

製鉄原料展望-1

製鉄原料と原料利用技術の変遷と展望

Review and Prospect of Technologies Utilizing Iron Ore Resources for Iron and Steel Production

稲角忠弘
Tadahiro Inazumi

新日本製鐵(株) 製鉄技術部 嘱託
東京大学 総合研究博物館
研究・事業協力者

1 はじめに

近年の中国鉄鋼生産の急拡大とインド、ブラジルの生産増は、従来の先進工業国中心の鉄鋼生産が汎地球的に広がる新時代の波を感じさせ、地球の資源枯渇問題・環境問題が懸念される。ところで、「歴史は繰り返す」の譬ではないが、鉄鋼生産の歴史を振り返ると幾度か原料不足を経験している。そして、原料供給に困窮してくると製鉄法革新がその都度され、製鉄し易い鉱石から、利用し難くて眠っていた資源規模の大きな未利用鉱種を活用する製鉄法が開発され、革新の連鎖によって世界の鉄鋼生産は持続的に拡大してきた¹⁾。本報はこのような原料需給困難に直面した時の製鉄革新に焦点をあて、原料の製鉄への影響について検討する。

2 鉄鉱石の産状

2.1 鉄鉱石、鉱床の種類と特徴

本題にはいる前に、鉄鉱石の鉱種や産状とその差を左右する鉱床成因や地域偏在性など鉄鉱石特有の資源特質を検討する。鉄は地殻構成の化学組成では4番目に多いが、鉱石としてこれほど高品位で大規模・豊富に産出する金属元素は他にない。かつ規模・品位を問わなければ鉱床は世界中に万遍なく分布している。その理由は、非鉄金属鉱石の殆どがマグマ由来なのに対し、鉄鉱石は水中鉄イオンの化学沈殿による堆積鉱床が多いためと考えられる(表1)。2価の鉄イオンは水への溶解度が高く逆に3価鉄イオンの溶解度は桁ちがいに低いため、2価鉄は水へ溶解して流水拡散し、その鉄溶解水が酸性化箇所にと達すると集中的に沈殿堆積する特性がある。この鉄イオンの2価3価差は温度、pH、酸化還元電位Ehなどに左右されるので、地球誕生以来の気圏水圏の環境変化に応じ海底や湖沼河川に大小さまざまな鉱床が生成してきた。実際の堆積鉱床の形成は、鉄供給源の種類や規模、

水質や堆積環境、堆積場の地形などに左右される。大雑把にいうと、堆積場は地質年代が若くなるとともに海(大陸棚、沿岸)、湖、沼へとほぼ順に移行してきており、鉱床規模・品位もその順で劣る傾向がみられる。

堆積規模の一番大きいのは、原生代の主に27～19億年前の海底に、「赤鉄鉱(または磁鉄鉱)とシリカ(または炭酸塩、珪酸塩)とが繰り返して互層状に堆積した縞状鉄鉱層BIF(Banded Iron Formation)」で、鉄分30%前後のものが全世界で400兆t堆積したともいわれる。その内数兆tが後世に隆起・陸化し、現在でも原岩に近い状態で存在しているものが多い。そして、このBIFの一部は後世に天水(雨水・地下水)や熱水(変成)の作用を受け鉄分60%以上にまで富化し、低燐・低硫黄の高純度赤鉄鉱鉱床になった(埋蔵量数百億t)。富化途中にとどまった赤鉄鉱・褐鉄鉱複合の準高品位鉱石鉱床も種々存在し、鉱量はさらに多い。またBIF原岩の鉄分が溶解・流出し、河川に2次的に堆積した中規模のピソライト状褐鉄鉱鉱床もある。BIF系鉱石(本文ではBIF由来の鉄鉱石を以下こう呼ぶ)は他の鉱種に比べ一般に還元し易く、不純分の少ない優れた鉱種で、鉱床規模が大きいことから19世紀末の米国での本格活用以来現代に至るまで鉄鋼大生産を支える主原料となった(表1、2、図1)。BIF系鉱床は旧大陸盾状地に生成が限定され、地域偏在が強い。欧州に

表1 鉄鉱床のタイプ別にみた鉱石最高鉄品位と最大鉱床規模¹⁾

鉱床タイプ	鉄鉱石原鉱鉄品位			
	特級 Fe>66%	高品位 Fe65~63%	準高品位 Fe63~58%	普通品位 Fe~50%~
堆積鉱床	BIF系 中鉱床*	大鉱床	大鉱床	超大鉱床
	同2次堆積 ミナト			中鉱床
	炭層共生 沼鉄鉱			中鉱床
				小鉱床
火成鉱床	正岩漿 接触交代 熱水		大鉱床	中鉱床
			小鉱床	小鉱床
風化残留鉱床				小鉱床

鉱床規模:小鉱床<1億t、中鉱床1~10億t、大鉱床10~100億t、超大鉱床>100億t
[註]* BIF系特級鉄鉱床は中規模以下が殆どだが、例外的に180億tのカラジャス鉱床がある

は北欧に少量産出するだけで近代鉄鋼業がこの鉱種を使わないで発展したことが注目される。また日本など地質年代の若い造山帯にはBIF系鉱床は存在しないというハンデがある。BIF系鉱床間でも鉱石品位に地域差があり、高品位鉱石は一部しかなく原岩組成に近い低品位鉱が主体の米国、中国などの北半球北部の鉱石自国消費群と、高品位鉱を産出し自国消費よりも輸出主体の豪州、ブラジル、インド、南アなどの赤道帯近辺の鉱石輸出国群とに分かれ、鉄分富化の程度が妙にほぼ緯度で分かれる。また高炉操業へ影響が大きい Al_2O_3 成分や結晶水含有率などの地域差も大きく、大西洋系北・南米鉱石は総じて含有量は低く、豪州・インドのインド洋系鉱石は高い。

BIF系鉱石に次いで規模の大きい堆積鉱床が古生代・中世代地層に生成した(表1)。ジュラ紀前後に生成したミネット鉱床は河川に流出した鉄分や砂礫が河口の海岸沿いに沈積した。ミネット鉱石は石灰質または珪酸鉄質を基質とした魚卵状褐鉄鉱組織を特徴とし、Pは1%前後と高目でスラグ成分が多く鉄分は30%前後と低いが、比較的還元・溶解し易い。高磷溶鉄の精錬可能なトーマス製鋼法の開発により19世紀後半から20世紀前半にかけて欧州の使用主原料となった(表2、図1)。中規模鉱床として古生代石炭層中に炭質鉄鉱層があり、石炭まじりの比較的還元し難い菱鉄鉱を産出する。英国の産業革命期の主原料となった(表2、図1)し、中国でも

古くから使われた。

さらに小規模堆積鉱床に沼鉄鉱と呼ばれる褐鉄鉱鉱床が全世界に生成し、特に氷河地区に発達している。沼鉄鉱は一般に構成成分が高く粘土を含むが、ところにより高純度褐鉄鉱を産出する。古来、製鉄の主原料となった(表1、2、図1)。また火山地帯には火山岩由来の低品位沼鉄鉱鉱床が小規模に生成していて、泥鉄鉱とも呼ばれ、日本でも戦中戦後に使われた^{1,6)}。以上、一口に堆積鉱床と言っても鉱床規模、品位・純度がピンからきりまで存在する。

一方、マグマの上昇・分化・冷却過程で鉄鉱物が晶出してきたのが火成鉱床である。鉄元素はマグマ中では殆どが珪酸質融液に2価鉄イオンとして溶け込んでおり、地表に近づくにつれ酸化されて3価鉄イオンが増すと鉄溶解度が低下し磁鉄鉱、赤鉄鉱として晶出する傾向がある。水への溶解度と似たこの地球化学的特性が火成鉱床においても非鉄金属に比べ鉱床が高品位で大型になる原因と考えられる。また、火成鉱床も堆積鉱床同様地質年代が古いほど鉱床規模が大きくなる傾向がみられ、比較的大きいIOCG鉱床(Iron-Oxide Copper-Gold Deposit)は主に原生代の火成活動に由来している。火成鉱床には、地球深部でマグマから鉄分が直接磁鉄鉱として離溶・沈積した正岩漿性鉱床や中間的深所で石灰石と接触して磁鉄鉱が生成した接触交代鉱床、そして地表近くで生成した赤鉄鉱や菱鉄鉱などの熱水鉱床がある。正岩漿性鉱床には十億t台規模のものもあるが、地表に近づくほど鉱床生成温度は下がり、鉱床規模は小さくなる傾向がある(表1)。接触交代鉱床や熱水鉱床は、総じて生成範囲は局地的で規模は限られ、同時に鉱石はマグマ由来なので硫化鉱物、非鉄金属成分や岩石成分を含み、品位・純度も一般に良くない。しかし、火成鉱床でも一部には純度が高い鉱石を産出し、石灰石の熱水変成作用で生成したビルバオ型鉱床などの低磷赤鉄鉱・褐鉄鉱鉱石は古代中世の自然銅やベッセマー転炉用溶鉄の主原料となった(表2)。

鉄鉱床にはこの他、岩石風化時に脈石類が流失し比重差で含鉄鉱物が残留した漂砂(残留)鉱床がある。砂鉄や粒状赤鉄鉱、ラテライト等を産出する。砂鉄は周知のように日本古来のたたら製鉄の原料となった。

上記の全鉱床タイプの露頭部や地表近くの鉱石層は風化を受け、鉱床タイプや産出鉱石の鉱種によらず通常褐鉄鉱(一部は赤鉄鉱)に変成しており、歴史的には一番古くから採掘・製鉄の対象鉱石となった(図1、表2)。

以上のように産出鉱石の鉱種や産状は、鉱床タイプの差が大きく影響する(表1)。そしてさらにその鉱床タイプを左右するのは地質や地質年代で、それらの地域差が大きいので世界の鉄鉱石資源の量、質や鉱種の地域偏在性を起こしている。この鉄鉱石鉱種の地域偏在性を念頭において、原料の製鉄に

表2 製鉄法革新時にともなう主使用鉱石の鉱種変化

時代	製鉄法			使用鉱石鉱種	製鉄炉 日産能力
	製錬法	精錬法			
古代中世	半溶融鉄	レン炉	錬鉄	自然銅、鍛鉄	数十kg
中世	融鉄	スティック炉	鍛鉄	同上	数百kg
中世末		木炭高炉	鍛鉄	同上	数t
18世紀	溶鉄	コークス高炉	ハートル炉	炭質菱鉄鉱+同上	数十t
19世紀		コークス高炉	溶鉄	ベッセマー炉	数十t
19世紀		コークス高炉	トーマス炉	粘土質菱鉄鉱、高磷磁鉄鉱	数百t
19世紀		コークス高炉	平炉	全鉱種可(BIF系赤鉄鉱有利)	数千t
20世紀		コークス高炉	LD転炉	全鉱種可(BIF系赤鉄鉱有利)	1万t台

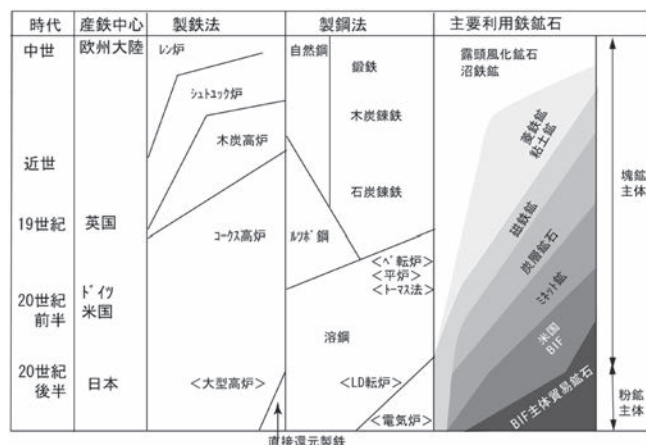


図1 世界の製鉄事情、製鉄技術の歴史的变化と利用鉱石鉱種の変化

与える影響について以下に検討する。

3 欧米の製鉄発展過程における 鉱石利用の変化

3.1 欧州における中世の鉄鉱石の使われ方²⁾

まずは近代製鉄発祥地欧州でどのような鉱石がどのように使われてきたかを時代順に検討する。古代から中世にかけての製鉄炉はレン炉（ボウル型炉）やシュトゥック炉（竪型炉）で、海綿状半溶融鉄（ルッペ鉄）を製造した。製鉄は、鉄鉱石が採掘でき木炭が作れるところであればあらゆる所で試みられた。昔は手堀なので、露頭や表層近くの比較的柔らかい風化鉱石や沼鉄鉱が使われた。16世紀頃迄は鋼と鉄の作りわけはなく、鉱石の性質と操業の偶然によって、製品が硬質の鋼（自然鋼）やあるいは軟質の鍛鉄になった。中世、鉄は地産地消が基本であったが、欧州数箇所の特産品であるこの自然鋼は交易され、18世紀にイギリスでルツボ鋼が発明されるまで高級鋼市場を独占し続けた。使用鉱石は鋼鉱石と呼ばれ低燐で少量のCaOやMnを含み、還元・溶解が容易なビルバオ型鉱石などである¹⁾。ローマ時代の鉱種の選択が近代まで通用し普通の鉱石からでは鋼が製造できなかったのは、製鉄技術が未熟な中世では鉱種差が製品の品質を決定的なものにしていたことを窺わせる。時代とともに鉄需要が高まり、比較的還元滞留時間が長くとれ高温にできるシュトゥック炉は難還元鉱石や低品位鉱石が活用できることによりレン炉よりコスト高になるが次第に比重が増した。さらに中世末に水車輪の発明により通風が強化され生産力が高められ、またルッペ副産物の銑鉄が錬鉄鍛冶や鋳物利用技術の進歩により用途も拓け、劣質難還元鉱石の産出地域にまで製鉄が広がっていった。

3.2 近世代高炉発展段階の原料利用事情^{2,4)}

木炭高炉は、シュテイク炉の延長発展技術として、中世製鉄中心地のひとつのライン流域において発明されたにかかわらず、むしろイギリスなどの後発製鉄地に普及発展していったことが注目される。イギリス南部には森林があり、ローマ時代にも使われた赤鉄鉱・褐鉄鉱を産出した。同国は16世紀当時むしろ鉄生産小国であったが、ハンザ商館の追放、スペイン艦隊撃破などにより植民地貿易用などの鉄需要が高まり木炭高炉の生産を急増させていった。しかしその一方で木炭は欠乏するし、高純度鉱石、大森林および低賃金労働力に恵まれたスウェーデンなどからの鉄輸入が増加し^{4,6)}、国内増産が切実な課題となった。増産を可能にする新製鉄法として、欧州で最も豊かな石炭資源をもつ同国は木炭から石炭への転換が技術開発目標となる。そして、遂に19

世紀前半デービス父子によるコークス高炉の開発に成功し、さらに1785年の木炭精錬法に変わる石炭活用錬鉄（低C鋼）製造法であるパドル法が発明される。加えて、石炭層に沿って石炭混じりの菱鉄鉱石（埋蔵量10数億t⁷⁾）があり、石炭利用を可能とする製鉄法の実用化はこれら未利用の大鉄源を活用できることになった。こうして19世紀に同国の製鉄を圧倒的優位にした。この原因は種々考えられるが、膨れ上がる鉄鋼需要に自国の未利用資源活用を可能とする新製鉄法を自助自力で技術開発したことが大きい。同時に、興味深いことは、製鉄法改革とともに国内の製鉄中心地が変遷していることである（図2）。コークス高炉の本格化と水車から蒸気機関送風方式への転換により、製鉄中心地は森林立地から石炭立地に変わり南部から中部に移動した。さらに、従来の冷風高炉では使用が難しかったブラックバンド（石炭混りの低品位菱鉄鉱石）やスプリント炭（烈炭）⁵⁾の高炉直接使用を可能にする熱風炉が発明（1830年）され、同鉱種が豊富に産出し、発明地かつ後発地であるスコットランドが一躍製鉄中心地になった。その後、炭質鉱石資源だけでは鉄需要に答えられなくなった1850年代になり、従来鉄鉱石とみなされていなかったミネット鉱石が発見・活用され、主産地のクリーブランド地方に鉄鋼都市が誕生した。このように製鉄革新による生産拡大は、結果的には未利用資源活用が最適な場所へ製鉄中心地を逐次変遷させることが注目される。



図2 イギリス鉄鋼生産拡大期にみられた製鉄中心地変遷の推移¹⁾

3.3 溶鋼時代の幕開けと使用原料^{2,3,6)}

イギリスはさらにルツボ鋼を発明(1784年)し、中世以来の欧州大陸産自然鋼の独占供給からの絛縛を解き、特許で防御した高級鋼の自給ができて産業力を高めた。しかし、同国の9割を占める高燐鉱石でつくられる高炉溶鉄からの精錬材(鍊鉄)は高級鋼用素材にできず、ルツボ鋼原料となる低燐棒鉄はスウェーデンなどからの輸入に頼る生産基盤の脆さがあった。またルツボ炉の生産性も低く、多量生産が可能な溶鉄から鋼を製造する溶鋼精錬法「ベッセマー法」が発明(1853年)され、鋼量産の途が拓かれた。ベッセマー法は低P低S高Siの溶鉄を必要とし、その溶鉄製造に適合した鉱種は限られた。イギリスにはカンバーランドなどに低燐赤鉄鉱石があり、これを最大限に活かした。廉価で均質な鋼の供給は新製品新用途をうみ、需要は急速に拡大していった。一方、生産急増で国産低燐鉱石が不足し、スペインやスウェーデンなどから今度は低燐棒鉄でなく低燐鉱石の輸入に頼らざるを得なくなった。需要にこたえるには豊富な未利用高燐鉱石を活用する新製鋼法がもめられ、ベッセマー法(空気燃焼熱による製鋼)とそれを補完する平炉法(空気を熱風に替え効率化)に続き、高燐鉱が使えるトーマス法(溶鉄中C、Si燃焼熱に加えPの燃焼熱で効率化)が続いてイギリスで開発され、19世紀末には年産3千数百万tもの鋼量産が可能になった(図3)。しかし、トーマス法への転換に製鉄後発国で欧州の中では石炭以外に鉄鉱石資源に恵まれないドイツにイギリスが遅れをとった。ドイツはたまたま普仏戦争で手にしたフランス国境の未活用のミネット鉱床がこの新技術で活かしたなどの理由もあるが、低Si高燐鉄が必要なトーマス法に適した石灰質高燐鉄が欧州大陸に大量にあり中燐珪酸質鉄石のイギリスとの産出鉄石の特性の差の影響が大きかった³⁾。

イギリスの鉄鋼生産絶対優位へのキャッチアップは、アメリカにも起った(表2)。アメリカは資源が豊かながイギリスの巧みな政治統御で独立戦争後も鉄鋼輸入国であった。しか

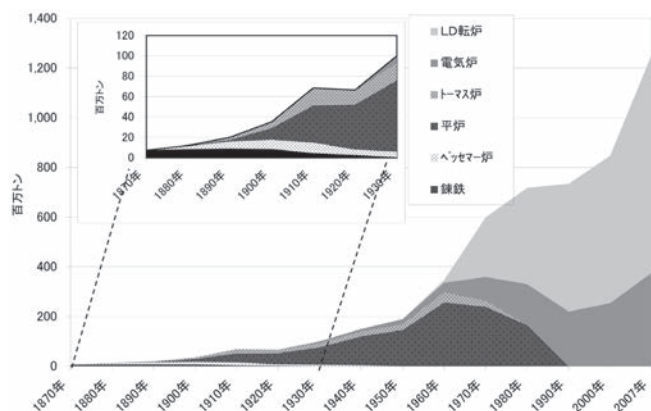
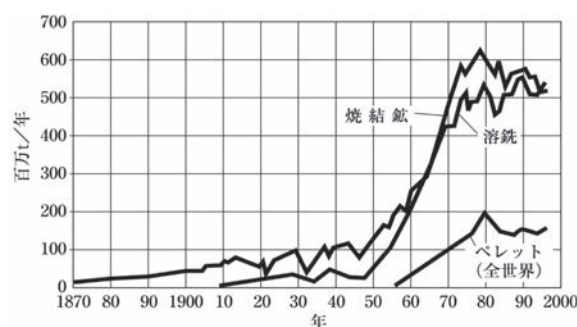


図3 製鋼法革新の連鎖による世界の粗鋼生産拡大の経緯

し19世紀後半に五大湖地方に膨大なBIF系の赤鉄鉱鉱床が発見され、これが本格活用されていく20世紀には欧州は太刀打ちできなくなった。ベッセマー鉄、平炉鉄製造に最適なこのBIF系塊鉄石は鉄分が高く低スラグ・低燐・低硫黄で純度が良く、赤鉄鉱で還元し易く、鉱床規模が大きいという特長があり、高炉、平・転炉の効率化・大型化ができ、鉄鋼加工の大型機械化と近代的工程管理法による量産化が進み20世紀前半世界をリードした^{10,11)}。欧州で開発された技術を製鉄後発の新生国が新鉄種を活かし西部開拓等の国内需要に結びつけ飛躍的に生産を拡大させ、新製鉄中心地となったこの事例も鉄種の地域偏在がもたらす地政学的優位が競争力を与えたとみることができる。

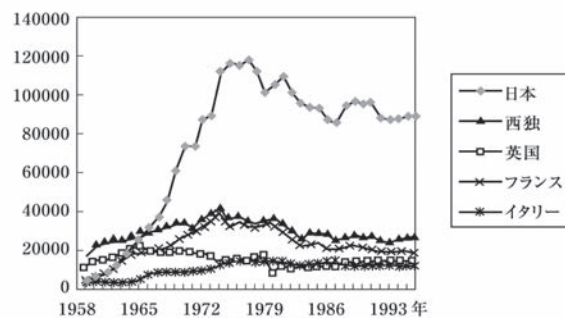
4 20世紀塊成鉄技術の開発による塊鉄石供給ネックの克服

中世末に開発された高炉は19世紀までずっと塊鉄石を主原料にしてきた。しかし拡大一方の世界の鉄鋼生産に塊鉄石供給が追いつかなくなり始めていた20世紀後半に、それ迄の塊鉄石主体から粉鉄石主体製鉄法への転換技術が開発され、これによって世界の鉄石供給力が増し製鉄生産制約が解消し、20世紀の生産拡大を可能にした(図4a)。



(図4a) 世界の溶鉄、焼結鉄およびペレットの生産量推移(原図:F.Cappel)

生産量(千t/年)



(図4b) 日本と欧州の焼結鉄生産量の推移(出所:UNCTAD資料、鉄鋼統計要覧)

図4 焼結鉄、ペレットの製造本格化による世界の鉄鋼製造量拡大推移⁹⁾
(a) 世界の溶鉄、焼結鉄およびペレットの生産量推移
(b) 日本と欧州の焼結鉄生産量推移

粉鉱石を活用する塊成鉱技術は、ペレット法を米国が、自溶性焼結法を日本がそれぞれ世界を先導した。

4.1 アメリカのペレット実用化

20 世紀初頭に欧州を凌駕したアメリカが使用した主原料は、BIF 層内にポケット状にあった赤鉄鉱の高品位塊鉱石だった。これを第二次世界大戦でほぼ使い果たしたが地域経済対策や冷戦の安全保障対策を含め生産維持につとめ、当地区に残された未利用で膨大な低品位タコナイト (BIF 原岩に近い鉄分約 30% の石) を微粉碎・選鉱しペレットにして高炉で使える技術が確立された。ペレット製造コストは焼結鉱より割高であるものの、塊鉱石よりも還元し易くスラグ量が減り鉄製造コストが下がり、総合コストは改善された。ペレットは焼結原料に適さない微粉鉱石が活用可能な塊成鉱技術であり、焼結法を主体とする世界の高炉操業を補完する役割を果たしている。さらに直接還元用原料にも発展的に使用され、今日の全世界約 4 億 t 規模の生産へと拡大した。

4.2 戦後日本の原料確保と焼結鉱主体高炉操業^{8,9)}

日本は 20 世紀後半、資源小国ながら、溶鋼法として史上 4 番目の革新技術である LD 転炉製鋼法 (酸素による高速精錬法) を活用、発展させ、欧米以外の国で初の世界の製鉄リード国になった (表 2、図 1)。LD 法は欧州開発技術だが、高品質溶銑を大量・廉価に供給可能とする製鉄方式によりその真価を発揮させた。新方式は、遠隔地僻地の未利用・大規模な高品位・高純度 BIF 系の貿易鉱石を活用したことと¹⁾ (図 5)、もうひとつは中世以来の塊鉱石主体の高炉操業法を粉鉱石主体とする「自溶性焼結鉱多量使用の高効率高炉操業法」⁹⁾へ転換する高炉原料の革新によった。古来鉄鉱石のような重量物は運搬の経済性が問題で製鉄所は鉱山近辺に立地し、20 世

紀前半まで資源立地型製鉄所が主流であった。日本も国内および近辺の鉱石を使い戦後復興したが、もともと火山帯地域にあり鉱山規模は年産数十万 t 以下が殆どで、高度成長期の鉄鋼需要が必要とする大量の原料供給は難しいという宿命にあった。それを、遠距離ソースで経済的な利用が難しいとみなされていた豪州などの大規模鉱山を開発し、大型専用船などの輸送方式の工夫により貿易鉱石主体の製鉄方式の経済性を成り立たせた。その鉱石の鉱種は BIF 系鉱石でアメリカより高品位であったのが幸運であった (図 6a)。さらに日本の工夫はペレットより安い焼結法の実用化で十分に利用できずにいた粉鉱石をフル活用できたことで、塊鉱石不足を緩和させただけでなく、粉鉱石活用による山元の採掘効率・生産歩留を改善して山元コストを低減させ、鉄鉱石価格の安定化に寄与した。同時に焼結では石灰石添加などで人工的に高炉原料の冶金性状を制御し高炉操業を改善するという製錬効率化の新途を拓いた。実際、自溶性焼結鉱多量使用の高炉操業

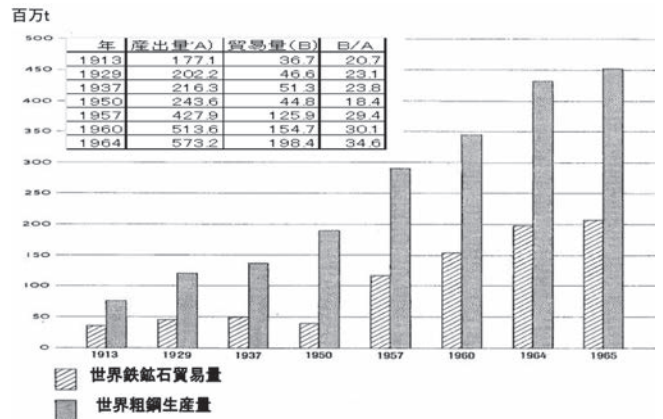
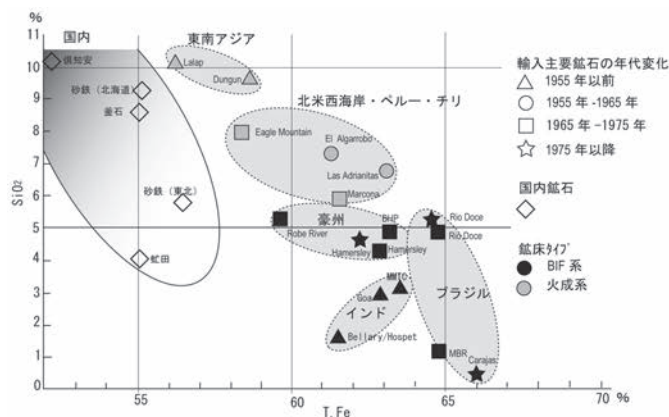
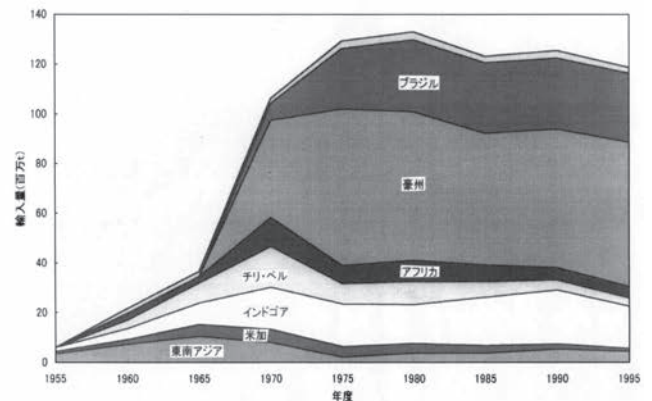


図 5 20 世紀後半の資源立地製鉄方式から貿易鉱石方式主流への転換状況 (出所: UNITED NATION, Dep. of Economic & Social Affairs, 1955)



(a) 日本使用鉱石の変化実績でみた火成鉄床鉱石と BIF 系鉄石の鉄石品位比較



(b) 日本の輸入鉄石供給先の変化

図 6 日本の 20 世紀後半の使用鉄石の変化⁹⁾

は天然鉱石使用時より安定し、高炉の還元材比、出鉄比が改善し、高価な輸入石炭の節減ばかりでなく、出鉄増して高価な高炉の建設費を節減する画期的な効果を齎した⁸⁾。

日本の洋式製鉄は当初から原料がネックとなり第二次世界大戦で挫折するが、戦後科学技術立国政策を基本に据え、鉄鋼対策技術委員会は「製鉄は一貫製鉄方式を基本として、原料対策では欧米とは異なる独自技術が必要で、今後は焼結鉱を充分活用すべき」と欧米に追随しない対策を提議している。この国民的悲願が数十年後の今日自溶性焼結鉱多量使用方式でほぼ現実となったのは奇跡的な感じがする。戦時中鉄鉱石不足から焼結鉱をやむなく使い続けてきた資源小国・製鉄後発国のハングリーが結実した成果とも考えられる。自溶性焼結鉱技術はもともとスウェーデンの開発技術だが他国の鉱石では成果が明確でなかったのを、住友金属工業が強度と被還元性をバランスさせる工夫をし、小倉製鉄所で100%高炉使用実験を行った結果、大きな改善効果が認められたことがその契機になった。ミネソタ鉱石主体の欧州が焼結経験のない高品位赤鉄鉱(図6)を原料とした自溶性焼結鉱の品質が予想以上の高炉操業改善・高品質溶鉄製造につながったことで力を得た(図4b)。折しも、高度成長期の新製鉄所建設ブームにあった日本では、溶鉄を多量に必要とし、格段に生産性の高い転炉を活用し高品質鋼の大量一貫生産が確立し、アメリカの平炉主体や欧州のトーマス転炉を凌ぎ、国際競争力を一挙に高めた。以降、この原料供給新方式と原料活用技術の重合効果で、資源立地型製鉄方式が貿易鉱石主流に変わり、臨海一貫大型製鉄所方式が「世界の基本スタイル」となり今日に至っている。高品質自溶性焼結鉱主体の高炉操業確立が世界に与えた歴史的意味は日本人の想像以上に大きいと思う。BIF系鉱石の埋蔵量は膨大だが、新製鉄所の建設にあわせ新鉱山を開発し需給バランスをとり、さらに褐鉄鉱系準高品位鉱石の使用拡大で鉱量延命に努め約30年間世界の需給は安定してきた。しかし中国の鉱石輸入が急拡大し、世界の需給が混乱し鉄鉱石価格が高騰した。

なお、旧ソ連は、焼結技術の導入が日本より早く、ウクライナのBIF系低品位鉱石などを活用しアメリカを追随し一時世界一になったが計画経済での生産拡大で鉄のカーテン内の詳細はよくわからず検討を割愛した。

5 製鉄史の示す原料の製鉄への影響

以上、人類がさまざまな鉄鉱石鉱種を活かして鉄鋼生産を発展させてきた系譜を辿った。世界の鉄鋼生産量は16世紀の数万tから今日の13億tまで級数的に拡大してきたが、それを可能にしてきたのは製鉄法の数次の革新に拠っている。鉄生産量が増していくと最終的には使用原料の供給力に限界

が顕れてきて、そのような節目時機になると従来製鉄法より生産能力の高い製鉄法がいくつか芽生え、より鉱量の多い従前には使用が困難であったり、鉄鉱石扱いされていなかった未利用新鉱種が活用できる新法が勝ち進むパターンをとってきている。天然原料は使えなくなると再生産されない性格のものだから、時代とともに違った鉱種の使用を図って鉄鋼生産を発展させなければならず、それが宿命とすれば、必然的にこのような生産拡大パターンになると考えられる。たまたま地球上の鉄鉱石鉱種は地域偏在性が強いことが効果してこの発展パターンを支える要因となってきた。そしてまた、革新の主役となるのは既往の鉄主産国でなく、それまで鉄不足と輸入過多に喘いでいた製鉄小国が新鉱種利用に最適な立地条件を活かし新法を戦力化したことが活力となっている。結果としてこの間歇的な生産革新が発展のバネとなり、その連鎖で世界全体の鉄供給量が長期にわたり伸びる一方の需要に持続的に応えてきた経緯が窺える。歴史は、また、生産飛躍を果たす革新技術の開発国が必ずしもその国で活かしていないことを示している。現代技術の殆どがイギリスの発明にかかわらず、その後ドイツ、アメリカで活かされ、欧州発明のLD転炉も日本で活かされたことから、製鉄競争力には資源の地政学的条件が強く影響していることが推察される。

6 残された資源と近年の資源対応動向

残された鉄鉱石の全体像の考察に米国のスキナー博士の「鉄品位と鉱石量の関係は正規分布をし、鉱石の品位が低下するほど埋蔵量は逆に級数的に多くなる関係がある」という仮説が参考になる¹⁾。この仮説は現在の世界の採掘鉱石の実績と傾向はほぼ合っている¹⁾。これを正とすれば、鉄鉱石資源問題は量の枯渇問題ではなく、鉄品位劣化や鉱床規模縮小などによる利用コスト高の問題であると認識される。世界の現在の海上貿易鉄鉱石の低品位化劣質化傾向が明確になってきている今日、対応の先例的取り組みが既に現れている¹⁾。スウェーデンは欧州一の鉱石資源を背景に、製鉄史の上では中世以来鉱石価値を高め輸出競争力の維持に挑戦し続けている貿易立国で、日本の自溶性焼結鉱技術のルーツもこのスウェーデンである。高品位鉱石の輸出がLD転炉普及で輸出が立ち行かなくなった時は処理コストはかかるが選鉱して脱燐し、スラグ量を画期的に低減したペレットや直接還元用の超高品質ペレットを開発し、炭酸ガス低減の高競争力をもった高付加価値ペレットを商品化し復活している。これと対照的にアメリカは、その後ペレット原料の品位低下が極端に進み競争力は低下の一方で、焼結法高炉や電炉製鉄法との競争に苦戦している。しかし残された膨大な埋蔵量の低品

位 BIF 活用新製鉄法開発にフロンティア精神で取り組み、再起に挑んでいる。中国の生産飛躍は、上述した歴史的発展過程のパターンである「製鉄法革新による未利用鉱種開発」の裏づけの無い生産拡大の印象を与える。しかし、中国内の鉄鉱石事情をみると原鉱品位は30%強で国際水準よりはるかに低い。鉱石埋蔵量は結構存在し、昨年も鉄鉱石を7億t強生産して、高品位輸入鉱石プラス国内低品位鉱石を活用している。高品位輸入鉱石依存の日本型鉱石利用形態とは異なる鉱種の新利用パターンともみられる。そうすると、いたずらに中小製鉄炉の廃棄・大型化などの日本型追随だけではなく、中小規模の製鉄法を効率化していくことも大事と考えられる。

7 おわりに

歴史のその時折の政治・経済、宗教と戦争、文化・芸術・科学技術などの変化や進歩の大波にゆられながら、鉄の生産は着実に物質福祉向上や国富の糧として量・質ともに持続的に伸びてきた。この持続的発展は製鉄技術自体の革新の連鎖に負うが、同時にこの革新は鉱石の未利用鉱種の活用を果たし原料供給の持続を保障してきた。現代の大型高炉の効率生産は高品位で大規模な BIF 系鉱石を基調とし年間10数億tもの凄まじい多量消費を支えているが、遅かれ早かれ未利用資源を活用する次の製鉄革新を必要とすることを歴史は示唆している。地球上にはまだ大量に鉄鉱石は眠っており、「鉱石のちがいをよくし、各国が利用鉱種の地政学的条件を考えて、地球に最も合理的効率的な鉱石利用の方案を発信することが肝心と考えられる。地球が今後必要としている資源・環境問題解決には資源小国ならではのハングリー精神に基づ

く日本の技術開発資質や能力発揮を世界は必要としていると思う。

参考文献

(注：参考文献の詳細は下記文献1)の参考文献を参照されたい)

- 1) 稲角忠弘：第196・197回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2008)
- 2) ベック著，中澤護人訳：鉄の歴史，たたら書房，米子，(1974)
- 3) 中澤護人：ヨーロッパ鋼の世紀—近代溶鋼技術の誕生と発展，東洋経済新報社，東京，(1994)
- 4) J.R. ハリス，武内達子：イギリスの製鉄業 1700—1850年，早稲田大学出版部，東京，(1998)
- 5) 小林英夫：イギリス産業革命と近代地質学の成立，築地書館，東京，(1988)
- 6) 矢島忠正：ふえらむ 8 (2003) 5, 6, 7.
- 7) グスタフ・アインエッケ著，島村哲夫訳監修：世界鉄鉱石資源，日本鉄鋼連盟，(1953)
- 8) 館充監修：原燃料からみたわが国製鉄技術の歴史，日本鉄鋼協会，(1984)
- 9) 稲角忠弘：焼結鉱—資源少国日本の挑戦記録，技術叢書第2シリーズ第1巻，日本鉄鋼協会，(2000)
- 10) 下村泰人：20世紀鉄鋼技術史のトピックス，日本鉄鋼連盟，(1995)
- 11) J.A.Ricketts：The History of Ironmaking, The Iron & Steel Society, (2000)

(2009年5月19日受付)