

特別講演

□第165回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(2013年3月27日)

鉄鋼製錬プロセスの基礎的研究

Fundamental Study on Steelmaking Processes

伊藤公久

早稲田大学 基幹理工学部応用数理学科 教授

Kimihisa Ito



*脚注に略歴

1 はじめに

このたび学術功績賞をいただき、誠に光栄に存じます。東京大学では、恩師である故松下幸雄先生と佐野信雄先生、増子昇先生、東北大学では、故大谷正康先生、徳田昌則先生、Carnegie-Mellon大学では、Richard J. Fruehan先生、早稲田大学では、加藤栄一先生、北田韶彦先生と、たくさんの偉大な先生方から、多くのことを教えていただきました。諸先生方の「学恩」をしみじみと感じ、心より感謝しております。また、今回の受賞は、鉄鋼製錬分野における多くの先輩方からのご教示、そして研究室の卒業生・学生の皆さんの多大なご支援の賜物でございます。この場をお借りして、心から御礼申し上げたいと存じます。

いままでに研究対象として扱ったプロセスには、高炉、溶融還元炉、転炉、溶銑脱磷炉、溶銑脱硫炉、2次精錬炉、電気炉、廃棄物溶融炉、アルミ合金スクラップの脱亜鉛炉等があります。こうして列記してみると、「なんでも屋」として研究を進めてきたようですが、ここではこれまでの研究生生活で心掛けてきたことを中心に、鉄鋼製錬プロセスの基礎的研究のお話をさせていただきたいと思います。

2 心掛けてきたこと

筆者は、常にプロセス設計に用いることのできるデータの取得を心掛けて研究を進めてきました。鉄鋼製錬プロセスは巨大な化学反応プロセスですが、高温の溶融鉄と溶融スラグを扱うため、反応容器を含めた反応様式には大きな制約が生じます。この制約の下での最適なプロセス設計にとっては、得られる最終到達値の設定と、最終値への到達速度の推定が

最も重要な基礎的研究になります。前者は、熱力学を基礎においた平衡値測定を中心とする研究であり、後者は速度論を基礎とする反応速度定数や熱・物質移動係数の測定、流れの測定や流体計算などの研究になります。したがって、この二つの領域の学問に立脚して研究を進めることを念頭に置き、対象とする現実のプロセスで起きている現象を、これらの学理が指導原理として機能するレベルまで分解し、そのメカニズムを明らかにするよう心掛けてきました。

しかし、現実のプロセスを熱力学や速度論で完全に記述することが、多くの場合非常に困難であることは、皆さんもよくご存じのことと思います。そのような場合、筆者はプロセス設計に直接用いることのできるデータの取得を優先し、メカニズムの解析に敢えて立ち入らないようにも心掛けてきました。これは、基礎的な学問を重視し、特に物質の本質を知ろうとする物理化学を用いる身としては、“Science Oriented”な研究を志向する楽しみと相反することも多かったのですが、むしろこの「二重構造」を維持することで、より基礎的な分野にも目を向けることができたのではないかと考えています。

3 いくつかの研究例

平衡データの測定や反応速度定数の測定は学問的にも確立されており、しかもそのデータが直接プロセス設計に役立つので、安心して研究が進められるのですが、それ以外の研究では、前述したように、メカニズムの解析に敢えて立ち入らないように心掛けた場合もあります。その一例として、スラグフォーミングについての研究をご紹介します。スラグフォーミングについては、多くの方々の研究があ

* 昭和58年東大大学院工学系研究科博士課程を修了し、同年東北大選鉱製錬研究所助手、61～63年 Carnegie Mellon大学博士研究員、平成3年早大理工学部助教授を経て、8年同教授、19年同基幹理工学部教授となり、現在に至っている。

り、界面化学的アプローチの重要性が指摘されていました¹⁾。筆者もこの現象に興味を持ち、共同現象に関する理論²⁾が使えないだろうかなどと夢見ていました。実際研究を始めてみると、スラグの泡立ちを純粋なメカニズム解析で進めるのは困難なことを改めて感じました。そこで、プロセス設計を念頭に置いたとき、「泡立ったスラグがリアクターから溢れない」ためのデータ収集が重要なテーマであると考え、スラグフォーミングを、一次元二相流と近似して解析を行うことにより、先人の定義した泡立ち指数³⁾を用いてフォーミング高さを推定する方法⁴⁾を提案しました。この研究は、実プロセス解析のためにはまだ不完全なものでしたが、その後Freuhan先生のグループが気泡径の影響を加えた実験と完璧な次元解析を行い、完成した形を報告してくださっています⁵⁾。

反対に、プロセス設計に役立つ数値の測定から、より解析的な研究に移行した例として、ガス吹込み操作における気液反応容量係数の測定⁶⁾をご紹介します。気液反応容量係数はプロセス設計に直接使える量ですが、物質移動係数と比界面積との積として定義されるため、これら二つの量に対する吹き込み条件の影響を分離して評価することが難しいというもどかしさがあります。この問題意識を長い間持ち続けていたのですが、粒子法とよばれる数値解析を用いることによって、界面積評価を行う研究を始めました。粒子法では、界面の大変形を伴う流体の変化を取り扱うことができるので、吹き込み操作に伴う界面積の増加を計算によって求めることができます。初期の研究では、MPS法と呼ばれる方法で計算を行っていましたが、現在ではより数学的な裏付けが進んでいるSPH法を中心に、さらにはNavier-Stokes方程式を用いない流体モデルの適用も検討しつつ研究を進めています。

4 基礎について

今後の鉄鋼プロセスの進展を考えると、解明すべき最も重要な課題として、異相界面の形成に関する基礎理論の確立が挙げられます。特に核生成については、介在物生成、凝固、再結晶等、広い範囲でその制御が求められており、理論の進展も図られています。古典的理論を離れ、分子動力学のような原子レベルを扱う手法を用いるのが現実的かもしれませんが、ここでは、広く学部レベルの講義で解説されている「古典的核生成理論」について検討した結果^{8,9)}をご紹介します。

Fig.1はどの教科書にも載っている「古典的核生成理論」の解説です。図のように、 α 相中に半径 r の球状の β 相が生成する際のギブスエネルギー変化は、体積変化がないという仮定の下で、次の(1)式によって与えられています。

$$\Delta G = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (1)$$

ここで Δg_v は、 $\beta \rightarrow \alpha$ なる相変態における単位体積当たりのギブスエネルギー変化、 σ は界面張力です。一般の教科書通りに話を続けると、ギブスエネルギー変化は半径の増大に伴って増加し、極大値を取った後減少します。この極大値を与える半径を、臨界核半径 r^* と呼び、核半径がこの値よりも大きい場合には核は自発的に成長し、それ以下では消滅します。 r^* は、 Δg_v を定数として(1)式を r で微分することによって求められます。しかし、広く知られているように、球面で囲まれた β 相の圧力は、表面張力の働きによって、 α 相よりも高くなります。また一方、ギブスエネルギーは明らかに圧力の関数です。したがって、式(1)中の Δg_v は、 r の関数とな

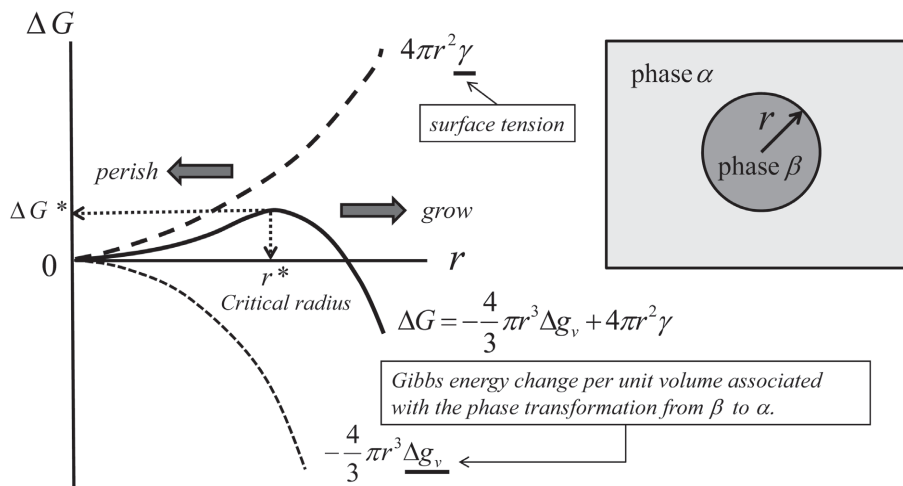


Fig.1 Explanation of the classical homogeneous nucleation theory

り、定数として扱うことはできないことが分ります。

細かい議論^{8,9)}は省略しますが、相変化に伴う核自身のギブスエネルギー変化と、その核を母相内に入れるために必要な仕事との和を考えることで、熱力学的に健全な取扱いを経て、(1)式と同様の結果を得ることができます。なおこの場合には、 Δg_0 は、曲率が0の相に対応しますので、定数として扱えます。この議論に従って、Fig.1の縦軸を「半径 r の球状核生成のために必要な最小仕事」と読み替えることで、外部からの仕事によって核生成を制御できることが分ります。また、この仕事は母相の熱的ゆらぎによる場合には、ゆらぎによって物体のある小部分に熱力学諸量の変化を可逆的に引き起こす確率を用いて、核生成頻度を表すことが可能となりますし、核生成がいわゆる“熱活性過程”ではないことも分ると思います。

一連の結果をまとめるまで気が付かなかったのですが、実はこの問題はランダウの統計力学の章末問題¹⁰⁾で取り扱われておりました。また、このような議論を“pedagogical (教学上の)”と言われたこともあります。しかし、古典論をもう一度見直すことで、ものの見方の根幹にかかわる知見が得られる場合があるのではないかと考えています。

5 おわりに

製錬プロセス研究を進める上での「二重構造」の例をお話してきました。この二つが有機的に関わって、精錬プロセスの変革を提示できることが理想です。最近の計算機能力の進歩によって、新プロセス開発を指向した計算機実験の可能性が増してきましたが、これを現実のものとするためには、現象のより精緻な解析とモデル化が不可欠となるでしょう。その意味でも、信頼性の高い物性値や熱力学データは、ますます重要になってくるものと思います。また精錬プロセスにお

いては、鋼の高純化を目標とする一方で、異相形成のダイナミズムを積極的に活用することも重要な課題です。より小さい系においては界面の寄与が大きくなるため、スケールに応じた物理的に意味のある界面の記述法を導入した異相形成の理論が待たれます。

より基礎的な面においては、教科書に出てくる古典論は、現象の単純化によって歴史的に大きな成功を収めているものの、現代的視点からの再考察が必要ではないかと思っています。また、さらなる課題を解決するために、新しい数学(離散系の解析学)や物理学(非線形非平衡熱学)の発展を望んでいます¹¹⁾。

参考文献

- 1) 原茂太, 荻野和巳, 倉田一郎: 鉄と鋼, 66 (1980), 727.
- 2) H.ハーケン: 共同現象の数理, 東海大学出版会, (1980), 222.
- 3) J.J.Bikerman: Foams, Springer-Verlag, New York, (1973)
- 4) K.Ito and R.J.Fruehan: Metall. Trans., 20B (1989) 509, 515.
- 5) Y.Zhang and R.J.Fruehan: Metall. Mater. Trans., 26B (1995), 813.
- 6) K.Sakaguchi and K.Ito: ISIJ Int., 35 (1995), 1348.
- 7) M.Asai, H.Nijo and K.Ito: ISIJ Int., 49 (2009), 178.
- 8) 伊藤公久: まてりあ, 36 (1997), 1127.
- 9) 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), 76.
- 10) ランダウ, リフシッツ: 統計物理学第3版 下, 岩波書店, (1980), 672.
- 11) 伊藤公久: 数理科学, 46 (2009) 542, 35.

(2013年5月10日受付)