



鉄の歴史

タイルコート著「A History of Metallurgy」における鉄の歴史3

History of Iron in “A History of Metallurgy” Described by Dr.Tylecote 3

沖森麻佑巳
Mayumi Okimori

(株)日鐵テクノリサーチ
常務取締役 かずさ事業所長

産業革命期の製鉄技術 (AD1720年～1850年)

産業革命の認められた定義を得ることは容易ではない。しかし、鉄における産業革命は、高炉の最も重要な燃料が木炭からコークス、石炭に代わった時期と考えることができる。これによって、鉄製造時の燃料であった木炭が欠乏したことによる生産制約を解消し、大幅な生産能力拡大が可能になったのである。

1.1 高炉への石炭と蒸気エンジンの導入

イギリスにおける鉄の生産量拡大を推進する際に、燃料である木炭が不足して来たので、木炭の代わりができる燃料として、コークス、石炭が求められることになった。しかし、鉄製造用の燃料として低い硫黄含有量であることが必要であったので、木炭からコークスや石炭への転換は、迅速に全ての場所で可能とはならなかった。

1.1.1 技術の段階的導入

(1) 石炭の導入 (1600～1690年頃)

イギリスにおける石炭の高炉への適用の最初の特許は、スタルテバンド (1611年) とロベンソン (1613年) に与えられ、最後にデュドレー (1622年) に許可された。デュドレーは1638年には鞆と石灰添加物に関する特許を出している。彼は、1619年にワークチェスターシャーのクラッドレーでの最初の炉において石炭による溶解に最も適した設計を実行したことを、1655年の著書“Metallum Martis”で報告したが、実際はいかなる内容であったかは判明していない。最近、ヒムレーにおいて発掘されたスラグの山には、コークス化した大量の石炭が含まれており、スラグの硫黄分は0.12%であったことが判明している。しかし、製造された鉄は低塩基度で製造されており硫黄が非常に高く、鍛造することが不可

能であり、大量な販路を見出すことはできなかった。

(2) 空気エンジンの導入 (1699～1750年頃)

1699年、ダービー I 世は肉厚の薄いポットを鑄造するためにシュロップシャーのコールブルックデールで低硫黄石炭を使って試験を開始した。1709年に、シュロップシャー炭田の低硫黄 (0.5～0.55%) 石炭を使用して鉄の製造に成功した。現在は2.5%硫黄を含むコークスを使用しているが、大量の空気を吹き込んで石灰を使用し得られる高塩基度スラグで操業している。

鑄鉄の最初の硫黄含有量は0.1%程度であったが、無害なMnSを形成するために、十分なマンガン含有している鉍石を使用していた。また高いSi含有であったので、薄く切削できる、ねずみ鑄鉄は作りやすかったが、Siの低い、製錬して鍛造性を付与できる炭素の低い鑄鉄の製造には向いていなかった。ダービー I 世が亡くなった後を引き継いだダービー II 世は1732年から動力の課題に挑戦した。鞆用の水車に使用する水を確保することが求められていたので、ダービー II 世は1742年に空気エンジンの使用を開始した。これによって皮革製の鞆から送風エンジンへの転換が始まった。

このコークス、石炭の活用と空気エンジンの導入が、高炉を木と水が多量にある場所に建設する制約から開放し、石炭が豊富にある場所に建設することを可能にした。

イギリスの多くの石炭鉍脈中の頁岩には炭酸を含んだ鉍石が存在しており、この鉍石が製鉄にきわめて適していた。そこで、1710年からの産業の発展は、資本の投下と蒸気機関を適用して効率的な送風を行う際の技術的な課題の解決に依存することになった。

(3) 蒸気エンジンの導入 (1750～1850年頃)

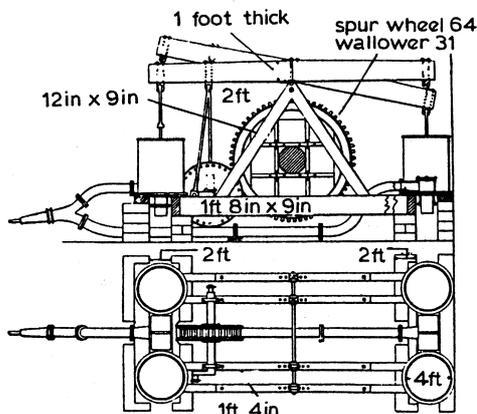
ダービーの製造したシリンダーはポロシティがあり、最初から卓越したシリンダーをワット、ボルトンに提供できな

った。この課題は西ミッドランドにいたジョン・ウィルキンソンによって解決された。彼は父親とともにリンネル製品用の表面が平滑な鉄製品の製造にノウハウを持っていたからである。ウィルキンソンは鉄の鑄造に、ダービーは鍛造することのできる銑鉄の供給に全力を傾注し、1750年に品質的に満足のできる鉄製品を製造した。1779年にアイアンブリッジに供給した白銑鉄は、珪素含有率が低く、硫黄が0.04～0.1%であった。

ダービー二世は1755年に箱型軸付き蒸気エンジンを建設した。ダービー三世が1768年に開発を引き継いだときに、蒸気エンジンは軸に直接的に接続してはならず、水を低い池から高い池に汲み上げていた。続いて高い池からの水は水車に注がれて、水車がカムの助けを受けて箱型軸を動かしていた。図1のように、スミートンは、1768年に水車により動力が与えられていた鉄製空気吹込みシリンダーを製造し、キャロンの工場で使用した。

メリーポートでは1752年に石炭用の高炉を建設し、炉の高さは装入床から11mであり、炉の容積は57m³であった。この炉容積は、同じ時期にロー・ミルに建設された木炭高炉の15.7m³の4倍にも達していた。1777年に皮革製ではなく、ウィルキンソンが製造した鉄製のシリンダー1基を導入し、毎分5回転の水車と8個のカムによって毎分170m³が送風できることになった。しかし、水力の確保には限界があり、蒸気吹込み式エンジンの活用が唯一の答えとなって来た。

1776年にシュロップシャーのニューウィレーで、図2のようにボルトンとワットの蒸気式ピームエンジンを活用して、直接的に炉内に空気を吹き込む方式が稼動を開始した。ボルトンとワットの復水式エンジンと回転動作を得るための遊星式歯車が1782年に採用された。この蒸気エンジンは鍛造用エアハンマーや圧延、剪断にも適用された。



84 Smeaton's blowing cylinders of 1768 (after Mott¹⁵)

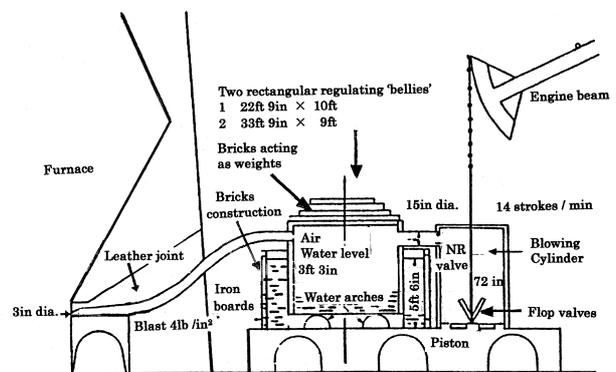
図1 1768年の送風用シリンダー

1.1.2 導入技術の効果

18世紀に石炭と蒸気エンジンが製鉄業を改革した。その効果は生産量に最も良く示されている。1720年に木炭高炉によって製造されていた20,500トン、1806年にコークス製造による250,500トンにまで増加した。1755年から1806年までにおけるホースハイ炉(シュロップシャー)の操業値によると、最終的には燃料/銑石の比率は0.3～0.42、燃料/鉄の比率(コークス比)は1.66～2まで変化した。1トンのコークス製造には、3.3トンの石炭が必要であった。当期を過ぎると炉一基当たりの一週間の生産量は13から36トンにまで増加した。1770～1800年のコールブルックデールで焙焼した銑石と石灰石の比は4:1で、石灰石中のCaO含有率を54%、焙焼した銑石中のFe₂O₃=70%、SiO₂=20%、MnO=1.5%、Al₂O₃=0.6%、CaO=2.5%、MgO=5%と仮定するとスラグ中の(CaO+MgO)=48%、塩基度(CaO+MgO)/SiO₂=1.03となるが、この値はブラッドレーのウィルキンソン炉で発見されたスラグの塩基度1.15によく近似している。

ウィルキンソンの炉で発生したスラグ中には硫黄が1.37%、溶銑中には0.027%が含まれており、ダービーからウィルキンソンへの期間中に硫黄問題が解決したことを示している。この解決の大きな理由は、図3のように石灰分が高く塩基度の高いスラグを活用したためであり、それには高温での作業が必要であった。蒸気エンジンの使用による高流量の空気吹き込みがこの要求に応えたことによって問題が解決されたのである。17～19世紀のコークス高炉のスラグは(FeO)や(Fe₂O₃)が極めて低く、(SiO₂)=38%、(CaO)=41%、(Al₂O₃)=12%で塩基度(C/S)=1.15であり、初期鉄器時代から近代に至るまでに技術の進歩によりスラグ中の(CaO)は増加し塩基度がアップし、酸化鉄分が大きく減少してきたことが示されている。

18世紀の後半にヨーロッパ各国は、イギリスの新しい製



85 Steam blowing arrangement at New Willey furnace, Shropshire

図2 蒸気機関直結送風機

鉄技術を目撃し、木炭が変わってコークスや石炭の使用を開始した。スウェーデンとフランスもイギリスの高炉を調査した。特にスウェーデンでは木炭燃料問題が存在していなかったため、新しい高炉技術によればイギリスに輸出する鉄製品を製造できることに注目して対応を進め、棒鉄をイギリスに大量に輸出するまでになった。

1.2 高炉の変遷

1.2.1 高炉の形状と構造

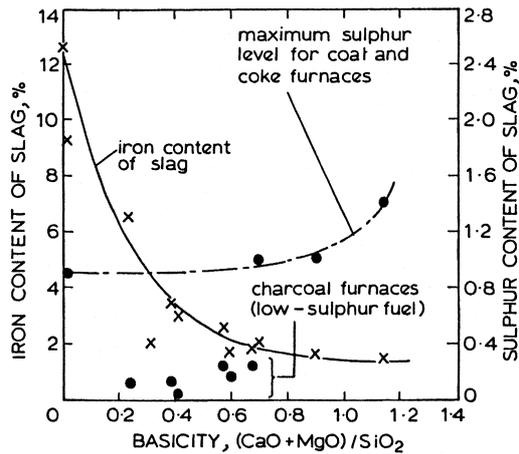
(1) AD1650~1800年の変遷

当初の高炉では、湯溜まりと朝顔が一体化していたが、時代の経過と共に湯溜まり、朝顔、炉陶の三つに分離した形式が採用されてきた。炉の最大高さは、図4のように1650年の高さ7mから1800年の13.5mまで変化した。木炭は13.5mの重量に耐えることができないと考えられていたが、加重は横側に伝わって木炭には懸からず、高炉高さの限界は

空気の吹き込み圧力から決定されていた。この期間を通じてH/B比は約3.7で形状は一定であった。朝顔角度は、17世紀後半の75°の急峻な壁から50~60°の緩い角度になった。これは当初の高さや径を一定にして、炉容積拡大を狙ったものである。

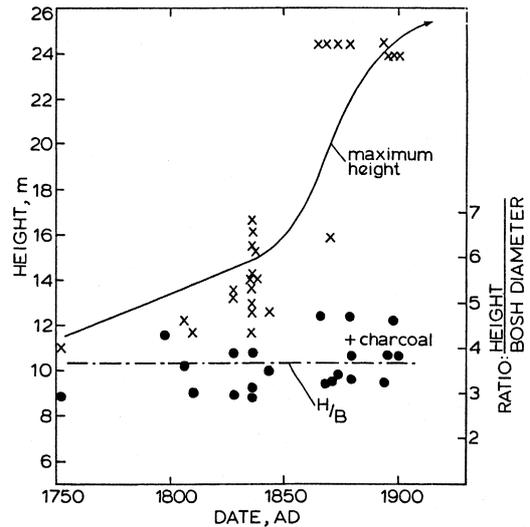
(2) 1800年~の変遷

コークスを使用する炉において高さや容積を増加させる傾向が続き、図5、6のように1850年には高さは14~15mになったが、朝顔角度は57°、H/B比は3.7のまま変わらなかった。スウオンジーの高炉は高さが15.5mから19mでH/B比が4~5.6で背が高い細い炉であったが、朝顔角度が73°と急峻であり壁が薄く熱ロスが大きかった。1850年以降において、H/B比は初期の値であるが、図6のように装入物が円滑に落下するように朝顔角度が急峻な方に戻ってきた。しかし、この方式では反って朝顔部が冷えることとな



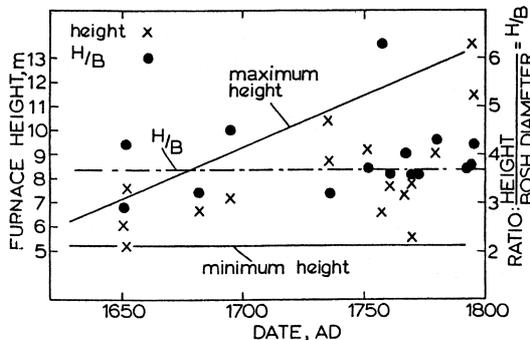
86 Effect of basicity on the iron and sulphur contents of blast furnace slags

図3 スラグ中の鉄と硫黄への塩基度の影響



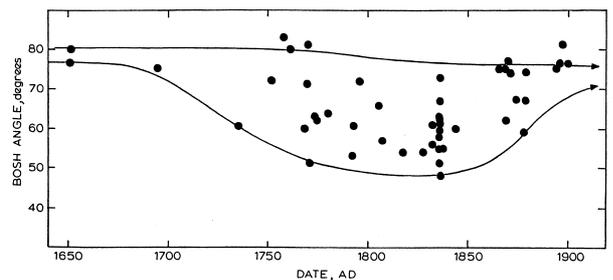
95 Evolution of coke/coal blast furnace, 1750-1900; note continuous increase in height while the height of charcoal blast furnace shows no increase beyond that of Fig.94; Height/Bosh ratio is again constant at about 3.7

図5 高炉高さと(高さ/朝顔径)比の推移(1750~1900)



94 Evolution of the charcoal blast furnace; 1650-1800; note the steady increase in maximum height while the ratio Height/Bosh dia. stays more or less constant at about 3.7

図4 高炉高さと(高さ/朝顔径)比の推移(1650~1800)



96 Change in blast furnace bosh angle, AD 1650-1900

図6 朝顔角度の推移

り、粘着気味の装入物が不均一に落下するようになった。朝顔部に羽口を導入したが賛同者は少なかった。空気吹き込みエンジンが改良され、高い回転速度が通常的になって、羽口の数は増加し1880年には6本まで増加し1950年には径が6.7 mの炉で14本となった。

炉形状の近代理論では、朝顔角度は75°以上で、朝顔部高さは全有効高さの15%以下、羽口の高さは炉底部から2 mで、羽口間隔は1.5 m、シャフト勾配は1/12 (8 cm / 1 m)とされている。炉設計は炉床径から開始するのであるが、現在、炉床径は9 mから14 mとなっている。

(3) 炉前面の封鎖

炉の前面にアーチ天井と堰のある(炉胸)開放炉の炉前での作業は困難であった。1867年にカール・フォルステによる前面閉鎖の特許が出された。炉体のレンガにスラグと溶銑用の孔が開けられ通常は最適な粘土により閉じてられていたが、出銑時期になるとドリルにより孔を開けてスラグを排出、出銑した。現在では出銑口周辺の凝固した鉄は酸素パイプで取り除かれ、出銑孔を封じる粘土も容易に取り除くことができるように最適な方式が採用されている。

(4) 炉の石組みとライニング

スティック炉、フロス炉は当時のオーストリアのフォルデルンベルグで稼動していた円錐台を形状の基礎にした石製で、内部にはライニングが実施され、石の骨組みとライニングの間には砂を入れて隙間を埋めていた。空気を吹き始めてから炉の下から水分を抜き取る工夫が施されて、デービーシャーのメルボルンの炉は、切石積みとライニングの間にはレンガで造られた迷路のような部屋があり、水分を逃がすためと考えられている。砂は孔の役割を果たし、水分逃がしには効果があったものと考えられている。

1.2.2 鞴、羽口と空気吹き込み圧力

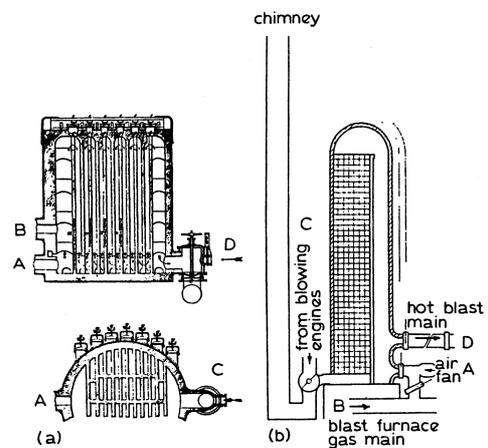
炉中に空気を吹き込む鞴の形式については、西洋では長い間、手風琴型であったが、日本と中国では箱型が発展した。蒸気エンジンの出現で手風琴型から箱型への変換が必要になって来た。既に述べたように、1760年にイギリスでは空気吹き込みシリンダーが高炉に適用され、プロズリーでは1776年にウィルキンソンがボルトンとワットの蒸気エンジンを単一のシリンダー装置に適用し図2のように空気を直接に吹き込んだ。空気吹き込み羽口本数は、初期の炉では1~2ヶ所で、18世紀の炉では3~4ヶ所となって、空気吹き込み量が徐々にあるが増大していった。羽口は薄い鉄板であったが、時々銅板も採用され、冷風の吹き込みの場合では水冷は必要なかった。レンガもしくは石で製作された羽口用の

アーチに鉄板の端部が差し込まれ封泥された。空気吹き込み圧力については、18世紀末期までは1 lb/in² (0.067 bar)を超えてはなかった。しかし、1832年には2倍の1.75 lb/in² (0.18 bar)に、1870年では4lb/in² (0.27 bar)になり、近代1944年には電気駆動のターボエンジンで20 lb/in² (1.3 bar)に達している。

1.2.3 熱風炉

当期に新しく登場した重要な技術は熱風吹き込みである。冬季の冷気吹き込みで高炉は好調であるという考え方を多くの鉄鋼業者が持っていたことからすれば、熱風の吹き込みの歴史は不思議なことである。1825年にネイルソンは、夏季に水分が入り込み炉が不調になるとの考えを示し、空気を石灰の上を通して乾燥することを示唆した。1828年にネイルソンが乾燥した空気を吹き込むという特許を提出する前に、ウィルキンソンが1795~99年で熱風吹き込みを実施したようである。ネイルソンが、クライド製鋼工場工で鉄板の箱(1.2×1.0×0.6 m)を外から加熱して27℃の熱風を得て炉内に吹き込み、鉄の品質とスラグの流動性が著しく改善された。続いて彼は図7のようなU型鑄鉄管熱風炉を開発して140℃の熱風を得ることに成功した。カルダーの鉄鉱業者ディックソンは1831年に315℃までの熱風を吹き込むことを可能にし、コークスの代わりに石炭を使って溶解が可能になった。鑄鉄製のパイプを使用した空気加熱炉はパイプに亀裂が発生するという課題を有していたが、この課題は19世紀の後半に耐火物式の蓄熱炉がカウパーとウィットウェルによって発明され、真に解決された。

熱風を吹き込むことになって、羽口が加熱されることになり、水冷が必要になってきた。クライド工場の羽口は中空鑄



a Whitwell's type; b Cowper's type

99 Refractory stoves

図7 蓄熱式熱風炉

鉄製で内部を水が流されており、コンディー型もしくはスコッチ型は鑄鉄箱内に鍛造製鉄管が配置されており水はその中を流れていた。近代の羽口は最高900℃まで対応でき耐熱鋼と銅が複合した構造になっている。

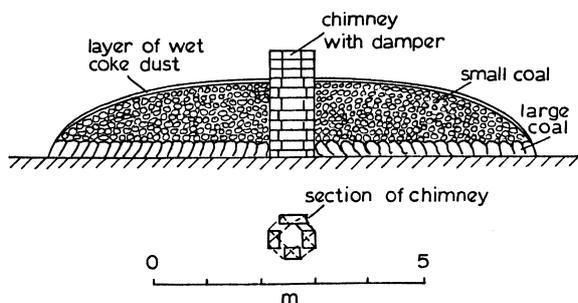
クライド工場での燃料／鉍石の比は、1829年に1.5：1であったが、石炭と熱風を活用して1833年には1：1まで減少した。

1.2.4 鉄鉍石、石灰石の焙焼

鉍石内への気体の浸透性を増加させるために、粘土状の鉍石を焙焼することは常識になっていた。焙焼は、大地に作った小山や低い壁を施した囲い地もしくは炉の中で、高炉ガスを使用して加熱が実行された。スタイリアで使用された四角形の焙焼炉は高さ3～4 mで、長さ4.5 m、幅2 mの石製であった。底部には点火装置と排出用の孔があった。炉内は木炭と鉍石が交互に層をつくり、鉍石は破碎されて木の実の大きさとなっており、厚みは木炭層が30 cm、鉍石層は60 cmであった。一方、石灰石は焙焼されても、直ちに運搬できなければ湿気により消化してしまうので数少ない工場でしか焙焼が実行されていなかった。

1.2.5 コークス

コークス製造は、初期の18世紀中ごろから図8のように小さな山のようにして実行されていた。例えば、ブラック・カントリーでは、半径は10 m弱で高さ2 m程度の小山が、地面を床にして造られており、中央部にレンガで造った隙間のある煙突があった。1765年にニューカッスルでは長方形の炉で醸造用のコークスが製造されていたが、1826年にシェフィールドで同様な炉を使用して高炉用のコークスを製造した。この炉はレンガ製で、内部の直径が3 m、高さ1 mで断熱性を高めるために外側は乾燥した石壁で、屋根はアーチ型をしており、屋根から小さな石炭が入られ、熱の保存のために連続して操業していた。床には排出を容易にするため



103 Coking in heaps (after Percy; 'Refractories and Fuels', 1875)

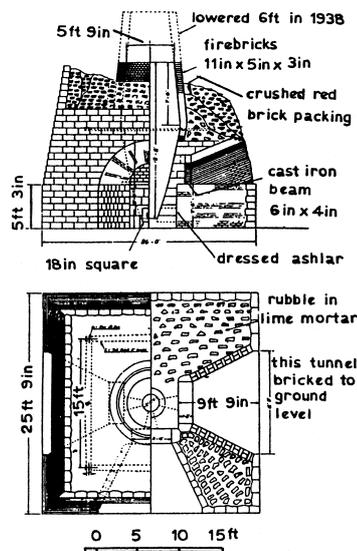
図8 丘状にした石炭の堆積コークス化

に傾斜が付いていた。コークス化には72～96時間必要で、副産物のタールが炉につながっている濃縮器の中に集められていた。ヨークシャーのミーフィールド近くで発掘された炉は1850年から1900年まで稼動していた。

1.3 木炭高炉と半熔融鉄製造法の変遷

産業革命期においても木炭高炉での生産能力拡大が進められていた。しかし、人口密度の高いイギリスでは木炭使用によって鉄の生産量を増加させることは難しかった。図4のように1651年にイギリスで建設が始まった木炭高炉は、以降18世紀を通じて大きさが確実に増加してきた。図9の木炭高炉への空気吹き込みは、イギリスのヨークシャーや他の場所において1761年に開始された。木炭の機械的強度が弱いことから、木炭高炉の高さは限界があると考えられていたが、背の高い炉の荷重は横側に伝わって木炭自体にはかからなかった。むしろ空気の供給能力が炉の形状、特に高さの限界を決めていた。1794年のロシア・ネビアンスクの13.5 m炉が建設されると木炭高炉の高さは限界に達した。17～18世紀の木炭高炉のスラグは、(FeO) = 3%、(Fe₂O₃) = 0%で酸化鉄は極めて低いが、(SiO₂) = 40%、(CaO) = (MgO) = 15%と高く、塩基度 (C/S) は0.3～0.4程度であった。

錬鉄製造法は、ピレネー、コルシカ、スウェーデン以外は西洋では死滅していたが、北アメリカ大陸では改善が進められていた。ピレネー地方のカタラン炉は1840年まで継続し、重量は200 kgで落水送風機を使用していた。北アメリカの錬鉄製造法は加熱した空気を吹き込む鉄板を敷いたカタラン炉で、全鍛造鉄中で錬鉄は1831年では10%、1856年では



93 Low Mill blast furnace, near Cawthorne, Yorkshire (from Baker⁹⁶)

図9 木炭炉への空気吹き込み

6%であった。生産能力は、ピレネー地方のカタラン炉が時間当たり30kgであったが、アメリカでは45kgまで増加していた。

1.4 鑄鉄から可鍛鉄、軟鉄への転換

1.4.1 精錬炉と坩堝炉による可鍛鉄製造

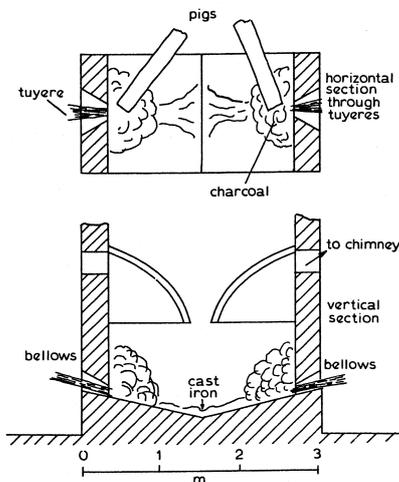
ダービー I 世がコークスを使用し製造した鑄鉄は、珪素が1%以上のネズミ鑄鉄で黒鉛を含んでおり、鍛造が困難であった。そこで、市場の強い可鍛鉄への要求に対応するために、ネズミ鑄鉄から可鍛鉄への転換が必要となっていた。その転換作業に石炭やコークスを燃料として使用すると硫黄が高くなり品質を劣化させたので、木炭を使用する精錬炉が唯一の十分な方式であった。木炭による精錬は2段階を経過して実施された。図10のように、最初の精錬炉では木炭と一緒に黒鉛状鑄鉄が炉内に装入され、空気が羽口から吹きこまれ15時間程度で珪素が除かれ、銑鉄が出湯された。その後、再び精錬炉内に入れられ、酸化作業で炭素を除去しネズミ鑄鉄が白鑄鉄に変換された。

一方、ダービーらは1719年にコークスを使って鑄鉄から可鍛鉄への転換を試みたが成功しなかった。ウィリアム・ウッドは、粉体化した鉄鉱石とコークスと石灰と一緒にして、反射炉の中に入れたが、炉が酸化性のために成功しなかった。1761年に息子のジョン・ウッドが得た特許では、通常の精錬炉で鑄鉄と石炭と一緒にして、幾分か硫黄を含んだ鑄鉄を鍛造できる状態まで精錬し、次にその鑄鉄を粉碎してフラックスと共に坩堝に入れて、図11のように坩堝を反射炉内において加熱した。石灰を含んでいたフラックスは硫黄を吸収するのに十分に塩基性で、石炭を使用した反射炉内で酸化

作用が進んで炭素が除去され、鑄造鉄が鋼に変化した。

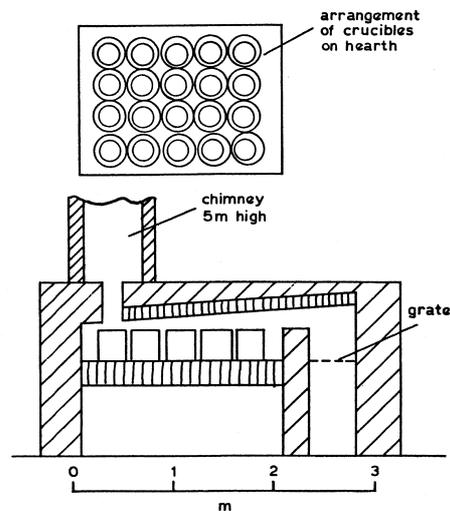
1.4.2 パドル炉による軟鉄製造

1783年にオニオンは、空気を吹き込んで再溶解した白銑鉄を、溶解炉から直接反射炉に装入し、強制通風の助けで酸化を完全なものにすることを試み、パドル塊がハンマーにより転がされた。1783年、コートは反射炉には自然通風し溝付きロールで圧延する特許を出し、1784年に底部に砂を敷き詰めた反射炉内でパドリングする方法、即ち乾式パドリングの特許を出した。1818年にロガーズは、酸化された鉄がシリカと結合してスラグ化することにより銑鉄がロスすることを避けるために、コート反射炉の炉底のシリカを酸化鉄に置き換えて敷き詰めた方式を採用し、酸化鉄の酸素で炭素を除去するようにした。さらにジョセフ・ホールは、高炉朝顔部から出てきた残留物や不均質な滓などを添加して、スケール内の酸素と銑鉄内の炭素が反応し、酸化炭素の青い炎が発生することを目視できる湿式パドリング法を開発した。代表的なパドリング炉は図12である。さらにホールは流出した時のスラグ(パドリング・スラグ)を炉底に敷く特許を1838年に出した。湿式パドリングでは、スラグ中に鉄酸化物を添加することで酸化速度が高まりネズミ銑鉄も処理できた。プロセスは、最初は珪素が酸化しファイヤライト・スラグが生成し、白銑鉄が酸化し鉄酸化物ができ、炭素と鉄酸化物との反応で炭素ボイリング現象が進み、燐の約80%はスラグに除去できた。実際の作業は、1ヒートは1.5時間、12時間交代で7ヒート処理しスラグは2ヒート毎に排出したが、ファイヤライト・スラグに鉄が7~18%も損失し、高炉にスラグをリターンしたが燐や硫黄が増大するという課題があった。



87 Early refinery for the removal of silicon from cast iron by oxidation, thus converting grey cast iron to white cast iron (based on a description of Jars¹¹)

図10 ネズミ鑄鉄からの脱珪素技術



88 Reconstruction of a reverberatory furnace used by John Wood in 1761 for the fining of cast iron by 'potting' (based on Morton and Gould²⁵)

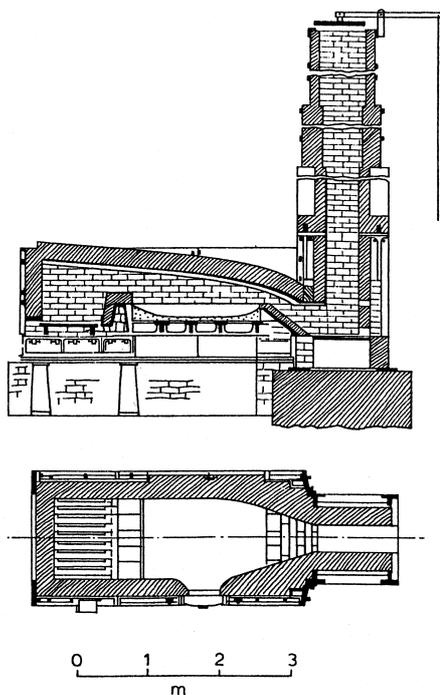
図11 坩堝内の鑄鉄から鋼への変換

鑄鉄と鍛造鉄の差が炭素含有量であることが判明したが、鋼の炭素含有量を0.5～1.5%だけ残すようにパドル法で制御することは難しかった。イギリスでは1851年にブラッドフォードのロー・モア製鉄所ではパドル法で1250kg製造しロス率は6.75%であったがコストが高かった。1898年にクルップがパドル法で成功を取めた。クルップはパドル鋼を、Aは0.9～0.75%、Bは0.75～0.65%、Cは0.6%以下に分類し、AとBを製造した作業者に賞与金を与えた。パドル鋼のなかのスラグは鍛造鉄と同じレベルであり、車両のバネに使用する場合に再溶解されたパドル鋼は坩堝鋼と競合していた。新しい軟鉄の出現によって可鍛鉄をパドル炉で製造する必要がなくなった時に、パドル炉は徐々に姿を消していった。

1.5 様々な製鉄技術の発展

1.5.1 反射炉とキューボラによる大砲製造

18世紀中頃、高炉から出てきた溶銑（ネズミ銑）はスラグで汚染されており、そのままでは大型の大砲の製造は不可能であった。そこで、反射炉で得た高い温度でスラグを溶かしだす再精錬を実施し、高い品質の大砲を製造していた。酸性の条件下で炭素を減少させて、高い流動性を持った軟らかい鉄を製造した。18世紀の初頭には、石炭を燃料とする反射炉で鉛と銅を精錬することは一般的となっており、1765年、ニューカッスルで鉄の製造に空気を吹き込む反射炉を使用し



92 Typical Welsh puddling furnace with iron bottom

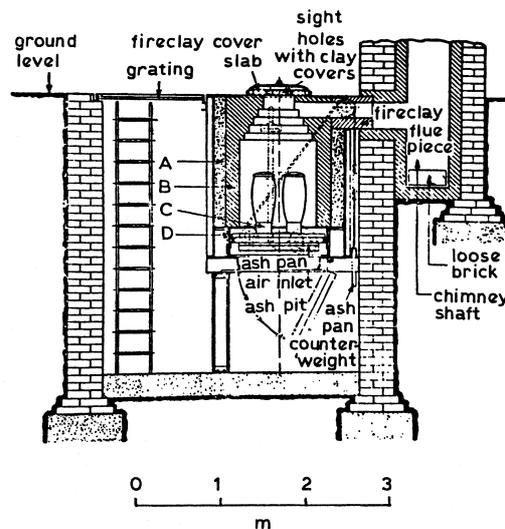
図12 パドル法

た。炉は川砂や海砂で築造され、1.6～1.8トンの鉄を装入する前に3～4時間燃焼させ、溶解に1.5時間を要した。小さな炉の方が良好な大砲を製造できると考えられていた。

砲弾を製造する別の炉として、強制通風する小さな樽の形をしたキューボラがあった。炉は分割可能で、炉の底部が坩堝の役目を果たし、金属の溶解が完了した後に上の木炭を取り去り、煙突を除いて坩堝部を持ち上げて内容物を鑄型の中に注湯した。1836年にピストン式の吹き込み装置から空気が吹き込まれ、スウオンジーでは直径が126 cm、ストロークが190 cm、毎分18ストロークの吹き込み装置が、キューボラ2基、高炉1基と精錬炉1基に空気を吹き込んでいた。ウィルキンソンは、含有硫黄に有利に作用することを知っていたかどうかは不明であるが、キューボラの装入物にマンガンの酸化物を添加していた。

1.5.2 浸炭鋼

浸炭処理は、従来から木炭や木材を使用してスウェーデンやロシアで非常に高いコストで実施されていた。スウェーデンでは炉内に長さ2mの容器を入れて6～7週間加熱し、鍛造鉄を燐やスラグの少ない鋼に転換していたが、450kgの鉄を鋼にするために100トンの木炭を必要としていた。シェフィールドとニューカッスルにあった図13のような浸炭炉は、レンガ造りで横3.7mのアーチ型の部屋があり、内部に砂岩の坩堝を置いていた。坩堝内には木炭と鉄棒が入れられ、歯車を製造した際に発生した粉末によって覆われていた。下部の火床で燃焼している石炭炎からの熱は、うまく配置された煙突から坩堝に伝えられ、雰囲気中の硫黄は影響することなく、900℃以上5日間保持された。平らな鉄棒は、炭素が鉄



115 Crucible steel melting furnace

図13 坩堝溶解炉

中に残存している酸素（スラグ）と反応して若干膨張したのでブリストア（膨れ）鋼と呼ばれていた。こうして製造された鋼では、炭素は不均質で表面では1%であるが内部はほとんど含有しておらず、スラグが残存していた。高さ25 cm、径18 cmの蓋が付いた坩堝内に、ブリストア鋼と粉末（おそらくガラス）を入れて火床に置き、コークスを周辺にばらまき、下から空気を吹き込み、燃焼ガスで坩堝を加熱した。溶解に6時間を有し、鑄型に注湯し約10kgの鑄塊が得られた。ハルツマンが上記の方式を開発し、19世紀後半に鋼の大量生産方式に発展し、20世紀には良質な合金工具鋼の製造法となった。

1.5.3 可鍛鑄鉄の再発明

レオミュールは白銑鉄とネズミ銑鉄の違いは認めつつも、違いの原因は硫黄にあると考えていた。彼は、木炭を混合し白銑鉄を焼鈍して加炭して鉄を鋼に変えようとしていた。彼はネズミ銑鉄が白銑鉄より不純物が多く、精錬炉の歩留まりは白銑鉄の方がネズミ銑鉄よりも大きいことに気がつき、鑄鉄は冷却速度を変えると白銑鉄にもネズミ銑鉄にもなることを発見した。これは、冶金分野で科学的に制御された実験の最初の結果であった。

2 鋼の大量生産

鍛造鉄の製造は労働と燃料が集中するプロセスで、パドリング法の機械化も充分ではなかった。1860年にイギリスでは3400基のパドリング炉があり、一回の処理が250kgで一日におよそ1.6tを製造し、12時間の交代作業で6~7チャージであった。このような状況の中で重要な軟鋼の大量生産に関して、19世紀の後半に、シーメンス、ベッセマー、ケリー、そしてトーマスの著しい貢献があった。

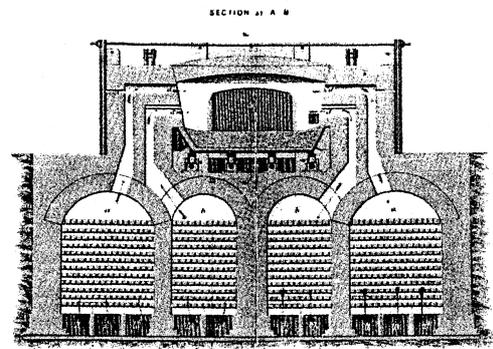
2.1 シーメンスの平炉

ウィリアムとフレデリックのシーメンス兄弟が、多量の熱量を溶解に使用することを試みた。1861年以前の鉄における実験で、炉の両側の火室で固体燃料を使用し、その火室を通過した空気を加熱したが、蓄熱室である格子煉瓦目の灰詰まりを抑えることや高温に耐えられる耐火物を得ることが困難であった。しかし、ガス製造業者が普通の石炭からガス燃料を得ることに成功し、それが炉から火室と燃料灰を取り除いた。製造したガスを燃料とした蓄熱炉は、図14のように鋼用の平炉に使用された。何人かのシェフィールドの鋼製造業者が、鋼を溶解するためにルツボ法に代えてこの新プロセスをすぐに採用したが、直ちにパドリング法に取って代わることにはならなかった。鋼と鍛造鉄を平炉で溶解することを

始めたのは、フランスのピュールとエミール・マルチンであり、彼らがパドリング炉に本当に埋葬の鐘を鳴らした。

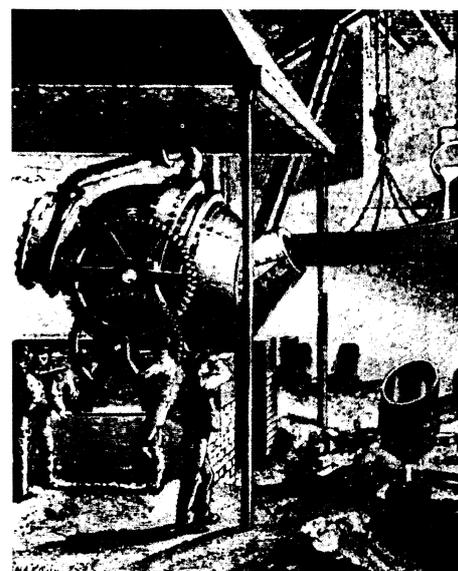
2.2 ベッセマー転炉

シーメンス兄弟が実験を進めていると同じ時期に、イギリスのベッセマーとアメリカのケリーが、溶けた鑄鉄に空気を吹き込んで含有している炭素を減少させるといふ、明白ではあるが困難なプロセスを開発していた。ベッセマーは、空気を吹き込んで鋼を溶解させるために反射炉の温度を高めようとしており、固体の鑄鉄は溶解する前に吹き込んだ空気に曝されて、炭素が取り除かれることに気がついた。彼は、脱炭素が生じる前に金属の温度が非常に高くなることを理解し、炉内で加熱されていた溶鉄を坩堝の中に入れて空気を吹き込んだ。こうして、最初のベッセマー転炉は、1856年にロン



136 Siemens' open-hearth furnace and regenerators for the melting of steel (from Percy: 'Refractories', 1875)

図14 シーメンス平炉



138 An early tilting Bessemer plant about 1860; this is believed to have been in use at Ebbw Vale, South Wales

図15 ベッセマー転炉

ドンのパンクラスで誕生し、圧力が10～15lb/in² (0.8～1.0バール)の空気を吹き込み、鑄鉄350kgを入れた固定した容器であった。ベッセマーは炭素と酸素の反応や金属中の不純物の反応による発熱特性についてよく理解していなかった。彼は反応の激しさには驚きながら10分間で全ての不純物が燃えてなくなった後に炎が治まったので、空気の供給を中止した。金属は銅塊鑄型に出湯され、炭素の低い可鍛鉄であることが判明した。彼は1856年の8月11日にチェルトナムでのイギリス鉄鋼協会の会議において、これを公にした。50kgを4～6時間で製造する坩堝鋼や250kgを2時間で製造するパドル法の鍛造鉄と比較して、準備と出湯を含んで約1時間で1ヒート大量5tの鋼を製造できる転炉が出現した。これは革命的なことであり、国内外の多くの鉄鋼業者や鋼製造業者がベッセマーのもとに特許の購入を求めてきた。

しかし、ベッセマーの銅塊は非常に気泡が多いうえに過度に酸化されて不純物を含むという課題を有していた。が、熟練した冶金の専門家であったロバート・エフ・マシュートの努力によりこの課題が解決された。マシュート家は、ハンツマン家の伝統のもとに製造されていた坩堝鋼の改善のために、坩堝に添加するマンガンを製造しており、1848年にはレーニッシュ・ブルッシャーにて、8.5%マンガンと5.25%炭素を含有しているスピーゲル・アイゼン(鏡鉄)を製造した。この経験からマシュートは、銅塊の品質が悪いというベッセマー法の課題の原因を正しく判断し、品質の悪いベッセマー鋼を再溶解してスピーゲルを添加した銅塊は表面が綺麗であり中央にパイプができており、良好な鑄鋼の様相が見られた。これがベッセマー法に続いた開発の始まりであり、良好な鋼製造の基礎であった。

しかし、世界の鉄鉱石の大部分は本質的に微量成分として燐を含んでおり、大量の鋼を製造するためには課題が残っていた。パドリング法は比較的低温であり、燐酸は安定的で金属の方に戻って金属を脆くすることはなく、燐を除去するにはパドリング法は相対的に効率の高い方法であった。シーメンス法やベッセマー法は温度が1600℃まで到達できる溶解プロセスで、パドリング法に取って変わったが、燐は金属の方に逆戻りした。

別の課題は、炉の耐火物ライニングが高純度な砂岩即ちシリカ(SiO₂)であり、化学的に酸性でスラグになると、よりアルカリ性材料の石灰やマグネシアのような強塩基と接触して、急激に溶損が進行することであった。このようなライニングは、燐が酸化される間に生成してくる酸性の五酸化燐と結合することができなかつた。この事実は、ベッセマー法の適用先を、燐を含まない鉱石か、燐が約0.05%より少ない鉱石に限定することになった。イギリスで適合している唯一の

鉱石は、カンバーランド、北ランカシャーとディーンの森と、南ウェールズからの数種の鉱石であった。ベッセマー法は19世紀のイギリスでの生産の大部分を占めた石炭層の鉱石に適していなかった。これは、イギリスの鍛造鉄の生産が19世紀の終わりまで増加し続けた事実にも見られるように、ベッセマー法にとって著しい打撃であった。

フランスで高マンガン・低炭素の合金鉄の新しい原料が使用できるようになり、鍛造鉄から鋼に切り換えることが促進された。燐の問題があつたにもかかわらず1873年には、イギリスでのベッセマー法の生産量は496,000トンで、シーメンス法は77,500トンとなったが、鍛造鉄の生産量はおそらく3百万トンを越えていた。

化学に興味をもっていたシドニー・ギルクリスト・トーマスは、1870年にパークベック専門学校の化学の夜間課程に出席し、ベッセマー転炉の燐の問題を知った。当時の対応策は酸性であるP₂O₅を石灰で中和することであったが、その時に生成する塩基性のスラグによって酸性であるシリカ質ライニングが損耗するという課題が発生していた。ライニングに石灰を使用するという全ての努力は、石灰石や石灰それ自身が耐火物としては脆弱性であることから、失敗していた。1877年から78年にかけて、トーマスはプレナボン工場で実験を実施した。その結果は、塩基性のライニングとフラックスが、転炉から満足な方法で燐を除去することができることを示していた。ドロマイトとタールを衝き固めた塩基性ライニングを使用して若干の時間を要したが、1879年にミドルスポローの大型転炉で脱燐の操業に成功した。

本法は現在、BOS (Basic Oxygen Steel) プロセスとして近代的な形で知られおり、世界中の軟鋼のほとんど全てを製造している。ベッセマー転炉は、最終的な形として傾動できる卵状の炉で、基底の耐火物にある孔(羽口)を通して、炉内には冷たい空気が吹き込まれた(図15参照)。溶鉄が羽口に入って閉塞を生じないように、炉が傾斜した位置で、炉内に溶鉄が装入され、空気が吹き込まれて、炉が上向きに起こされた。空気の吹込圧力の15lb/in² (1バール)は、0.75mの熔融金属に空気を突き通し羽口の閉塞を避けるには十分であった。空気中の酸素により鉄中の不純物を酸化すると発熱反応が生じ、溶解している鑄鉄の温度を1200℃から軟鉄の1600℃にまで上昇させた。

酸素の大量な出現により、冷却効果のある窒素をなくして高温が得られるようになったので、デュラーの独創的な仕事はオーストリアのリント・ドナピッツ会社により1953年に実用化された。この方式は、金属の表面に酸素を吹きつけることのできる垂直に吊るされたランスを使用し、底部の羽口を撤去してしまい、他の同様なプロセスを全て打ち負かし、ベッセマー・トーマス法の究極的な形式となった。さらに、

空気の代わりに酸素を活用することは、ベッセマー法での窒素による脆性効果を減少させ、今世紀の第2/四半期において、溶接構造がリベットに取って代わった時に十分に評価され、建設工学の分野においても受け入れられるようになった。

コスト的に安価な鋼は鍛造鉄に徐々に置き代わっていった。薄板は木炭鉄を精錬炉で脱炭して製造されていたが、鋼が薄板の主要な使用先であったブリキ板の分野にも徐々に進出していき、ブリキは特にウェールズの特産品となっていた。1930年になって、連続ストリップ・ミルの導入が開始され、薄板は短片に切断される代わりに長く連続して溶接されてリボンのように圧延され、錫メッキが施された。この連続冷延プロセスは自動車の車体板の製造法に発展し、1930年代の錫メッキ板の生産量を越えるようになった。現在、勿論、このプロセスは、全ての軟鉄の薄板製造に使用されている。

2.3 特殊鋼

R.F.マッシュットは、スピーゲルと鑄鉄と酸化タングステン(WO_3)とピッチの混合物から自硬化性可鍛鋼を得た。この鋼は切断ができる鋼として大量に使用され、赤熱状態でも切断が可能な現代の高速度鋼の基礎となった。フランスのテール・ノアール会社が1877年に6~7%の炭素をもつ80%のマンガン合金を使用して2.45%の低マンガン鋼を製造したが、この値以上のマンガンでは脆弱になると考えられていた。ロバート・エー・ハドフィールドが、この安価な高マンガン合金鉄の重要性を評価し有名な高マンガン鋼を初めて製造した。ハドフィールドは靱性を失うことがない高硬度の鋼を製造することを追求し、1887年に12.5%マンガンで1.2%炭素を含有する鋼を特許化した。この鋼は、焼入れしても硬化せず非磁性であり、靱性がある冷間加工や摩擦によってのみ硬化する等の不思議な特性があった。

1889年にグラスゴウのジェームズ・リレーによるニッケル鋼の発明が、工学と軍事の世界に本当の衝撃を与えた。4.7%のニッケルを添加することによって強度は460から1400 MN/m²に増加し、相対的に小さな延性の減少があることが発見された。

1905年に、ポーテビンはクロムを9%以上に含有する鋼が酸の腐食に対して抵抗力があることに気付いた。エッセンのクルップにいたストラウスは、高クロムとニッケルの鋼は高熱に非常に強いことを確認し、1912~13年に高温に使用できる成分が20%Crと5%Niを含有するオーステナイト鋼を特許化した。シェフィールドのハリー・ブレアリーは、刃物産業におけるこの加工の重要性を最初に見出し、1914年に12~14%Crの中炭素鋼を特許化した。この鋼は徐々に刃物産業における主要品となった。後に、ストラウスのオース

テナイト鋼もまた鑄に強い性質が認められた。この鋼はハドフィールドのマンガン鋼のように、非磁性で通常の熱処理によって硬化することはなかった。

18%ニッケルと少量の他合金成分を鉄に添加している鋼はマルテンサイトの時効硬化の一例であり、マルエージング鋼という名称が与えられ、以前に得られた強度と延性の最も高い組合せを有していた。電気産業における方向性をもった軟磁性材料として1~4%のシリコンを含むシリコン鋼が生み出された。

3 科学者の貢献

3.1 AD1600~1699年

17世紀は科学の新しい革新において重要な世紀であった。イギリスではチャールズII世が英国学士院を1662年に設立して、1666年にフランスで科学アカデミーが設立された。天文学者にして物理学者であったガリレオ(1564~1642)やパスカル(1623~1662)のような数学者は科学に大きな貢献をしたが、彼らには観察や経験に依存していた物質の特性は、面白い探究する価値があるものには見えていなかった。アイザック・ニュートンのような例外はあったが、多くの国において金属関連機関の一つである造幣局長官達でさえ、金属の物理的な特性に興味を抱いていなかった。

そのような雰囲気の中でも、冶金学は着実な歩みを進めていた。1627年にフランス人のジョーセは、錠前の鍛冶技術に関する本の中で、金属特質を最初に科学的に観察し記録した。この中で、加工硬化や焼入れ焼戻し操作、坩堝の中に木炭と層状に交互に入れられた小さな鉄片の浸炭、硫黄の臭いから連想される鍛造鉄の熱間脆性などを記述した。1644年にヘンリー・パワーは、顕微鏡の助けをかりて、磨いた金属の表面には、割れや穴や凸凹や不規則性が満ち溢れていることに気がついた。

3.2 AD1700~1799年

1722年頃にレオミュールは、粒界構造に基づいて鉄系金属の特性を最初に討論し、顕微鏡を使用して鋼の粒子が多数の粒界からできていることを観察し、鑄鉄を可鍛化する方法を再発明した。また彼は種々の機械特性を調査する方法として、断面が角柱の試片に刻みを入れる引っ掻き方式による硬度試験を最初に提唱し、焼入れした鋼のワイヤーが破壊するまで曲げられるような装置、垂直のワイヤーに重りが吊り下げられる初期の静荷重破断試験についても言及した。

1734年に、スエーデンボルグが、1690~1730年における鋼と鉄に関する冶金と工場に関する技術をまとめたが、独創的な価値のある思想はほとんど含まれていなかったにもかか

ならず、ピリングッチョとアグリコラの仕事とディドロとヤールスの仕事の間における時間の隔たりを埋めていた。

18世紀の産業人の大多数が伝統に頼ることで満足し科学の進歩にほとんど貢献することがなかったが、異なった人物の一人にグリニョンがいる。1775年頃に彼は、初めて高炉の中の装入物が下降していく時の変化を正確に記述し、燃料／鉱石の比が大きく通風が強く、長い期間炉内に鉄が残されている場合に、キッシュ・グラファイト生成されることを見出した。彼は、実物大の高炉を15～20日かけて冷却し、金属とスラグの大きな結晶を得た。さらに鑄造中にガスが発生し鑄型の周りで燃焼し、鑄型が非透過性ならば爆発が生じ鑄造物はガス穴の多いものとなり、鑄鉄の表面にキッシュ・グラファイトが生成すること等も彼によって発見された。彼は、鍛造鉄の中で細線の束のようにになっているガラス状物質やデンドライトや多結晶物を、非常に正確に観察し記述した。

スーデンの化学者トベルン・ベリマン (1735～1784年) は、鉄と鋼の差に最初に光を当て、アントニー・ラボアジュと同時代に活躍した。当時、酸素が発見され、ベリマンは燃焼における酸素の役割を明確に理解したが、鉄に関する結果の説明には古いフロギストンの理論を使用していた。彼は1781年に鉄の化学分析に関する論文を発表し、新しい分析技術の開発において世界をリードし、種々の鉄系の材料を酸に溶解し、溶解速度やそれらから発生するガスを調査した。鉄はフロギストンと呼んでいる物を含んでおり、フロギストンは酸の攻撃を受けて分解し可燃性の空気の中に逃げて行くと彼は考えていたが、フロギストンが鉄自体から出てきたのか、含まれている不純物から出てきたのかは明確にできなかった。彼は270回以上の湿式と乾式の分析を実施して、延性のある鉄はほとんど黒鉛(炭素)を含有しておらず、鋼は少量の炭素を含有し、鑄鉄は炭素が飽和していることを結論とした。湿式分析から残留物を集め、鑄鉄からの残留物は黒鉛(炭素)のような外観であること、炭素の率として表現した場合は、鑄鉄は4%を含有し、イギリスの鋼は0.4%、ウルフスからきた鍛造鉄は0.1%の炭素を含んでいることが明らかにされた。彼は様々な残留物を調査したが、黒鉛はじめ珪素化合物およびマンガンは分析できたが、硫黄や燐を分析することはできなかった。さらに彼は磁気的特性についても考察し、鉄が唯一の磁性金属ではなくコバルト、ニッケル、マンガンが磁性を有することを記録し、磁性が鍛造鉄に誘導されることに気付いて、これをフロギストンが導入されたことに等しいと考えていた。

物理的特性に関する冶金学については、1788年にベルリンでドイツ人アッカーは、900以上の役立ちそうな金属合金の密度や引張り強度や硬度を含んだ機械的性質や実験結果

を報告した。しかし、この本はただ単に特性の表だけで初期の金属ハンドブックであり、当時の科学思想に対してはほとんど影響を与えることもなく、金属産業に知られ利用されたという証拠はみられていない。

3.3 AD1800～現代

1804年に、ウィリアム・トンプソンが、クラスノヤルスクの隕鉄を観察して、鉄のアルファとガンマの二重構造を明らかにした。この構造はウィーンで隕石を研究していたアロイス・フォン・ウィッドマンステッテンにちなんで彼の名前が命名された。同時に、1795年にロンドンの英国学士院でウーツ鋼の構造に関する論文を報告したジョージ・ピアソンによって、本構造が研究された。ウィッドマンステッテン構造は19世紀に多くの科学者の興味を引き起こし、デビット・マシュートも、それは不完全に熔融した状態において鉄と鋼が混合したものであると結論を出した。勿論、当時の神秘的なダマスカスの刀剣に、その構造が使用されていたことはよく知られていたが、鉄から鋼の構造が如何にして導き出されるかについては誰も十分に知っていなかった。

ミカエル・ファラディは、1819年にウーツ鋼の塊を分析した結果を発表して、その特性はアルミナと無水珪酸という微量の土に依存しているという誤った結論を出した。その後、彼はジェームズ・ストダートの助けを得て、ダマスカス構造は打撃することで引き出され、秩序が壊された結晶構造が発達したことに関連していると述べ、真実に近づいてきた。二人は解明を続け、様々な金属とアルミナとシリカのような土との混合によってウーツ鋼を模倣しようとしたが、ファラディは興味を失って、より知られるようになった電磁場を含めた考察に取り組んだ。ハッドフィールドはファラディの冶金学的な仕事から合金鋼の研究が誕生したと評価した。

ダマスカス製造法については、1841年にロシアでも同様な実験がアノーソフにより実行され、ベラーエフが記録に残し、これが間接的にチェルノフの有名な鑄造した鋼塊の構造に関する仕事を導いた。しかし、ダマスカス刀剣そのものの結論は重要ではなくなっていた。というのは、その結論が発表された時までに、刀剣そのものもさておき銃身の二重構造は、開発された一体物の鋼製銃身や収縮させ強度を増加させた組立て銃身(アームストロング型)によって、取って変わられたからである。しかし、これらの結論を導き出した実験は、鋼の構造に関する理解を深めることに貢献し、鋼塊鑄造の開発を促進した。

1845年にブンゼンとプレーフェアーにより高炉自体の調査によって高炉ガスが分析され、大英学術協会に報告された。

H.C.ソルビーが科学的な経験に従って活動を開始し1849

年に表面を磨いた岩石に顕微鏡の技術を適用した。彼は1863年に様々なスウェーデン鉄の中でウィッドマンステッテン構造を発見したことを主張し、磨かれ酸腐食された鋼の試料を様々な会合で展示したが産業人達の間では大きな興味を引かなかった。写真は1864年に発明されていたが、顕微鏡写真を可能とし永久に記録を残すための強い照度条件と定着の良い感光板を得るのは簡単ではなかった。ソルビーは、酸素に水素を混入した炭で斜めから照射し湿式のコロジオン板を使用して成功し、光学的には鏡と共に垂直の照射装置を使用した。1887年から新しい金相学者達にとっては、顕微鏡写真が通常的な特徴となった。

1885年には金相学の価値はヨーロッパ中で評価されており、フランスのレ・クルーゾーの軍器工場では、技術者のフロリス・オスモンが金相学と熱処理を研究し、熱分析を使用して化学と構造の視点を初めて結び付けた。彼はこの方法によって、焼入れや焼鈍においては、炭素の損失があるのではなくただ状態の変化があることを証明することができた。オスモンの後期の仕事は、精密な熱分析を可能にしたル・シャトリエの熱電対を活用して、鉱山学校とソルボンヌ大学のル・シャトリエとトルーストの実験室で実施された。オスモンは鉄の冷却曲線を測定し、鉄については三つの停滞点があり、鋼については炭素量に従って停滞点の数が変化することを発見し、これらが構造の変化であることを正しく確定した。しかし、全ての焼入れした鋼はベーター鉄で、連続物体すなわち疑似ガラスのような状態であるという間違った推定をした。これは、アメリカのハウや他の人達から直ちに攻撃された。1901年になって初めて、ロバート・オーステンによるほぼ正確な鉄-炭素平衡状態図が明らかにされた。これは相の規則と化学熱力学原理に基礎をおいていた。イギリス人のJ.E.ステッドが、金属の表面にでてきた腐食孔の観察と結晶学の原理を応用して、オスモンの連続物体もしくは疑似ガラス状態という考え方を変更して、ガンマ鉄は立方体であるとの結論を出した。オスモンにより先導されたにもかかわらず、鉄の同素体とその鋼の硬度に関する関係は普遍的に受け入れられなかった。イギリスでは主要な支持者は、ロバート・オーステンであったが、J.O.アーノルドやR.A.ハッドフィールド

ドは賛同しておらず、論争は広範囲にわたって行われた。1912年にフリードリヒとニッピンングにより使用されたX線回折が新しい道具として使用されることになり、金属科学の範囲が拡大され、1913年にブラッグにより決定された格子定数という考え方が金属結晶に導入された。しかし、X線回折が合金組成の研究に応用されて、アルファ、ベーター、ガンマとデルタの鉄の構造が最終的に解決したのは、1922年であった。

4 結び

鉄を製造する技術に関するBC7000年からAD2000年に至る長い開発の歴史を、タイルコート博士の著述した「A History of Metallurgy」をもとにまとめた。博士は、現在の鉄鋼業を支えている製造技術が単一ではなく複雑な道筋を通して、多くの現場での製造作業や技術者、研究者、産業人等の長い間の経験の積み重ねによって今の姿になったことを、明らかにしている。さらに各時代の鉄製造技術が以前の古い技術に土台を置きつつ、新興の技術を取り込みながら発展してきたことも紹介されている。

現在、欧米はじめ日本の鉄鋼業はグローバル化の波の中で再編成が進み、加えて日本の鉄鋼業は中国や新興諸国の追い上げを受けながら新しい動きを始めている。こうした中で鉄鋼業に関連する多くの人達が、エネルギーや環境等に関する新しい課題を解決しながら、産業の基盤を支える鉄鋼技術が絶え間なく発展を続けるよう挑戦する際に、タイルコート博士が紹介した「鉄の歴史」の中から様々な何かを読み取っていただければ幸いである。

参考文献

- 1) R.F.Tylecote : A History of Metallurgy (Second Edition), The Institute of Materials, (1992)

(2003年12月19日受付)