

鉄の精錬の歴史

樋口 善彦*

現在では成熟産業と認識されている鉄鋼業であるが、その歴史を振り返ると、他業界と同様に破壊的イノベーション (Disruptive Innovation) を起こすゲーム・チェンジャー (Game Changer) が現れ、ゲームのルールが何度も根底から覆されてきたことがわかる。本稿では、今後の技術発展の参考にすべく、鉄の精錬の歴史を通して、ゲーム・チェンジャー登場の背景にあった要因を検討する。なお、ここでは精錬という単語に製錬の意味を含むものとして使用している。

人類による鉄器の使用が始まったのは紀元前30世紀頃と言われている。古代文明の一つであるシュメール文明の言語では、鉄は「天の金属」と呼ばれていたが、それは隕鉄として空から地上に飛来してくるものと認識されていたためと考えられる。地球上に落下した隕鉄の中で最大のものはナミビアで発見されたホバ隕鉄 (60 ton 塊) で、8 万年前に飛来したと推定されている。それ以外にも、アルゼンチンのカンボ・デル・シエロ隕鉄 (37 ton)、ナミビアのギベオン隕鉄が有名であり、日本でも富山県で白萩隕鉄が発見されている。この貴重な隕鉄は日用品ではなく武器や装飾品として利用されていたことがエジプトのツタンカーメン王墓やヒッタイトのアラジャホユック遺跡の発掘結果から知られている。

鉄の供給を空からの贈物に頼らず、人類が自ら生み出すことになった時期は、現在のトルコに居住していたヒッタイト族が製鉄技術を生み出した紀元前15世紀頃にさかのぼる。当時、炭素を含有する燃料(主に木炭)を地面の穴に敷き詰めた後に鉄鉱石を載せ、竈(ふいご)で送風した空気と燃料中の炭素が反応することによって発生した CO ガスで鉄鉱石中の酸化鉄を還元する処理を行っていたと考えられる。これは、燃料中の固体炭素が酸化鉄を直接還元するのではなく、燃焼で生成した CO ガスを利用することから間接還元と呼ばれている。当時、人力に頼っていた送風は風量に制約があったため、鉄の熔融温度に達することがなく、固体状態を維持したまま還元反応が生じていた。その結果として得られた金属鉄はその後の鍛冶作業によって不純物が排除され、必要な形状に整形され、利用されていた⁽¹⁾。この技術を長らく秘匿し占

有していたヒッタイト帝国が滅亡した紀元前12世紀以降、製鉄技術が世界各地へ伝播していった。その結果、世界各地に古代製鉄跡が発見されている。伝播した技術はそれぞれの立地条件に応じて改良が加えられ大型化していったが、固体状態での還元という基本部分には変化がなく数百年が過ぎていった。

上述の固体状態での還元反応を利用する技術は基本的に鍛冶作業で製作可能な比較的小型の製品しか生み出せなかったが、時代が進むにつれて大型の鉄製品を製造する技術が要求されるようになった。それを実現したのが14～15世紀頃にドイツのライン河流域で始まったとされる高炉である。それまでは人力に依存していた送風が強力な水車を用いることによってその風量を増やすことが可能となり、処理温度が1200℃以上に高まった結果、還元された鉄の一部が液相になり、そこに燃料である木炭の炭素が拡散することになった。炭素濃度が上昇した鉄は融点が低下することから、さらなる液相化が進み、高炭素濃度の溶銑製造が実現したのである。液体の鉄である溶銑は鑄型に流し込むことにより大型で任意形状の造形物を容易に製作することができる。この高炉技術は欧州を中心に各地に伝播し、イギリスではサセックスの「ウィールドの森」と呼ばれる大森林地帯で15世紀末期に生産が始まった。16世紀初頭の1500年に2基だった高炉は1574年に51基まで増設され、ロンドン周辺の鉄加工工場への銑鉄供給基地として隆盛を誇った⁽²⁾。一方、「ウィールドの森」に遅れて高炉が設置されたヨークシャーのセバーン河下流の「ディーンの森」周辺は、“グロスターの針金”や“シェフィールドの刃物”で有名なイギリス中部の鉄加工業への鉄源供給基地としての地位を確立していった。高炉稼働基数を急激に増やしていったイギリスでは、17世紀以降に木炭原料を供給する森林の枯渇問題に直面し、木炭価格の急上昇に対処する必要に迫られた。炭素を含有する代替原料として、石炭に注目が集まったものの、鉄の機械的性能を劣化させる硫黄分を多く含むことなどから実用化には至っていなかった。これらの課題に対して、ダービーは石炭を蒸し焼きにする乾留処理によって硫黄分を除去したコークスを使用す

* 産業技術短期大学機械工学科；教授(〒661-0047 尼崎市西昆陽 1-27-1)
History of Refining of Iron and Steel; Yoshihiko Higuchi (Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Amagasaki)
Keywords: ironmaking, steelmaking, refining, blast furnace, converter
2019年6月10日受理 [doi:10.2320/materia.58.544]

るコークス高炉を1709年に開発した。さらに、蒸気機関による送風強化でコークスの難燃性に対応したこと、脱硫に必要な石灰投入による低硫化が実現したことにより、コークス高炉は1790年に81基にまで拡大していった。蒸気機関を構成する鉄部品は高炉で製造された鉄を用いることから、高炉と蒸気機関が相互の発展に寄与したという歴史は興味深い。イギリス中部、バーミンガムの北西40 km のテelford近くのコールブルックデールでは、周辺の炭田から産出される石炭から製造したコークス、および、地元で産出する鉄鉱石品質の優位性もあってコークス高炉が興隆していった。一方、周囲に炭田がないサセックスの「ウィールドの森」の高炉群は衰退することになった。その後、1828年にニールソンが送風用空気を予熱する技術を開発し、1857年にカウパーが耐火煉瓦を格子に組んだ熱交換方式を改善した。高炉排熱の利用を可能にしたカウパー型熱風炉のおかげで、高炉の熱効率や反応性、生産性は大きく向上することになった。

以上のようなコークス高炉興隆の象徴としては、1781年にコールブルックデールで完成した世界初の鉄橋であるIron Bridge(全長60 m)があり、1986年に世界遺産に登録され現代に残っている。この鉄橋が炭素濃度3%以上の鑄鉄製であるのは、当時は溶銑から炭素を除去する効率的な技術がなかったことが関係している。その後、各地に設置された鑄鉄橋で崩落事故が相次いで発生したのは鑄鉄の脆さが原因であり、炭素濃度の低い錬鉄や鋼の供給が望まれることになった。この鉄橋が完成した直後の1784年にコートが溶銑から炭素を除去して錬鉄を製造するパドル(puddling)法を発明した。これは、燃焼室で発生した熱を利用する反射炉で鉄を溶かし、できた溶銑を鉄棒でかき混ぜることにより空気中の酸素と接触させて炭素をCOガスとして除去する方法であり、炭素濃度が低い錬鉄が製造可能になった。このパドル錬鉄で1889年に作られたのがパリのエッフェル塔(全高324 m, 1991年世界遺産登録)である。反射炉の中で溶銑は脱炭反応により炭素濃度が低下するが、それとともに融点が増加するために途中から固体と液体が共存した流動性の低い状態に変化する。それを攪拌し続け、空気との接触を維持することで高粘度の鉄を鉄棒にからみつける作業が必要であった。このような暑熱作業が求められ、その必然的な結果としての低生産性のためにパドル錬鉄は非常に高価であった。また、大型生産物の製造が難しく、鑄造技術を利用できないという課題もあった⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

この状況は1856年にイギリスのベッセマーが空気を炉底から吹き込む底吹き転炉であるベッセマー転炉を発明することで打破された⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。吹き込んだ空気中の酸素による脱炭反応で溶銑中の炭素濃度が低下して融点が増加するものの、融点を上回る温度を発生反応で得ることにより炭素濃度の低い鋼を溶融状態のまま製造することが可能になった。パドル法とは異なり、容易に鋼を製造できる転炉法は注目を集め各国で採用されたが、イギリス国内では評判がよくなかった。イギリスで産出される鉄鉱石の多くは高りん鉱石であり脱りんが必要であったが、ベッセマー転炉では脱りんができず、

外国から低りん鉱石を輸入する必要があったからである。一方、米国やスウェーデンでは低りん鉱石が採掘されるために、この問題は顕在化しなかった。溶鋼中のりん濃度を低下させるためにはりんを酸化し、生成したりん酸(P_2O_5)を親和性の高い石灰(CaO)で安定化する必要があった。しかし、ベッセマーの時代には転炉に内張された耐火物にはシリカ(SiO_2)が主体のいわゆる酸性耐火物を使用されており、投入した石灰はシリカと結合してしまい脱りんに寄与しなかった。この課題は1878年にトーマスが CaO 、 MgO 系を主体とした塩基性耐火物であるドロマイト耐火物を実用化したことで解決され、あらためてトーマス転炉と名付けられた。こうして、鉄鉱石のりん含有量に応じて、ベッセマー転炉とトーマス転炉が使い分けられる状況が訪れた。

このように脚光を浴びたベッセマーとトーマスの両転炉であるが、多量の屑鉄(スクラップ)や型銑(冷銑)を溶解するほどの発熱量を有していないという課題があり、溶銑率95%以上を必要とするため、鉄源の多様化に対応できないという欠点があった。この課題を解決したのが1864年にマーチンとシーメンスによって開発された平炉である。1857年にシーメンスが考案した反射炉と排熱の蓄熱機能を組み合わせた構造にマーチンによるスクラップ溶解技術を利用したものであり、燃料を燃焼させて得た高温ガスを利用することで鉄の溶解に必要な熱源の不足を解消し、溶銑表面を雰囲気ガス中の酸素と接触させ、溶銑中の炭素との反応で脱炭する方式である。平炉も開発された当初は脱りんができなかったが、トーマス転炉に適用された塩基性耐火物を用いることでりん濃度を低減することが可能になった。また、溶鋼中の不純物元素を転炉よりも低減できるという品質上の利点もあり、平炉の生産量は1904年に両転炉の合計を上回り、製鋼における主たるプロセス装置としての地位を築き、日本にも導入されていった⁽⁹⁾。

平炉の弱点であった生産性の改善に寄与する周辺技術として酸素大量製造技術が登場し、平炉の発展を加速することになった。すなわち、1895年にリンデが空気液化装置を開発して酸素を分離する方法を見つけ、1925年にフランケルが蓄冷機を発明したことから純酸素が工業的に入手可能になり、1939年にカピッツァが膨張タービンを発明して、酸素大量製造時代が訪れたのである。1940年代から工業的な利用が始まった酸素を用いることで、例えば、富士製鉄(現・日本製鉄)の広畑製鉄所では、平炉の製鋼時間や燃料原単位が従来の半分以下になり、生産能率は倍増した。この目覚ましい成果を受けて平炉の時代が続くと思われたにも関わらず、1964年をピークに平炉の生産量は急減することになった。その原因は、LD(Linz-Donawitz)転炉と呼ばれる上吹き転炉の発明であり、その検討は純酸素が工業的に大量利用できる時代が見通された1930年前後からドイツで始められていた。その頃から、ベルリン工科大学のデュラーらやアーヘン工科大学のシュバルツは、ベッセマー転炉とトーマス転炉が採用していた底吹き法で純酸素を使用すると耐火物損耗が著しくなり操業が困難になることから、浸漬ランスを用いた酸

素上吹き法を研究していた。彼らの小型実験の発表をもとにフェースト社は規模を拡大した実験を複数回実施した。当初の予定通り浸漬ランスから酸素を溶鉄内部に吹き込んだ実験では、内容物が飛散し、ノズルや耐火物の損耗が著しく、不純物を除去するためのスラグが良好に形成されないという結果であった。一方、途中で浸漬ランスが溶損してしまい、結果的に酸素を溶鉄浴面上方から吹き付ける形になった実験では、飛散物が低減し、良好なスラグが形成されて鋼の高純度化が進行し、耐火物は維持されるという目覚ましい結果が得られた⁽¹⁰⁾。これを受けてフェースト社は後者の上吹き法に注目し、数トンから十数トン規模の実験を数か月の間に精力的に行い、オーストリアのリンツに実用転炉を建設することを決定した。さらに、ドナビッツでの実用転炉建設が決定され、両者は1952、1953年に相次いで稼働を開始したことから上吹き転炉はLD転炉とも呼ばれることになった。なお、上吹き転炉では、炭素と反応させるために供給する酸素は鋼浴攪拌の役割もあり、上吹き酸素ジェット運動量を確保するために超音速流を形成することができる末広形状のノズルを有するラバールランスが使用された。

上吹き転炉を平炉と比較すると、同じ炉内容積での生産速度は平炉の4-5倍であり、設備費は平炉の60-80%で済むという優位性があった。また、反射炉式の平炉と異なり、酸素の発熱反応を利用する転炉では耐火物負担が小さいというメリットもあった。さらに、平炉と同等以上の高純度化能力があることから、低P、S、O、N濃度が要求される鋼に適用されていった⁽¹¹⁾。このような事情から、1960年代以降に平炉から上吹き転炉への転換が急速に進むことになった。1930年頃に出現した酸素大量製造技術は平炉の発展に貢献したが、最終的にその技術を最大限に生かすことができたのは上吹き転炉だったという歴史には感慨深いものがある。

平炉全盛の時代を転換した上吹き転炉ではあるが、この上吹き転炉を凌駕する新たなゲーム・チェンジャーを目指す開発が行われていた。それが底吹き転炉である。上述した上吹き転炉の浴内攪拌は上吹きガスジェットの運動量によってまかなわれているが、生産性向上を目的に大型化した上吹き転炉では攪拌力不足が顕在化しつつあった。一方、底吹き転炉では、酸素全量を転炉底部から羽口(ノズル)を通じて溶鉄内部に供給することにより強力な攪拌力を付与することが可能である。しかし、純酸素を底吹きすると耐火物の溶損が著しいという従来の常識に基づいて上吹き転炉が開発された経緯から、純酸素を用いた底吹き転炉の実現性は非常に困難であることが鉄鋼技術者の間では暗黙のうちに了解されていた。しかし、その常識に挑戦した技術者がいた。それは、鉄鋼技術者ではなく、カナディアン・リキッド・エア社の技術者であったサバードとリーであり、彼らはあらゆる種類の冷却ガスを試みた。非常識とされた試みは、予想されたように、失敗の連続であったが、ある時に二重管羽口の内管に酸素、外管に炭化水素ガスを流すという方式が試みられた。通常、酸素と炭化水素との反応は発熱反応であるが、炭化水素ガスが羽口出口に到達する前に生じる吸熱反応である熱分解を利用

し、その冷却効果で羽口を保護するという考えであった。この方法を試みた結果、酸素ガスを底吹きしたにも関わらず、羽口先端にマッシュルームと呼ばれる凝固鉄が生成していることが確認され、その有効性が立証された。1967年にドイツのマックスヒュッテ社がカナディアン・リキッド・エア社とライセンス契約を結び、20トンのトーマス転炉の底部に二重管羽口を設けた底吹き転炉をOBM(Oxygen Bottom Blown Maxhütte)と名付けて操業を開始した。また、1971年にはスウェーデンのスラハマー・ブルック社が30トンOBMを建設、1973年にはアメリカのUSスチール社が180ton大型炉を建設して、Q-BOP(Quick Refining, Quiet blowing, Quality-Basic Oxygen Process)と命名した。日本でも1977年に川崎製鉄(現JFEスチール)が230ton大型炉での操業を開始するに至った⁽¹²⁾⁽¹³⁾。報告された各種の操業結果は、底吹きガスの圧倒的な攪拌力によって突出した精錬性能が得られることを示していた⁽¹⁴⁾。この技術開発は鉄鋼製造に直接的に関係していないガス会社が底吹き転炉の革新技術を生み出したという点で異色の出来事であったといえる。この勢いのまま、底吹き転炉は新たなゲーム・チェンジャーになるかと思われたが、鉄鋼各社が上吹き転炉でガス底吹きを併用する実験を始めたところ、酸素の全量でなくても一部のガスを底吹きすることで攪拌状態が大きく改善されることが見出され、上吹き転炉への移行が急速に進み現在に至っている⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁸⁾。その結果、底吹き転炉はゲーム・チェンジャーにはならなかったが、上吹き転炉を上吹き転炉に転換(アップデート)させるきっかけを作ったという点では重要な技術開発であったと認識されるべきである⁽¹⁹⁾。

以上の鉄の精錬の歴史を振り返ると、ゲーム・チェンジャーが出現する「きっかけ」の多くには、需要課題、環境・資源問題、周辺技術の進化などが背景にあったことがわかる。すなわち、高炉法には需要課題(大量生産)と周辺技術(水車利用)、コークス高炉には、環境・資源問題(木炭枯渇)と周辺技術(蒸気機関)、ベッセマー転炉には需要課題(鋼の大量供給)、トーマス転炉には周辺技術(耐火物)、平炉には資源問題(屑鉄・冷銑対応)と需要課題(高純度鋼)、上吹き転炉には周辺技術(酸素製造)、底吹き転炉や上吹き転炉には周辺技術(部外者の発想)という「きっかけ」があった。では、今後の鉄の精錬の技術開発はどのような「きっかけ」が作用する可能性があるだろうか？

鉄鋼業に限らず全産業に対して、既存技術からの転換を促す「きっかけ」として考えられているのは環境問題であり、その中でも地球温暖化を含む気候変動に影響する二酸化炭素排出量の大幅な削減という課題は避けて通れない。自動車業界でもエネルギー源をガソリンや軽油から電気や水素へ転換することによる対応策がとられつつある。鉄鋼業でも当然のことながら、この課題への対応策が検討されており、日本鉄鋼連盟は2014年に2030年を見通した「低炭素社会実行計画フェーズII」を発表している⁽²⁰⁾。これは最先端技術(BAT: Best Available Technology)の最大限導入でCO₂を900万ト

ン削減するというもので、その内訳は、次世代コークス製造技術の導入(130万トン)、自家発電/共同火力発電の発電効率改善(160万トン)、省エネ設備増強とその高効率化(150万トン)、廃プラ等のケミカルリサイクル拡大(200万トン)、二つの革新的技術の開発・導入(260万トン)である。革新的技術の一つが Course50 であり、コークス炉ガス(COG : Coke Oven Gas)中の水素を併用して、鉄鉱石を還元することにより CO₂ 排出量を削減し、それに加えて高炉ガスから発生する CO₂ を分離・貯蔵・利用(CCS/CCU : Carbon Capture and Storage/Utilization)する技術である⁽²¹⁾。もう一つの革新的技術であるフェロコークスは、高炉内の鉄鉱石を従来よりも低い温度で高速に還元するために利用する革新的塊成物である⁽²¹⁾。この二つはいずれも国家プロジェクトとして開発が続けられている。鉄鋼連盟はさらに長期を見据えて2030年以降2100年までを対象とした『ゼロカーボンスチールへの挑戦』と題する長期温暖化対策ビジョンを2018年に発表しているが、そこでは「高炉を用いない水素還元製鉄」という項目が含まれている⁽²²⁾。

次に、「きっかけ」として考えられるのは周辺技術の発達であり、その筆頭としては最近話題になることが多い人工知能(AI, Artificial Intelligence)やIOT(Internet of Things)が挙げられる。自動車業界では人工知能が大量の画像・センサー情報を的確に処理することにより自動運転を実現するための技術開発が競われ、その実用化が目前に迫っている。また、発電タービンや飛行機に大量のセンサーを配置し、その信号処理を通じて保全診断やオペレーション改善につなげる技術も実用化され始めている。鉄鋼業界でも同様に、AIに基づいてビッグデータを処理し、IOTを通じてベテランのオペレーターが持っている操業や品質の管理ノウハウをデジタル化して次世代に継承していくことが望まれている。しかし、鉄鋼業の中でも製鉄や製鋼のような高温で精錬を行うプロセスでは、センサー類の耐熱温度の制約などがあるため、高度なデータ解析技術を適用するのに十分なデータが収集できていないと必ずしも言えない状況にある。そのため、高温環境でも温度・成分や設備稼働状況を逐次モニターできる新たなセンサー技術の開発が望まれる。また、センサー技術がどうしても及ばない領域ではリアルタイムで流体や固体の振る舞いを解析する数値流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)や離散要素法(DEM, Discrete Element Method)などのシミュレーションを組み込むことが必要になってくる

可能性がある。

次のゲーム・チェンジャーは、CO₂低減に注力する環境対応型なのか、それともAIやIOTを活用した周辺技術活用型か、門外漢による常識破り型なのかは予想がつかない。しかし、酸素大量生産時代を予期して純酸素を用いた新しい転炉法を検討した研究者や技術者がいた。現代においても、新時代のパラダイムシフトを睨んで革新的技術に取り組んでいる研究者や技術者達が多数おり、彼らや彼女らが新時代の扉を開けることを期待したい。

文 献

- (1) 永田和宏：無機マテリアル, **4**(1997), 575-585.
- (2) ルードウィヒ・ベック, 中沢護人(訳), たたら書房, (1974).
- (3) 坂本和一：経済論叢, **99**(1967), 203-220.
- (4) 坂本和一：経済論叢, **100**(1967), 143-162.
- (5) 坂本和一：土地制度史学, **10**(1968), 50-67.
- (6) 中沢護人：鋼の時代, 岩波書店, (1964).
- (7) 中沢護人：金属, **50**(1980), 33-37.
- (8) 中沢護人：栄光のいばらの道—ベッセマーの溶鋼法の発明, アグネ, (1989).
- (9) 日野光元：ふえらむ, **23**(2018), 43-53.
- (10) 雀部 実：鉄と鋼, **67**(1981), 818-821.
- (11) 土居 襄：日本金属学会報, **1**(1962), 591-598.
- (12) 江島彬夫, 三本木貞治：日本金属学会会報, **17**(1978), 483-489.
- (13) 中西恭二, 三本木貞治：鉄と鋼, **65**(1979), 138-147.
- (14) 数土文夫：鉄と鋼, **76**(1990), 1770-1774.
- (15) 栗田満信：鉄と鋼, **79**(1993), N704-N710.
- (16) 島 孝次：鉄と鋼, **76**(1990), 1765-1769.
- (17) 姉崎正治, 山崎 勲：鉄と鋼, **76**(1990), 1775-1778.
- (18) 岸本康夫, 齊藤敬高：鉄と鋼, **100**(2014), 445-455.
- (19) 江見俊彦：鉄と鋼, **100**(2014), 31-58.
- (20) 日本鉄鋼連盟：鉄鋼業界の取り組み 低炭素社会実行計画, <http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/keikaku/>
- (21) 内藤誠章, 武田幹治, 松井良行：鉄と鋼, **19**(2014), 2-30.
- (22) 日本鉄鋼連盟：日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョンの策定について, <http://www.jisf.or.jp/news/topics/181119.html>



樋口善彦

★★

1986年 東京大学大学院工学研究科修士課程修了
2009年 4月 住友金属工業株式会社製鋼研究開発部長
2012年 10月 新日鐵住金技術開発本部
製鋼研究開発部長

2015年 4月- 現職
専門分野：高温プロセスの研究開発
◎鉄鋼分野，環境問題に関わる領域に挑戦中。

★★