総括反応抵抗}$$

実際に、Nの脱ガスの場合には、ガス側物質移動が律速段階になることが知られています。

また、(21)式から、平衡定数が大きい場合にもガス側N₂物質移動律速になりやすいことが推定されます。これは、平衡状態でのガス側濃度が溶鉄側濃度に比べて非常に小さな場合で、反応が溶鉄側に偏っている場合です。この理由については、13.1.1での平衡定数と律速段階の関係の考察とまったく同じことが、溶鉄とガスをひっくり返せば言えます。

13.2 界面反応律速の場合

総括反応抵抗の内、界面反応の抵抗、すなわち、(N₂分解反応抵抗/界面N濃度)の項が無視できない場合には、界面での化学反応も律速段階になります。実際に、溶鉄の窒素吸収・放出反応の場合にはガス側、溶鉄側の物質移動過程だけでなく、界面化学反応も律速段階になることが知られています。ただし、そろそろ紙幅も尽きたことではあり、界面の化学反応過程に関係する事柄については、本稿では省略いたします。

14 おわりに

以上、本稿では、反応速度論の観点からガス-溶鉄間の物質移動を伴う化学反応過程について概説しました。より詳しく反応速度論について知りたい読者は、成書を参考にしてください。なお、必ずしも最善の参考書とは言えませんが、筆者も著者に加わっている永田和宏・加藤雅治編(日本鉄鋼協会監修)：解いて分かる材料工学Ⅰ、材料創製プロセス(1997)丸善を(あつかましくも)ご紹介して、本稿を終わります。

(1998年8月24日受付)

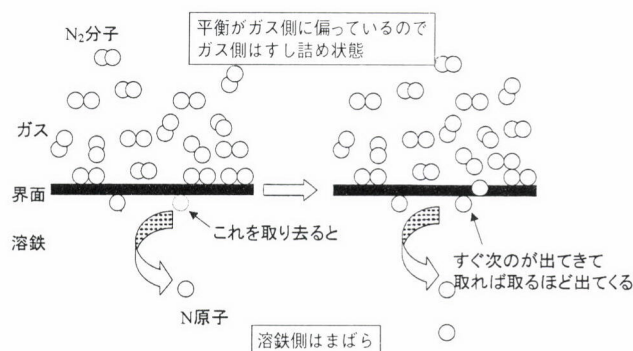


図7 平衡がガス側に偏っている場合の溶鉄側物質移動律速