

# 鉄づくりのDNA

## 絶え間ない技術革新で 鉄鉱石を使いこなす

◎ 日本工学会 フェロー 稲角 忠弘氏

人類はそれまで使っていた鉄鉱石が枯渇し始めると、製鉄技術を進化させて、それまで使えなかった未利用の鉄鉱石を活用して、持続的に鉄鋼生産量を伸ばしてきました。こうした鉄鉱石利用と技術革新の歩みについて、日本工学会の稲角忠弘フェローに解説していただきます。

### 時代とともに 利用鉄鉱石は変わってきた

人間にとって役立つ鉄をつくるためには、鉄鉱石に含まれる酸素を炉で除去(還元)し、鉄の純度を高める製鉄技術が欠かせません。古代は鉄鉱石を採掘して製鉄する技術が十分に発達していなかったため、還元しやすく、沼地などで手掘りできる沼鉄しよてつと呼ばれる種類の鉄鉱石の利用から始まり、近世まで製鉄業は地域ごとに地産地消、自給自足を基本としていました。

農工具や武具などへの鉄の需要が各地で増えると、生産能力の向上が促され、炉の高さを高めて高温化することで還元能力を高める製鉄技術の改善と、それまで利用できなかった銑鉄せいてつ※1を使用可能にする鍛冶技術の開発に成功し、14世紀ごろには木炭高炉が開発・実用化されました。それまで還元が難しく未利用だった磁鉄鉱などの鉄鉱石が使えるようになり、生産性が向上し、欧州の大航海時代の需要増に応える技術に発展していきました。

その一方で、急激な生産増により森林枯渇が起これ、高炉は木炭から石炭を蒸し焼きにしたコークスへと燃料を転換し、その結果、火力がより増して高温還元できるようになりました。これによって、ほぼ全種類の鉄鉱石が使用可能になり、さらに生産性は高まりました。なかでもイギリスには、石炭と共に炭酸鉄鉱を産出する炭田が豊富にありました。炭酸鉄鉱は鉄分30%と品位が低く、還元しにくい鉱種ですが、コークス高炉の開発によって本格活用が可能となり、石炭と同時に採掘できるため大きなコストメリットを生み出しました。未利用資源の活用効果でイギリスでは、機械や鉄

※1 銑鉄：高炉で鉄鉱石を還元し、鉄分を取り出したもの。



スウェーデンの農夫炉(原画：スウェーデンボルグ)

古代から中世まで製鉄には沼鉄と木炭が原料となった。左側で鉄鉱石の焙焼が行われ、中央の炉上部から農夫が鉄鉱石を入れている。



出所 ルードウィヒ・ベック著、中沢護人訳『鉄の歴史』(たたら書房)



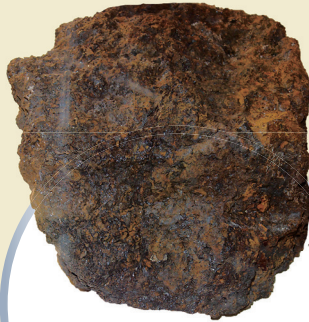
世界初のコークス高炉(イギリスにて稲角忠弘氏)

© 稲角忠弘



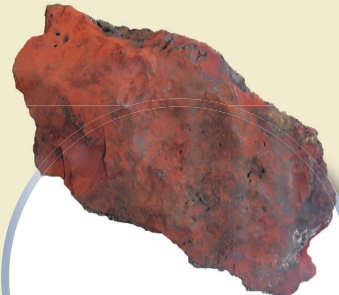
炭質粘土質炭酸鉄鉱  
(スコットランド国立博物館)

© 稲角忠弘



沼鉄鉱  
(スコットランド国立博物館)

© 稲角忠弘



赤鉄鉱  
(スペイン北部の  
ビルバオ鉄鉱床から産出)

© 稲角忠弘

近代製鉄技術はこのように欧州で確立しましたが、それを発展させたのはアメリカでした。19世紀半ば、欧州ではスウェーデンに少量しか産出されない希少な鉱種で、他鉱種に比べて還元しやすく、不純物も少ない縞状鉄鉱層に由来する赤鉄鉱(BIF系鉱石)が、五大湖地方で大量に発見されました。BIF系鉱石はベッセマー転炉に最適で高品質な鉄鋼製品を生み出し、アメリカに鉄道や鉄橋、船、大型建築物、自動車の大量生産をもたらしました。こうしてアメリカは1890年代に欧州を凌駕し、20世紀には世界の鉄鋼業の中心地となりました。

道など鉄の大量需要につながる産業革命が起こり、イギリスの製鉄業は世界をリードしました。高炉で生まれる銑鉄は、炭素分が多く含まれているため強度は高いものの、粘りがなくもろいという弱点があります。もろさの原因となる炭素やリン、硫黄など不純物を効率的に取り除き、銑鉄を炭素含有量の低い軟らかい錬鉄にするパドル炉が発明され、産業革命を加速させました。さらに、ベッセマー転炉(※2)やトーマス転炉(※3)といった製鋼技術が19世紀半ばに開発され、強靱な鋼(※4)の大量生産が可能になりました。ベッセマー転炉には低リンの赤鉄鉱が必要で、イギリスでも産出されていません。しかし著しい鉄鋼需要の伸びに原料供給が追い付かなくなり、欧州他国から輸入してもなお不足するようになりました。一方、トーマス転炉は、欧州大陸の鉄鉱石資源の大半を占めるもののリンが高いため未利用だったミネト鉱の活用を可能にし、欧州の鉄鉱石不足を解消しました。ドイツは積極的にこのミネト鉱の利用を進め、1900年ごろには低リン鉱石が原料のベッセマー転炉にこだわるイギリスを生産量で追い抜きました。

※2 ベッセマー転炉：火を使わず酸素を吹き込み、銑鉄中の不純物を除去する方法。従来法に比べて100倍の反応速度で、一度に大量の鋼を製造できる。

※3 トーマス転炉：ベッセマー転炉の炉壁は、珪石できていたため不純物のリンがどうしても除去できなかった。この欠点を新しい耐火煉瓦の採用によって解消した。

※4 鋼：銑鉄から炭素を下げて不純物を取り除くことで、加工に耐え得る粘りのある強靱な性質を持つ。

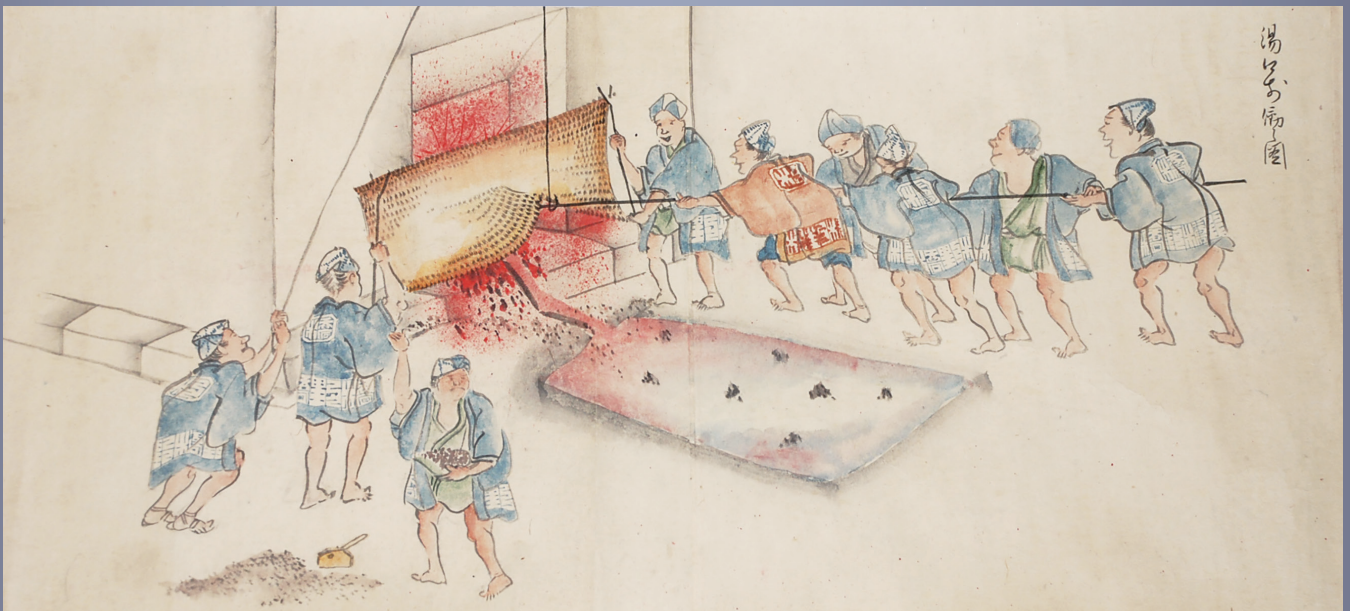


## 還元が難しい磁鉄鉱を使いこなした近代製鉄に挑んだ日本

一方、日本では、どのような歩みをたどってきたのでしょうか。日本の鉄鉱石埋蔵量は数千万トンで、世界全体の数千億トンに比べてあまりにも少なく、鉄鉱石の品質も恵まれていません。しかし恵まれない資源条件に負けず、鉄づくりに積極果敢に取り組んできた歴史があります。

日本の鉄の利用は弥生時代にさかのぼります。まず中国大陸や朝鮮半島から伝来し、古墳時代にご利用が盛んになり、製鉄が始まったとされています。中国大陸や朝鮮半島では塊状の鉄鉱石が豊富でそれを使う製鉄法を導入しましたが、日本には塊鉄石が乏しく、砂鉄を活用するたたら製鉄技術が開発されました。還元しにくい磁鉄鉱を、欧州に先立つ数百年も前の平安時代から使いこなした技術レベルは、世界的にみても高かったといえるでしょう。鉄づくりに対してのハングリーな姿勢は、日本のDNAになったと思われれます。

近世になり、日本の製鉄技術力は欧州に大きく遅れをとりました。イギリスの産業革命によって量産技術が成熟したころ、江戸幕府は開国を迫られ、近代製鉄の威力を痛感しました。こうしたなか、盛岡藩士の大島高任が近代製鉄に挑みました。たたら製鉄の鉄づくりとの一番の違いは原料にあります。塊鉄石の使用経験がなく、非常に硬い岩の磁鉄鉱を塊状に割らなければなりません。そこで採



**橋野高炉での出鉄** 大島高任の指導により釜石・橋野に高炉3基が建設された。釜石地域で最盛期には約3,000人が働き、年間3,000トンの鉄が生産された。



### 餅鉄

釜石・橋野の川原では餅鉄と呼ばれる良質な鉄鉱石が採れた。



### 橋野高炉の種焼場

鉱山などで採掘された鉄鉱石は水車の力で破碎し、種焼窯で焼結し、そのあと金槌で砕いて高炉原料となった。



掘には日本伝統の金銀銅山の採掘技術が、運搬には牛や馬を活用するたたら製鉄のノウハウや経験が活かされました。使用する鉱石については、大島高任自ら翻訳した蘭書から磁鉄鉱に対する西洋の知見を読み取り、日本のたたら製鉄でも必要に応じて行われてきた焙焼技術を適用しました。大島高任はもともと医者を目指して蘭学を学んでいたため、高炉の使用原料は人間と同じく消化の良いものがよくだという医食同源に通じる思想を持っていました。日本の鉱石の特徴をよく理解し、磁鉄鉱を焙焼すると還元しやすくなるという鉱石性状の改善を重視したことが効を奏して、1857(安政4)年に洋式高炉で連続出銑に成功しました。

その後、明治政府は1880(明治13)年に官営釜石製鉄所を開所しました。しかし近代化を急ぐあまり日本の原料事情に疎い技術者に頼った結果、高炉操業は失敗に終わりました。1883(明治16)年に閉鎖されたあと民間の田中長兵衛に払い下げられると、49回目の挑戦で念願の高炉操業を成功させました。この成功には、大島高任が培った焙焼技術が貢献したと言われています。

そして1901(明治34)年に創業した官営八幡製鉄所で高炉操業が軌道に乗ると、本格的に欧米の近代製鉄技術をキャッチアップしていくこととなります。しかし第二次世界大戦直後まで、日本の原料は近隣諸国からの輸入鉱石が主で、鉄鉱石の性状は国内と大きく変わりませんでした。戦争中は鉄鉱石不足を補うため、粉鉱石を焼き固め焼結鉱にして使うことが盛んに行われ、国内の製鉄所では焼結鉱使用率40%と世界的に高いレベルに達しました。当時、焼結鉱の品質は塊鉱石に到底及ばなかったものの、日本固有鉱石を活用する



### 海に築く製鉄所

八幡製鉄所では1956(昭和31)年に海を埋め立て、直線型のレイアウトを持つ一貫製鉄所を戸畑地区に建設。日本の臨海新鋭製鉄所のモデルとなった。

製鉄魂のDNAが発揮されました。実はこの苦勞が戦後の高度経済成長期に花開くこととなります。

### 製鉄所は資源立地から 臨海部の消費地立地へ

日本は第二次世界大戦後、急速に復興を果たしたものの、鉄鋼生産は再び原料制約という壁にぶつかりました。高度経済成長に必要な大量の原料供給を満たすため、豪州やブラジルの大規模なBIF系鉱床の利用に活路を見出しました。

ここで課題となったのが、船舶輸送コストでした。1957(昭和32)年の統計によれば、米英が1800マイル/トンに対して日本は3750マイル/トンで、日本は欧米に比べて海上輸送距離が約2倍、使用鉱石価格が1.3倍で、このハンディを乗り越えなければなりません。輸送コストを低減するため、鉱石専用船化や大型船化、効率配船などが進められました。欧米でも同様の改善が行われましたが、イギリスの港は水深が浅く2万トンの船しか着岸できず、アメリカは五大湖輸送が主体で4万トン台までしか大型化できないなど、港湾条件が優れていませんでした。一方、日本は深い水深の臨海部に製鉄所を建設し、鉱山側と共にインフラを整備し、次々に専用船の大型化とその受け入れに取り組んできました。

鉄鉱石価格が安く輸送コストが高い時代は、遠距離輸送では採算が合わず、製鉄所は20世紀前半まで原料の採掘地に近い資源立地でした。しかし鉄道や船の輸送手段の改革で輸送コストが下がる

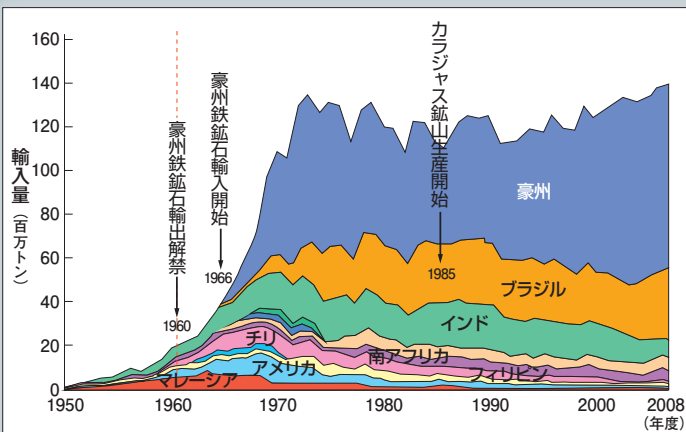


と、長距離でも高品位鉱石による効率生産を行えば、経済性が成り立つという新しい製鉄業のビジネスモデルが生まれました。さらに日本は鉄鉱石の長期購入保証契約方式や、資源会社などと共同出資して鉄鉱山を開発する工夫をした結果、豪州やブラジルに眠っていた高品質な鉄鉱石を確保することに成功しました。

## 日本の焼結技術が開き世界をリード

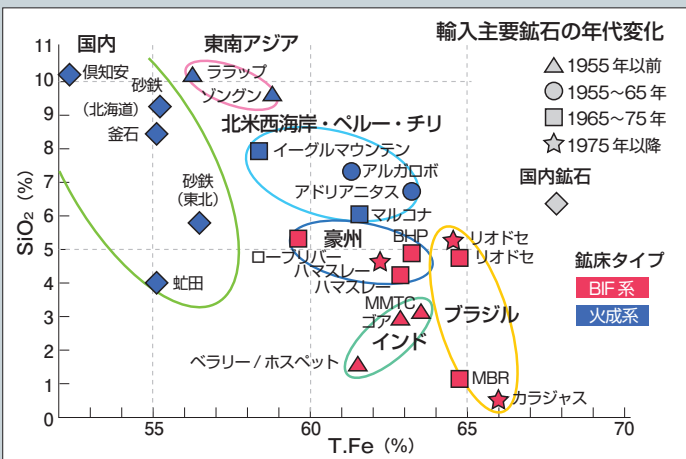
日本は同時に原料コストの低減で、もうひとつ工夫しました。未利用の粉鉱石の本格活用です。製鉄原料は中世以来、クルミ大の塊鉱石が使われてきました。粉鉱石は一部混ぜて使用するのが限界で、十分に利用されないまま放置されていました。粉鉱石を焼き固めた焼結鉱は、強度を高めると被還元性が低下するという課題がありました。1950年ごろ、強度と被還元性を両立させる画期的な技術である自溶性焼結技術がスウェーデンで開発されました。しかし各国の鉱石に応用しても、その効果を明確にすることができませんでした。

こうしたなか1958(昭和33)年、住友金属工業小倉製鉄所(現在の新日鉄住金八幡製鉄所)で、自溶性焼結技術の実用化に成功しました。ポイントは低シリカ高鉄分赤鉄鉱の使用にありました。高シリカのミネト鉱などが主体の欧米では効果



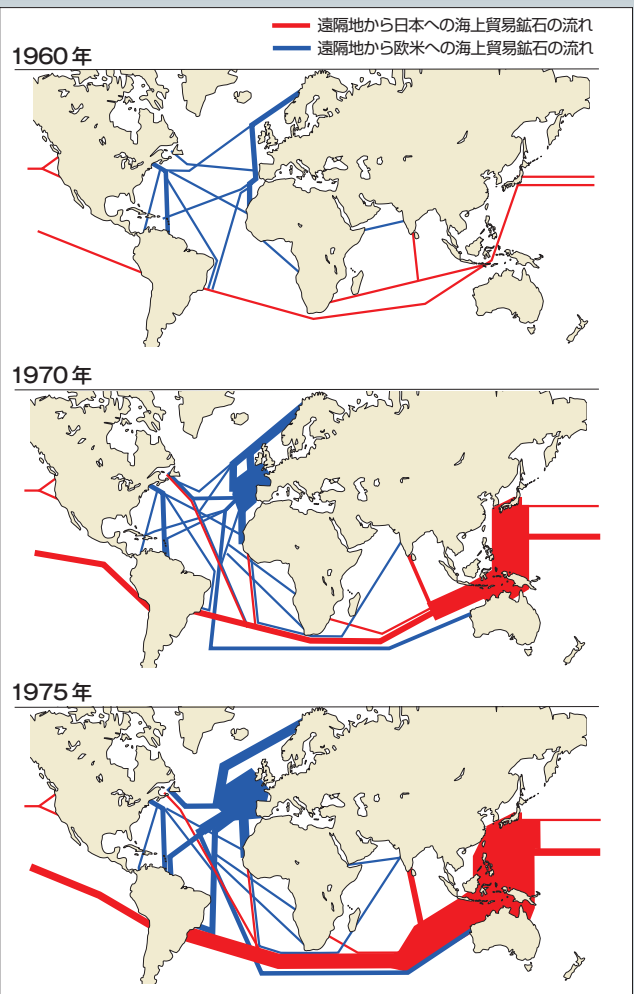
日本の鉄鉱石輸入量と輸入先の推移

高度経済成長期に豪州やブラジルの遠隔地からの鉄鉱石が急激に拡大した。



輸入鉄鉱石との成分の違い

第二次世界大戦後、日本の使用鉄石は火成鉄床系の日本およびその近辺から、豪州やブラジルなどのBIF(綫状鉄鉱層)系鉄石に切り替わり、鉄品位が高まった。



鉄鉱石の海上貿易量の変化

20世紀後半、日本は臨海製鉄所を建設し、鉄鉱石利用の距離のハンディを乗り越え、海上鉄石貿易量は急激に拡大した。



をあげにくかったのですが、豪州やブラジルの低シリカ高鉄分赤鉄鉱のBIF系鉱石には最適で、その使用量が増すにつれて威力を発揮しました。自溶性焼結鉱は性状をつくり込むため、天然の鉄鉱石よりも高炉操作が安定化し、コークスの使用量も少なくてすむ画期的な効果をもたらしました。

20世紀後半、世界の鉄鋼業をリードしてきたイギリス、ドイツ、アメリカで高炉原料である塊鉱石の供給限界が露呈し、鉱石価格が高騰し始めていました。日本は粉鉱石をフル活用できる自溶性焼結鉱を主体とした製鉄技術確立したこと、世界の鉄鋼生産拡大の制約要因となつて、塊鉱石不足を緩和させました。そして、粉鉱石の活用は鉄鉱山の採掘効率を高め、採掘コストを低減させ、鉄鉱石価格の安定化にも寄与しました。

新たな原料供給方式と原料活用技術によつて、日本は資源小国でありながら奇跡的にアメリカを凌駕する国際競争力を勝ち取り、世界最高水準の鉄づくりを実現できるようになりまし

た。世界で使えないと思われていた鉱種を使

えるようにする原料利用の工夫は、現在も日本の鉄づくりのDNAとして脈々と引き

継がれています。



## 石ころを

### 鉄鉱石資源に変えるのは腕次第

天然資源は掘ればなくなりません。枯渇が近づくと鉄鉱石価格は値上がりします。そして原料供給の面から次第に鉄鋼生産の拡大が制約を受けます。しかし歴史を振り返ると、従来の技術では利用が困難である一方で、資源量が多く廉価な未利用鉱石を使える製鉄技術をその都度開発することによって、鉄鋼製品は安価で安定的に供給され続け、社会全般により広く使われてきました。各時代の製法に適した鉱種鉱石の供給が窮迫すると、そのたびに技術革新によつて未利用で資源規模の大きい鉱種への転換を図り、乗り越えてきたのです。

私たちは鉄にできる石を鉄鉱石資源と呼んでいます。どんなに鉄分が高くても製鉄できなければ、鉄鉱石資源とはなりません。これは製鉄技術的に使えないことを意味するだけでなく、経済的に採掘や運搬できないものも含まれます。逆に低品位でも経済的に製鉄できれば鉄鉱石資源になります。鉄づくりをする者の力量が、石ころであるか、鉄鉱石資源であるかを大きく左右するのです。

世界の旺盛な鉄鋼製品需要にこたえていくためには、今後も現在の技術では製鉄困難であるものの、資源量が多く供給安定性のある未利用鉱石を活用できるかが大きな課題となります。資源小国の日本は、これまで緻密で効率的な製鉄技術を生み出し、誰も鉄鉱石と思っていなかった鉱石を使いこなしてきました。その匠の力や技術開発マインドが、来るべき資源問題を解決し、これからも世界の鉄鋼業のさらなる発展に大きく貢献していくものと期待を寄せています。