

AOD法の技術開発

森 一美 / 名古屋大学名誉教授

製鋼精錬の20世紀最大の革新技术である、LD法の技術開発については、国内・国外において、多数の文献があり、技術史的にも多くの研究がなされている。一方、ステンレス鋼精錬におけるAOD法——名称は Argon-Oxygen-Decarburization から——も、LD法と同じく大革新技术であるが、これについては技術開発の経緯を知る文献が乏しい。発明者W.A. Krivsky¹⁾は、1973年、Metallurgical Society of AIMEのExtractive Metallurgical Lectureとして、AOD法のアイデアの生まれ、プロセス開発などについて講演している。このKrivskyの講演は、教訓的であり、興味深いものがあるが、具体的にもう少し明確に知りたい問題が幾つか残されている。国内においては、青山芳正²⁾が、「ステンレス鋼精錬法の歩み」について解説し、この中で、AOD法の登場を述べ、発展への展望を行っている。

本稿では、AOD法の技術開発について、Krivskyや青山の論説に何なりと補足ができればと念じ、二、三の事項を取り上げた。

J.F. Elliott³⁾は、LD法、AOD法、連鑄など、革新的プロセスの採用が年次的にどのように拡大していったかをまとめている。新プロセスによる生産量は、AOD法についてのFig. 1のように、S字形で推移しており、また、発明の時期から、新プロセスによる生産量が50%になるまでの期間は概ね、16~17年であるとしている。ここでは、Fig. 1に、AOD法の着想(発明)から最初の工業生産の開始までの期間(~13年)を太線で示した。筆者の強い関心事は、この

13年余の間にどのような出来事があったのだろうかということである。

AOD法の発明、技術開発は、米国のUnion Carbide Corporation (UCC) でなされた。その経緯は、明確につぎの2段階に分けて見ることができる。

- 1) 新技術の着想
- 2) プロセス開発

新技術の着想

AOD法のアイデアは、発明者W.A. Krivsky¹⁾⁴⁾によれば、下記のような経緯により、1955年に創始されたという。

Krivskyは、1954年にUCCに入社、金属研究室に所属し、ステンレス鋼精錬の基礎であるFe-Cr-C系の熱力学的平衡の問題に興味をもった。この平衡値については、同じ研究室のD.C. Hilty⁵⁾による先駆的研究がある。Hiltyは、高周波電気炉を用い、45kgの溶融Fe-Cr-C合金にO₂を吹き込み (blow)、測温しつつCr-C濃度関係を求め、Fig. 2に示したような結果を得た。彼は、この結果から、反応はつぎの(1)式で表され、一定温度で

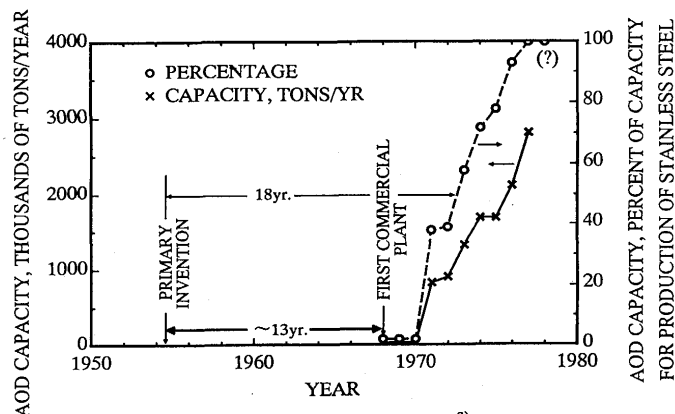


Fig. 1. Adoption of AOD process³⁾. (modified)

Fig. 1. Adoption of AOD process³⁾. (modified)

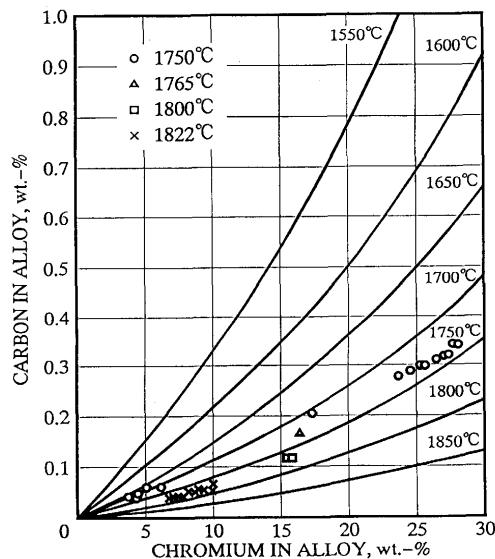
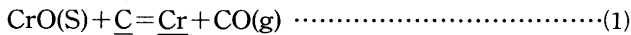
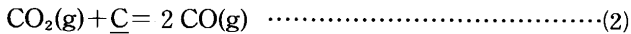


Fig. 2. Weight percentages of carbon in Fe-Cr alloys in equilibrium with free Cr₂O₃ at various temperatures. Points show Hilty's results with oxygen injection. (Ref.8)

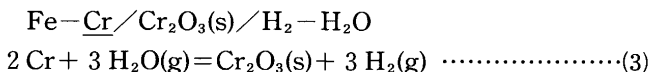


〔%Cr〕は〔%C〕に比例するとし、また、Crが炭素の活量を大きく減少させる可能性はないとした。

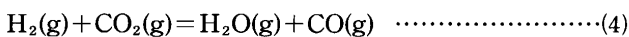
F.D. Richardson, W.E. Dennis⁶⁾は、炭素の活量に対するCrの影響に注目し、Fe-Cr-C/CO-CO₂系の平衡実験を行い、



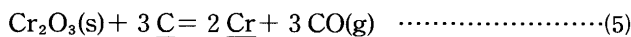
の平衡値を求めた。これと、H.M. Chen, J. Chipman⁷⁾により測定された



の平衡値、および気相反応



の平衡値を組み合わせ、反応



の平衡関係 ($P_{\text{CO}} = 1 \text{ atm}$) を求めた⁸⁾。Fig. 2の実線はその結果である。

図に示されているように、HiltyとDennis, Richardsonの結果の間には明確な差異がみられる。Krivskyは、二つの研究結果の間にこのような差異があることは、実際操業の指針となる基礎資料として看過し得ない問題と考えた。彼は、この差異の問題を解決したいこと、および、溶鋼に酸素吹き込みを行った時、果たして真の平衡値への到達があるのかどうか知りたいことの二つの目的で実験に着手した⁹⁾。

手法はHiltyのそれとほぼ同じで、Cr-C濃度範囲を広めた45kg溶融Fe-Cr-C合金にO₂吹き込みを行った。この吹き込み実験では、Cr-C-O₂反応の発熱のため温度コントロールが困難であることが分かった。そこで、吹き込みガスを、O₂にArを添加したガスに変更した。ここで現れた現象は、与えられたCr濃度、温度におけるC濃度が、従来のHilty, Richardsonらの研究結果に比べかなり低いことであった。当初全く予想もしていなかったこの現象は、すぐ、物理化学的に説明することができた。

O₂-Ar吹き込みでは、Ar希釈によりP_{CO}は1 atm以下になる。O₂にArを混合することにより、より低い温度で高温の場合と同じCr-C濃度関係を保つことができるという重大な現象が現れることに気が付いた。これから、Krivskyは、Ar-O₂ガス吹き込みを行うというステンレス鋼精錬の新しい方法——AOD法——を着想した。

ひるがえってみると、この新方法の原理は、熱力学的平衡論そのものであるだけに、後からみれば、正にコロンブスの卵であったという感じが強い。しかし、Krivskyの研究は、その目的、結果の予想は別のところにあり、実験を通

じて始めて、当初は全く考えていなかった、新プロセスのアイデア誕生という新しい方向に発展した。ここに、研究・開発における“偶然性”がみられる。

(注1) Ar-O₂混合ガスについて

実験室の研究で、O₂そのものでなく、Ar-O₂混合ガスを溶融Fe-C合金に吹き付け、脱炭反応の速度論に新知見を得た藤井毅彦⁹⁾の先駆的研究が思い出される。藤井によれば、研究は1954年——奇しくもKrivskyの研究と同じ年——に開始し、またAr-O₂混合ガスを用いた目的は、ガス濃度を変化させることにあったという¹⁰⁾。Krivskyの研究における当初の目的と比べ合わせ、人間の思考の観点から興味深いものを感じる。

(注2) VOD法vs. AOD法

結論的に述べれば

VOD法	理論からの着想	現象の理解は容易
AOD法	偶然の着想	現象の理解は困難

VOD法は熱力学的平衡論から着想されたもので、1966年に最初の工業炉が設置された¹¹⁾。VOD法とAOD法の比較において上記のような相違のあったことが、AOD法のプロセス開発上、またステンレス鋼精錬の新プロセスの採用において、種々問題を引き起こしたようである。

プロセス開発

1968年、UCC President, Kenneth RushがAOD法の開発成功を発表した¹²⁾。KrivskyのAOD法のアイデア創始(発明)から実に13年という長い年が経過した。実機規模で、溶鋼へのAr-O₂吹き込みを行い、ステンレス鋼を精錬するというプロセスの実現は、実に困難な仕事であったことを想像させる。これについては、Krivsky¹³⁾がかなり詳細に記述している。しかし、彼自身は1959年にUCCを離れており、また、1955~1960年当時のUCCの会社組織・業務内容、発明から発表までの長い期間などからみて、13年の間に、どのような事情、経緯があったのか大いに関心もたれるが、これについては、いまひとつ不明確である。そのため、AOD法の開発にまつわる事情については、いくつかの説がなされている。

青山²⁾がAOD法の技術開発に関して記述している部分を、少し長くなるが、引用する。「チーム・リーダーであったKrivskyがこの着想をいだいたのは1954年で、…当時この考え方は受け入れられなかった。…工業生産を開始するまで10年以上の日時を要している。この遅れの理由は明確にされていないが、伝聞によれば、この方法が工業化されて、高価な低炭素フェロクロム(LCFerCr)の需要が減り、安価な高炭素フェロクロム(HCFerCr)の需要が増えるようになれば、売り上げの低下を招くという同社(UCC)の合

金部門の思惑から、同法 (AOD法) の実現に熱意がなかったのだということである。ところが、同社の酸素・アルゴンなどを扱っているガス部門がアルゴンの用途開発の一環として取り上げて成功させたという説がある。おもしろい説であるが、技術的な面からみると、Ar-O₂の吹き込み方法に苦慮したのではないと思われる」

このような見方に対して、LCFeCrの好調な売り上げを維持したいとの会社の強い意見があり、これによる、開発成功の発表の遅れがあったとの説も聞かえる。

UCCは、当時概ね、1) 化学、2) 炭素・電極、3) 金属、4) 工業用ガス (Linde Company)、5) その他、のグループより構成されており、3) グループではフェロクロム、4) グループでは酸素・アルゴンなどのガスを扱っていた。

このような業務をもつUCCが、ステンレス鋼の新精錬法の開発に着手し、多額の費用をかけ、成功にもっていくまでに、社内事情を反映した様々な議論、困惑、難儀があったであろうことは容易に想像される。

筆者は、AOD法開発成功までの十数年の期間における事情を、以下のように理解している。

AOD法の技術開発は、そのアイデアを創始した金属グループではなく、青山の論説からの前記引用文の後半に記載されているような事情により、ガスを扱うLinde Companyで行われた。この点については、Krivskyの論説でも述べられている。

このLinde Companyの技術系役員クラスで、人格・指導力・説得力ともに優れた人物がおり、彼がAOD法技術開発の事実上のリーダーであったという。その人物は、社内で、つぎのことを強力に主張し、会社首脳の同意を取り付けることに成功した。

AOD法の実現は、特許権使用の利潤を生み、Ar販売量増加——工業用ガス・グループに有利——の大きなメリットをもたらす。また、この技術の開発に成功すれば、UCCが従来製鋼の分野で数々の独創技術を開拓してきた威信を、引き続いて、世に示していけることにもなる。これらのメリットはUCCの利益になっているLCFeCrの販売量の減少——金属グループに不利——のデメリットを補って余りあり、差し引き会社全体としての利益をもたらす。

技術開発上のハイライトともいえるのは、2次精錬炉 (AOD炉) を設置したことである¹⁾。これも、現在の進歩した製鋼技術からみれば、コロンブスの卵と同じ感じがあるが、AOD法の着想と同じく、当時では、正に画期的なこと

であったと思われる。また2次精錬炉の設置は社内的には複雑な問題を投げたことと思われる。これは、電極の販売量の減少という、炭素・電極グループにとってのデメリットをもたらすからである。この問題も、前記人物の説得により片付けることができたようである。

AOD法の工業プロセス実現までの期間が長かった大きな理由は、技術開発の過程でぶつかった数々の困難を克服する必要があったことにあるようである。この間、確実な理論的裏付けをもつ基礎研究のあったことも、関係者のねばりの大きな支えになったはずである。また、新しいものを生み出そうという情熱を共有した、“燃えた”技術的能力の高い開発研究者と技能系職員の献身があり、何よりも、彼等の努力を長期間激励し続け、信望を得ていた一人の人物がいたことの意味は大きい。

ステンレス鋼精錬が電気炉からAOD炉に移った事実には、歴史的にみれば、それなりの事情があり、この点はよく理解されていることであり、ここでは省略する。

元松下電器産業(株)副社長、城阪俊吉氏は科学技術の歴史を概観し、「科学は偶然によって飛躍し、必然によって完成する」ものが多いことを述べているが、AOD法の技術開発は、「科学」を「技術」と置き換えれば、正にこの城阪氏の言葉の典型的な例である。この場合の「偶然」は、Krivskyのアイデア着想であり、「必然」については、理論的基礎の確実さ、ニーズの強さ、時代の技術的環境、種々の経済的要因などが挙げられよう。

本稿をまとめるにあたり、名古屋大学佐野正道教授の助力を得た。記して謝意を表します。

文 献

- 1) W.A. Krivsky : Metall. Trans., 4 (1973), p.1439
- 2) 青山芳正 : 鉄と鋼, 63 (1977), p.561
- 3) J.F. Elliott : I&SM, 9 (1982), Dec., p.24
- 4) W.A. Krivsky : 私信
- 5) D.C. Hilty : Trans. AIME, 185 (1949), p.91
- 6) F.D. Richardson and W.E. Dennis : J. Iron Steel Inst., 175 (1953), p.257
- 7) H.-M. Chen and Chipman : Trans. Amer. Soc. Metals, 38 (1947), p.70
- 8) W.E. Dennis and F.D. Richardson : J. Iron Steel Inst., 175 (1953), p.264
- 9) 藤井毅彦 : 鉄と鋼, 45 (1959), p.1248
- 10) 藤井毅彦 : 私信
- 11) H.P. Haastert und E. Höffken : Stahl und Eisen, 108 (1988), S.1060
- 12) The Iron Age, (1968) July 4, p.53

(平成7年2月10日受付)