

鉄鋼原料 (1) 鉄鉱石

鉄鋼製品の製造工程は、地球上に豊富な資源として存在する鉄鉱石(酸化鉄)を石炭(コークス)で還元して、鉄分を取り出す製鉄工程から始まる。その還元は約300年続く高炉法で行われているが、今日まで鉄鋼の品質と生産効率を高めるための原料改質や副原料活用などの新たな要素技術が開発されてきた。今号から3回にわたり、鉄鋼製品の「原料」の世界にスポットを当てて、天然資源としての生成の歴史やその活用技術を解説する。第1回目は、鉄鋼製品の源である「鉄鉱石」の生成過程と埋蔵量、採掘条件などについて紹介する。

酸素の発生とともに 鉄鉱石として姿を現した鉄

鉄は、137億年前の宇宙誕生(ビッグバン)後に始まった「核融合(熱核反応)」による元素の生成過程で、最後に生まれた物質だ(図1)。陽子や中性子の結合力が強く、元素の中で構造的に最も安定した物質だといわれている。他の元素も核融合を繰り返すうちにいずれは鉄に変わってしまうため、宇宙に存在する物質の中で、鉄の存在量は圧倒的に多い。

約46億年前に生まれた地球においても、鉄は34.6重量%を占め、他の天然資源と比べて桁違いに埋蔵量が多い。各資源の生成時期はそれぞれ異なり、石油や石炭は、数億年～数千年前に誕生したものが多いが(石炭については本シリーズ3回目で紹介)、鉄鋼製品の主原料となる鉄鉱石(写真1)は、25億年前(太古代)に大量に生まれたと考えられている。

では、25億年前、地球上になぜ多くの鉄鉱石が姿を現したのか。

地球の誕生当時、大気には酸素がなく、二酸化炭素や塩酸、亜硫酸ガス、窒素が充満していた。大地には酸性雨が降り注ぎ、地表の鉄分が溶けてイオンとして海へ流れ込むとともに、海底火山によって地球内部の鉄が噴出して多くの鉄イオンが海中に供給された。約30～25億年前に

鉄の誕生

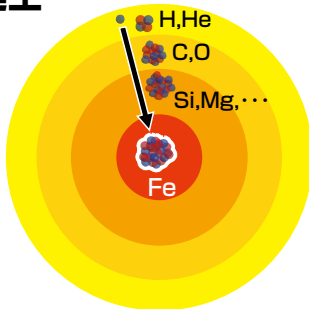
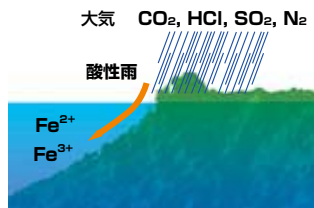
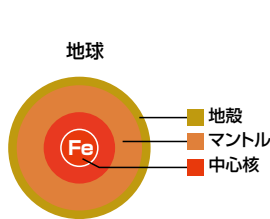


図1
恒星の引力で原子同士が熱エネルギーを生み出し、新たに陽子、中性子の結合が進み、水素、ヘリウム以外の元素が生み出される現象が、「核融合」(熱核反応)だ。やがてこの反応は鉄で終わった。

酸化鉄(鉄鉱石)の生成過程



地球の誕生当時、酸性雨により地表の鉄分が鉄イオンとして海に入っていた。

鉄鉱石

写真1



鉄鉱石(塊鉱)



鉄鉱石(粉鉱)

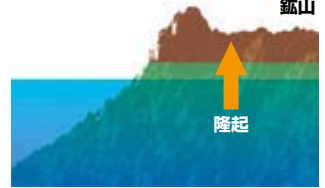


写真2

図2
◀西オーストラリアに現生するストロマトライト



約30～25億年前に生まれた光合成を行う「シアノバクテリア」「ストロマトライト」により海中に供給された酸素が鉄と結合して酸化鉄として堆積。「鉄鉱床」が形成された。



海底の隆起により鉄鉱床を含む層が表層に現れ、鉄山ができあがった。

46億年前 → 38億年前 → 20億年前 → 15億年前

「シアノバクテリア」や「ストロマトライト」(写真2)などの細菌・藻類が生まれ、光合成によって大気中の二酸化炭素を吸い込んで酸素を排出するようになった。そして、その酸素が海中に豊富に溶けていた鉄イオンと結び付き、固体の酸化鉄となって急速に海底に沈殿・堆積して「プレカンブリア」という時代の地層(鉄鉱床)を形成した。約15億年前、その鉄鉱床は造山活動によって隆起して地上に現れ、鉄鉱石を豊富に含む鉱山を作り上げた(図2)。

地殻、マントル、中心核で構成される地球全体で見ると、他の元素に比べて重い鉄は、地球の基本構造が安定する過程で重力により内部に沈んだため、中心核にいくほど量が多くなるが、珪素や硫黄など比較的軽い他の元素と結び付き、化合物として地殻表層にも残った。現在、私たちが利用している鉄は、こうして地表に残されたものであり、それは地球全体に存在する総量のごくわずかにしかすぎない。

鉄鉱石の偏在は大陸移動によってもたらされた

地球には鉄が豊富に存在するものの、現在、地表で鉄鉱石を大規模に採掘できる場所は限られている。この地理的偏在はどのようにして起こったのか。

鉄鉱床が隆起した太古代、世界は鉄資源を豊富に含む一つの超大陸(ローレンシア大陸)を形成したが(図3)、

その後、長い歳月をかけて起こった大陸移動によって分断され、そこに比較的新しい時代に生成した地層が付加されることで、現在のような大陸地図が作り上げられた。その結果、多くの鉄鉱石が堆積している太古代の鉄鉱床は世界のさまざまな地域に広く分散し、鉱山として地表に顔を出すことになった(図4)。現在、私たちが製鉄資源として活用している鉄鉱石は、主にこれらの鉱山から採掘されている。

現在、大規模な採掘が行われている鉄鉱床は、太古代に誕生した鉄分を多く含む「縞状鉄鉱床(BIF: Banded Iron Formation)」だ(写真3)。BIFはかつて海底に堆積していた証拠として細かい縞状になっている。縞状になっている理由の有力な説は、約30~25億年前に藻類が生まれ始めたころ、海中には鉄だけではなくシリカ(SiO₂)も溶けており、太陽光の照射量が多い夏季には、ストロマトライトが活発に光合成して大量の酸素を排出することで多くの酸化鉄が沈殿したが、照射量が少なく温度が下がる冬季になるとあまり光合成をしなくなるためシリカが多く沈殿して、時間経過とともにそれが交互に堆積したというものだ。その結果、他の元素との親和性の高い鉄は、組成の異なる化合物として鉄鉱床の断面に年輪のような変化をもたらした。この層を数えることで堆積した年代を細かく特定することもできる。大陸移動や堆積環境の違いが各地の鉄鉱石成分の違いを生み出している。

現在、鉄鋼製品の原料として採掘されている鉄鉱石の

19億年前の超大陸ローレンシア図3



(出典: Newton 1995年7月号)

地球表層岩石の年代分布

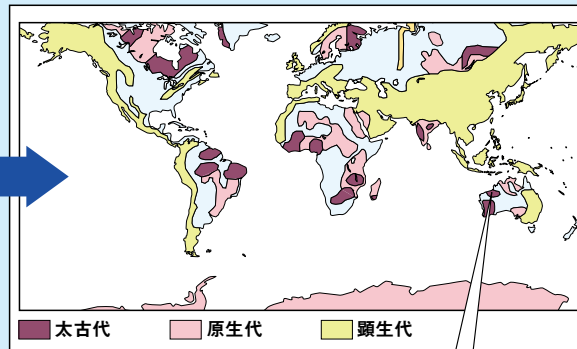


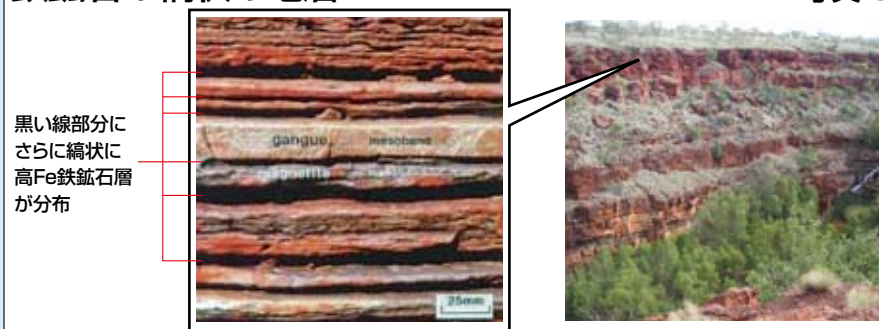
図4

太古代に誕生した地層に多くの鉄分が含まれる。

豊富な鉄鉱石を含んだ太古代のローレンシア大陸(図3)は、その後大陸移動によって分断され、比較的新しい時代に生成した層が付加された。その後海底の隆起などにより局所的に鉄鉱床が表層に盛り上がった現在の岩石分布を生み出した(図4)。鉄鉱床は、かつて海底で堆積した証として細かい縞状になっている(写真3)。私たちはこの鉄鉱床から多くの鉄鋼資源を採掘している。

鉄鉱石の縞状の地層(西オーストラリアの例)

写真3



黒い線部分にさらに縞状に高Fe鉄鉱石層が分布

70%はBIFであり、特に、オーストラリアやブラジルで採掘される鉄鉱石は鉄分が多い(約62%)。また今日まで、BIFに限らず、各地域の地質学的特徴に応じてさまざまな地層から採掘されてきている。日本でも1884年から1993年まで、岩手県・釜石鉱山などにおいて鉄鉱石が採掘されていたが、火成岩起源や新生代(約6,500万年前)以降に堆積した比較的新しい地層から掘られていた。日本の鉄鉱石は鉄の純度がそれほど高くないが(約32%)、Fe換算で累計約3,000万トン産出した(表1)。

技術進歩とともに増え続ける鉄の利用可能な埋蔵量

鉄鉱石には生成環境の違いによって、赤鉄鉱、磁鉄鉱、褐鉄鉱などいくつかの種類があるが、太古代に生まれた鉄鉱床(BIF)は主に赤鉄鉱でできている(※1)。現代の高炉法による製鉄では、鉄鉱床の表土や岩石を除去した後に、地面から直接掘り出す「露天掘り」で大量に採掘できるBIFの赤鉄鉱を主要原料として使用してきた(写真4)。

現在、世界で確認されている鉄の埋蔵量は3,700億トンで、その内1,700億トンが技術的、経済的に見て(採算の取れる範囲で)採掘可能な量とされている。地表から盛り上がっている鉱山や深度200~300m程度の場所を掘削するだけでそれだけの鉄資源を手に入れることができる。

さらに、地球の地殻内に存在すると考えられている資源量は控えめに見ても数兆tになる。今後の資源需要変化に

伴って、ボーリング(試錐探鉱)などによる確認埋蔵量も変わるため、利用可能な資源量を正確に特定することはできないが、現在の18億トン/年の採掘量を基準として、今後、仮に鉄の生産量が2%ずつ増えたとしても、数百年という長期間にわたり比較的地表から近い層で採掘することができるという試算があり、技術革新や新たな埋蔵場所の発見により、将来的に確認埋蔵量はさらに増加すると考えられている。

採掘場所の探索は、従来から、広域の地質で太古代の地層が存在することが知られている地域を精査して、鉄鉱床を発見することから始まる。地質専門家の地道な地表探査や、上空からのリモートセンシング(※2)などの幅広い探査技術が適用され、また、上空から重力計で測定することで比重の高い鉄鉱石の堆積地域を特定する手法も用いられている。BIFが地表部にある場合、表面の軽い物質は雨などで流され、赤鉄鉱の赤い地肌が露出して樹木が繁殖していないため、目視で採掘場所が特定されるケースも多い。西オーストラリアやブラジルではこうした探索方法により、従来から掘削しているBIF層地域に加えて、周囲に点在する鉄分の高い鉱山を見つけて新たに採掘する動きが活発化している(図5)。

大規模なインフラを必要とする鉱山開発

一方、新規鉄鉱石鉱山の開発には、大規模なインフラ

日本の鉄鉱山の生産実績

表 1

地域	鉱床名	生産期間		粗鉱生産量 千 t	粗鉱品位 Fe%	Fe 生産量 千 t
		開始年	終了年			
北海道	倶知安	1898	1973	6,183	50.9	3,147
	徳舜誓	1913	1972	1,587	41.1	652
岩手	釜石	1892	1993	50,000	29.8	14,900
群馬	群馬鉄山	1943	1985	2,260	48.8	1,103
新潟	赤谷	1940	1973	2,220	45.1	1,001
岡山	柵原	1884	1991	25,000	30.0	7,500
計				87,250	32.4%	28,304

(JOGMEGデータより作成)

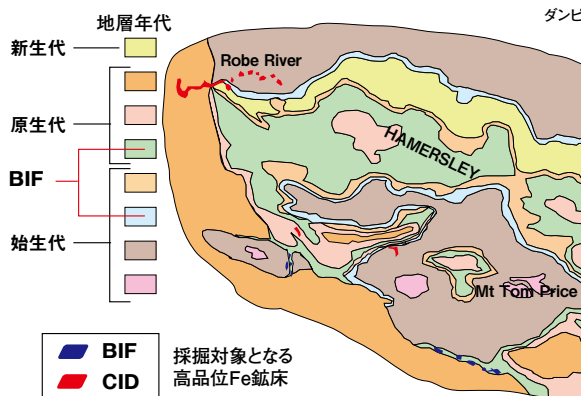
露天掘りの鉱山 (西オーストラリア)

写真 4



西オーストラリアの地質図

図 5



南北100km、東西300kmの堆積盆に1,000m近い厚さのBIFが褶曲して広く分布し(緑と空色)、その中のFeが高くなった部分(紺色)を中心に現在採掘している。赤色は、BIFが再堆積した褐鉄鉱鉱床(CID)。

採掘後の輸送例

写真 5



採掘された鉄鉱石を運搬するトラックから荷台だけをはずして台車に乗せて一般道路を輸送する。

※1 鉄鉱石は化学成分組成によって赤鉄鉱(ヘマタイト、 Fe_2O_3)、磁鉄鉱(マグネタイト、 Fe_3O_4)、褐鉄鉱($FeO(OH) \cdot nH_2O$ または針鉄鉱:ゲーサイト、 $FeOOH$)などに分けられる。

※2 リモートセンシング:人工衛星などにより、地表から反射・放射される種々の波長の電磁波を測定し、コンピューターで処理して地表の状態を映像としてとらえること。

投資が必要となる。具体的には、山元（鉱山）での大型採掘設備、鉄道・港湾などの大規模輸送・出荷インフラ、粗鉱を成品に精製する破碎・選鉱処理設備などへの投資である。例えば、西オーストラリアの大規模鉱山であるマウント・ニューマンでは、鉱山から港までの間426kmに鉄道を敷設し、1両当たり積載量が120トンの車両が200以上連結された貨車によって、大量の輸送が行われている（図6、写真5、6、7）。

近年中国・インドなどを中心に鉄鋼需要が急増し、今後も高い需要レベルが継続すると見込まれる中で、大規模なインフラ投資を伴う新規鉱山開発は、需要急増に見合うスピードでは進まず、足元では世界的に鉄鉱石需給はタイト化し、価格高騰を招いている（グラフ1）。

こうした中で現在、既存鉱山の周辺鉱床の開発とともに、大規模投資を伴う新規鉱山の開発が検討・推進されている。

比較的鉄分純度が高い従来からの山元でも採掘が継続されるものの、シリカや不純物が比較的多い層を採掘せざるを得ず、採掘場所や品質の多様化・劣化が進むことは避けられない（表2）。

鉄鉱石に含まれるシリカ、アルミナなどの鉄以外の固体成分（脈石）が多いと、製鉄工程で鉄鉱石がなかなか溶けず還元しにくく、鉄鋼製品の品質や生産効率に悪影響を及ぼす。今後は山元での選鉱強化による不純物の除去や製鉄工程におけるさらなる技術的対策が求められる。

新日鉄ではこうしたトレンドを背景に、従来から品質の異なる鉄鉱石のブレンドや事前処理の技術開発など、製鉄プロセスの改良・革新に積極的に取り組んできた。

今回は、製鉄工程における高炉操業技術や原料改質技術、副原料の活用など、多様な品質の鉄鉱石を使いこなすための技術的挑戦について紹介する。

鉄鉱石の品質劣化に対応する技術開発に挑む

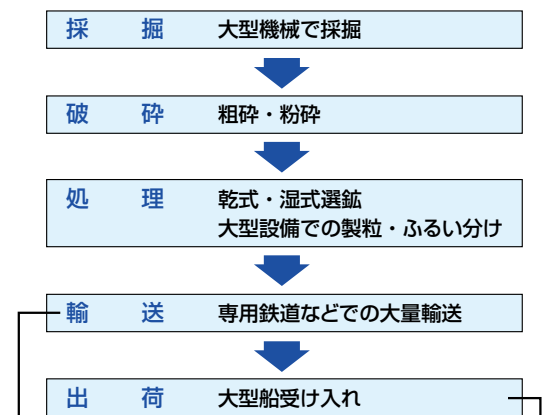
高炉法による製鉄が始まった当初は、鉄の需要地の近くにある鉄鉱山がその原料を担ったが、20世紀後半から現在まで、新日鉄をはじめとする鉄鋼会社は、先述した西オーストラリアや、ブラジルのカラジャス鉱山など鉄の純度が高い鉄鉱石（Fe60数%）が堆積している鉱山から高品質の鉄鉱石を輸入し、資源として利用してきた。しかし今後は、

監修 新日本製鉄(株)
原料第二部審議役（資源調査）
兼 原料第一部審議役（石炭資源調査）
長野 研一（ながの・けんいち）



プロフィール
1950年生まれ、大分県出身。
1976年入社。主に原料資源調査に従事。
2000年原料第二部部长。
2006年より現職。

鉄鉱石の採掘から輸送の流れ 図6

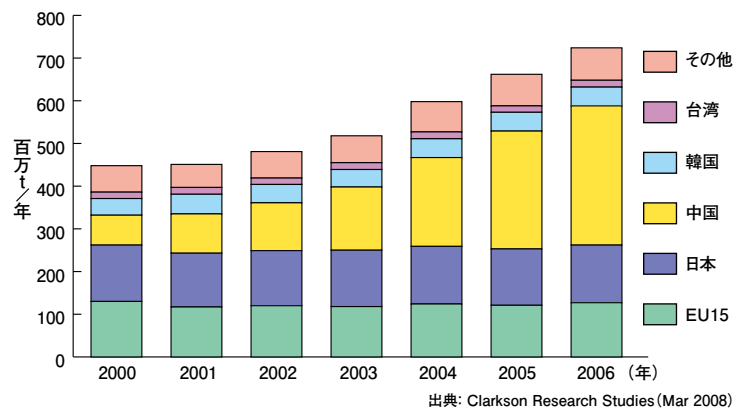


鉄道 写真6 鉄鉱石輸送船 写真7



(BRASIL MARU)

鉄鉱石の海上貿易量推移 グラフ1



粗鉱 Fe と成品品質の例 表2

	粗鉱		成品品質			
	Fe%	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	-0.15mm%*
低 Fe BIF	25	63.0	3.8	0.14	0.013	100
オーストラリア	62	61.4	3.4	2.30	0.065	23
ブラジル(カラジャス)	67	67.0	0.9	0.95	0.032	15
ブラジル(南部)	58	66.0	3.5	0.70	0.027	30

*粉鉱の中の微粉の割合。この割合が高いと製鉄(焼結)の生産効率に悪影響を及ぼす。