



平成29年度文化庁
文化芸術振興費補助金

文化庁

世界遺産

「明治日本の産業革命遺産」ガイドブック—製鉄・製鋼編

鉄がわかる本

発行◎「明治日本の産業革命遺産」人材育成事業実行委員会
監修◎加藤 康子 著者◎稲角 忠弘 菅 和彦

世界遺産
「明治日本の産業革命遺産」ガイドブック 製鉄・製鋼編
鉄がわかる本

2017年11月20日発行
発行◎「明治日本の産業革命遺産」人材育成事業実行委員会
〒160-0008◎東京都新宿区三栄町26-3
TEL◎03-3357-6210
URL◎<https://sangyoisankokuminkaigi.jimdo.com/>

監修◎加藤 康子
著者◎稲角 忠弘 菅 和彦
編集・デザイン・印刷◎株式会社日活アド・エイジェンシー
本誌掲載の写真および図版・記事の無断転載を禁じます。

発刊にあたって



一般財団法人産業遺産国民会議 専務理事

加藤 康子

日本は幕末から明治にかけて、西洋以外の地域の中で先駆け産業の近代化に取り組み、半世紀余りという極めて短い期間で産業国家としての地位を確立しました。このことは世界史上において特筆すべき出来事であり、人類共通の遺産としてふさわしい普遍的な価値を持っています。

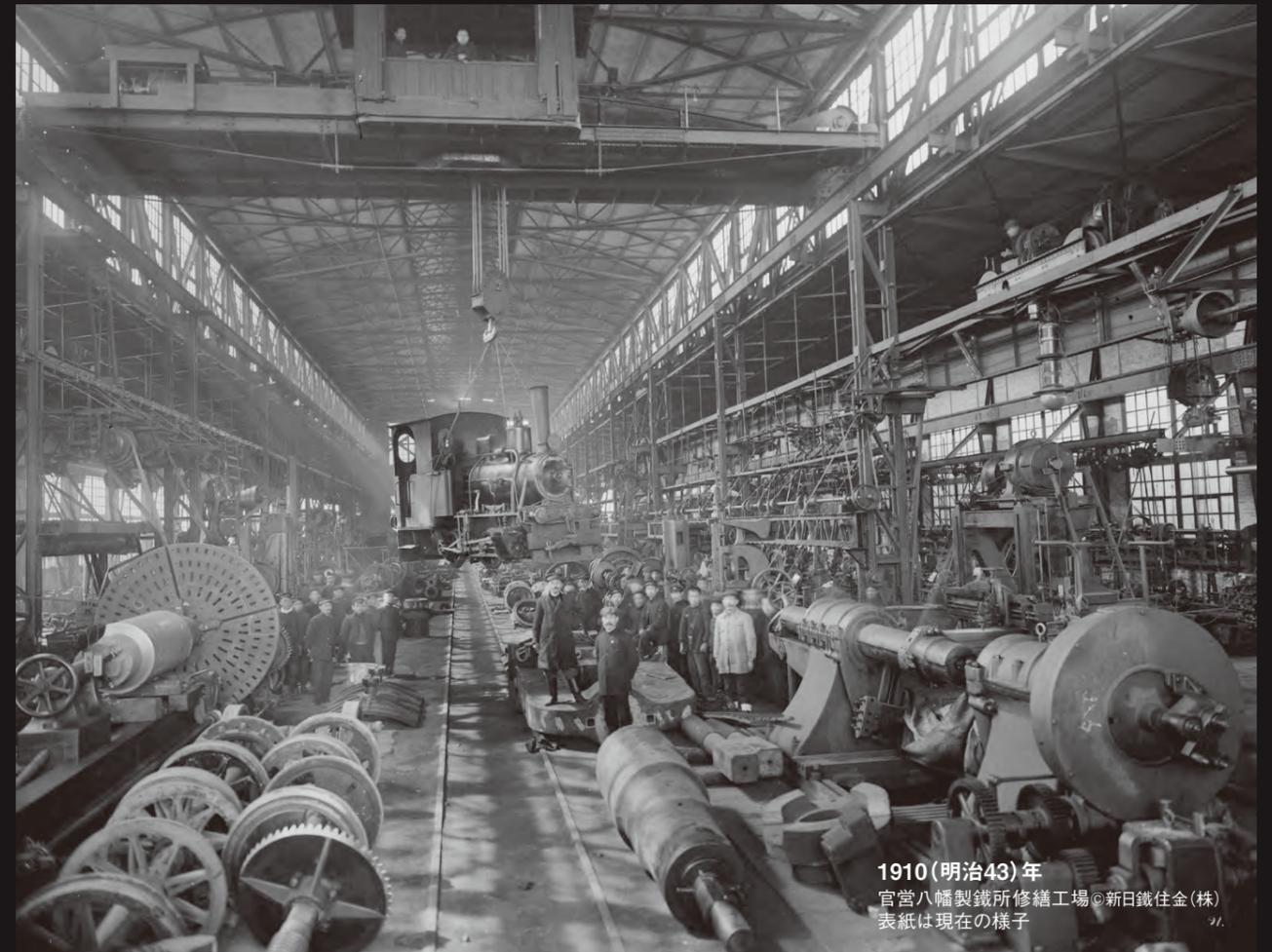
産業化の歩みは幕末、海防の危機感から国を守るため、鉄製大砲製造への挑戦から始まりました。鉄は国家安全保障の要であり、産業の母でもあります。明治日本は自らの力で人を育て、西洋の産業革命をけん引した最新の製鉄・製鋼技術を導入することに成功し、産業のシステムやインフラを構築しました。日本の近代化はまさに鉄とともにありました。

「明治日本の産業遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」における製鉄・製鋼分野の構成資産群には、現代日本の繁栄の原動力となった先人たちの鉄づくりへの情熱や知恵が息づいています。この素晴らしい遺産の保全と次世代への継承に向け、本書が一助となることを祈念しています。そして鉄が、これからも私たちの豊かな暮らしと社会を支え、日本の未来を切り拓いてほしいと願っています。

世界遺産

「明治日本の産業革命遺産」ガイドブック—製鉄・製鋼編

鉄がわかる本



1910(明治43)年
官営八幡製鐵所修繕工場©新日鐵住金(株)
表紙は現在の様子

世界遺産
「明治日本の産業革命遺産」ガイドブック
製鉄・製鋼編
鉄がわかる本

C O N T E N T S

- 02 発刊にあたって
一般財団法人産業遺産国民会議 専務理事
加藤 康子
- 04 鉄の不思議な力
- 06 世界を一変させた産業革命
- 08 西洋技術の導入に成功した軌跡
- 11 STEP 1
試行錯誤の挑戦
扉を開いた一冊の蘭書
 - 1 国を守る
鑄鉄製大砲の製造に挑む
 - 2 鑄鉄素材の性能限界に直面
苦闘した和銃での大砲鑄造
 - 3 「柔鉄」を求めて
釜石で木炭高炉の操業に成功コラム 貪欲に学んだ幕末の先駆者たち
- 21 STEP 2
西洋技術の直接導入
日本の近代製鉄の礎を築く
 - 4 官の挫折と民による再生
小さく生んで大きく育てるコラム 官と民の試み
- 25 STEP 3
産業化の完成期
鍊鉄から溶鋼の時代へ
 - 5 官営八幡製鐵所の創業
日本初の銑鋼—貫製鐵所
 - 6 初期トラブルを乗り越えて
産業国家の屋台骨を構築する
- 30 世界遺産としての価値
日本と西洋の技術が独創的に融合
- 32 鉄と鋼の基礎知識

【参考資料】
新日鐵住金(株)広報誌
『季刊新日鐵住金』
『鉄と鉄鋼がわかる本』新日鐵住金(株)編著
(日本実業出版社)

鉄の不思議な力

地球は「鉄の惑星」

地球全体の重さの3分の1は鉄元素で占められています。宇宙や生命の誕生と進化、古代から現代に至るまでの文明において、鉄は人類にとって欠かせない存在なのです。



鉄元素の形成©NAOJ

巨大な原子星の中で核融合が起こり、さまざまな元素が宇宙に生まれました。なかでも鉄元素は、他の元素よりも安定的であるため、宇宙における存在度は高くなりました。



地球の形成と生命の誕生

地球の中心に鉄が濃集し、地球磁場が形成されました。磁場が危険な宇宙放射線をブロックしたことで、地表面は生命にとって安全な環境になりました。太古の海では光合成をするシアノバクテリアの誕生によって酸素が増え、地球環境は劇的に変わりました。



25億年前の縞状鉄鉱層
(西オーストラリア・ハマスレー)

鉄鉱物を主体とする黒い層と、石英を主体とする白い層が交互に堆積しています。1つの層の厚さは最大数百mもありますが、その中にさらに細かい薄い層の堆積が繰り返されています。白色の石英を主体とした層が地質作用で溶脱し高品位鉱石となります。



生命の多様化

赤血球中のヘモグロビンに含まれている鉄は、酸素を体の隅々まで運びエネルギーに変える重要な役割を果たし、生命の進化をもたらしました。

もっと
知りたい!

代表的な鉄鉱石
⇒P18-19をチェック

鉄は硬くて強く、自在に加工できる優れた特性を持っています。そのため自動車や家電製品、ビル、橋、船、鉄道、産業機械などをつくる主要な材料として、広く使われています。さらに磁性という特性を利用して発電機で電気がつくられ、その電気を使ってモーターで機械を動かすことによって、工場での大量生産も可能にしています。

鉄は現代文明社会の基礎素材として欠かせない存在です。それは、鉄は強く、かつ自在に加工できる優れた材料特性を持ち、経済的で大量に使えるからです。自動車や家電製品、ビルなどの建築物、橋、船、鉄道、産業機械などをつくる主要な材料として、広く使われています。さらには鉄には磁性という特性があり、発電機や変圧器、モーターとして使われ、現在の電気社会を支えています。

明治日本の産業遺産に登録された製鉄・製鋼に関わる資産群は、このように大量に鉄が広く利用できるようになった製鉄の工夫の過程が学べます。人類の鉄の本格利用は産業革命期に可能となり、人類は鉄の本来の力を引き出すことができるようになりました。本来鉄元素には不思議な大きい根源的な力があり、宇宙創成以来138億年間の宇宙や地球に大きな影

響を与えてきました。そこで明治日本の産業革命遺産に登録された製鉄・製鋼に関わる資産群が一体どのような価値を持っているのかを紹介する前提として、まず鉄という元素の起源からたどってみましょう。



138億年前に宇宙が生まれ、その約3分後には全ての物質のもととなる原子核がつくり出されました。原子核は電子と結びついて、水素やヘリウムの原子ができ、それらが徐々に集まってガス状の雲となり、星をつくりました。宇宙に出現した星たちは、内部でさまざまな元素をつくり出したあと、超新星爆発を起こして消えていきました。こうしてまき散らされた元素が、次の世代の星の種となりました。

元素の中でも鉄原子は、最も安定した原子核構造を持っているため、他の元素に比べて宇宙に相対的に多く存在しています。約46億年前に誕生した地球は、比較的重い元素が集まって形成されたため、鉄が地球全体の重さの3分の1を占めています。重量で見ると、地球は「鉄の惑星」なのです。

地球の内部では溶けた鉄が対流し、強大な磁場をつくり出しています。この磁場がバリアとなって宇宙空間から降り注ぐ

有害な太陽風や宇宙線などを遮り、地球を生命にとって安全な環境へと変えました。誕生当時の地球の大気中に酸素はなく、二酸化炭素や窒素などが充満していました。海中にも酸素はありませんでしたが、約30億～25億年前になると、光合成をするシアノバクテリアが生まれ、酸素を供給し始めました。その酸素は海中の鉄分と結びつき、酸化鉄となって沈殿・堆積して鉄鉱層を形成しました。そして、その後の地殻変動によって海底が隆起し、鉄鉱層が地上に現れ、高品位鉱石鉱床が出来上がりました。鉄の可採埋蔵量は現在2,320億tにのぼります。他の金属に比べて桁違いに豊富なのは、こうした宇宙や地球の誕生の経緯があるからなのです。

一方、地球上に酸素が蓄積されると生物の大進化が始まり、人類が誕生します。生物にとって鉄は基本的な栄養素で、生命を維持するために鉄を利用しています。例えば私たちの体内をみると、鉄の多くは血液中のヘモグロビンに存在しています。ヘモグロビンは呼吸で体内に取り入れた酸素を体の隅々まで運び、生命活動の基盤となるエネルギーを生み出しています。鉄はかけがえのない存在なのです。

世界を一変させた 産業革命

鉄は古代から現代に至るまでの文明社会において、人類の進歩に重要な役割を果たしてきました。鉄を使った武器をいち早く利用できた文明は、他の文明と対抗する上で優勢を保つことができました。さらに鉄器が農耕の効率を格段に向上させ、生産性を大幅に高めたことによって社会を安定化させ、科学技術の発達を促しました。

いつの時代においても、鉄を確保することは重要な国家戦略になりました。なかでも社会を大きく変えたのが、18世紀イギリスにおける産業革命でした。それまでヨーロッパでは、高炉を用いて鉄鉱石を木炭で還元して銑鉄と呼ばれる鉄をつくっていました。しかし鉄を大量生産するするためには、木炭が足りませんでした。多くの木が切られ、森林資源が枯渇して

しまったからです。

そこで1709年、アブラハム・ダービーによってイギリスでコークス高炉が発明されました。コークスは石炭を蒸し焼きにしたもので、木炭に比べて砕けにくくて高炉を高くすることができ、強い火力を得ることができます。さらに送風の動力として、水力に替わって蒸気機関が用いられるようになると、高炉が水車動力の制約から開放されて自由に立地でき、かつ送風力が増し、高炉内の燃焼温度が上昇して還元効率が高まり、銑鉄(銑鉄)の大量生産を実現しました。しかし銑鉄は、加工しやすいかわりに硬くて脆く、鉄道のレールや船、建物の材料には向いていませんでした。銑鉄を改質するため、パドル法が1784年にイギリスで発明されました。パドル炉の中で銑鉄を熱しな

がらかき回す(パドリングする)ことで空気と接触させ、銑鉄中の炭素を取り除くことによって、粘り強い錬鉄(半溶融鋼)が作られるようになりました。さらに1856年に転炉、1864年に平炉という製鋼技術(溶融銑鉄中炭素の酸化による溶鋼製造技術)が開発されると、錬鉄よりも均質でさらに強靱な鋼が効率的に大量につくれるようになりました。

銑鉄、鍛鉄から錬鉄(半溶融鋼)、溶融鋼へ進化を遂げるにつれ、鉄鋼材料の用途は広がり、産業革命をさらに飛躍させ、新たな文明社会を生み出しました。その基盤は鉄と石炭の活用技術のスパイラル効果によって築かれました。鉄鋼材料を使った蒸気機関などの機械化により石炭の増産が可能になると、鉄鋼製品の大量生産が加速しました。そして大量の石炭や鉄鋼製品を効率よく輸送する手段として、鉄道や蒸気船が実用化されました。鉄道や蒸気船の発達は流通や交易の拡大・広域化を促し、各地でレールや港湾など鉄鋼材料を使ったインフラの整備が進み、経済を発展させる力となりました。こうして社会構造は、農業とそれに付随する手工業から成り立つ封建制から、産業化を経済の基礎とする資本制の社会へと転換していきました。産業革命は鉄の本格的な利用が可能になって、それが起爆剤となって人々の暮らしを大きく変えていったのでした。



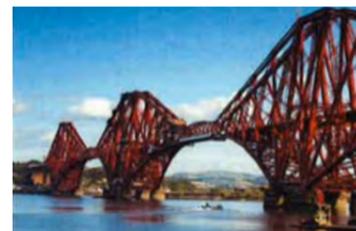
「鉄」の時代の幕開け
アイアンブリッジ(1779年イギリス) 錬鉄製
全長約60m、鉄重量400tのアーチ橋。アイアンブリッジ峡谷一帯は産業革命発祥の地で、18世紀後半～19世紀イギリス製鉄業の中心地でした。1986年ユネスコ世界遺産に登録。



「鉄」の時代の深化
キューガーデン(1848年イギリス) 柱は錬鉄製、桁は錬鉄製
1759年宮殿併設庭園として始まった王立植物園。その目玉といえる巨大温室パームハウスは、当時の造船技術を取り入れ鉄とガラスでつくられました。2003年ユネスコ世界遺産に登録。



「鉄」の時代の到達点
エッフェル塔(1889年フランス) 錬鉄製
フランス革命100周年記念および第4回パリ万国博覧のシンボルとして建設。高さ約300m、鉄重量7,300t。錬鉄は溶接できないため250万個のリベットで接合されました。



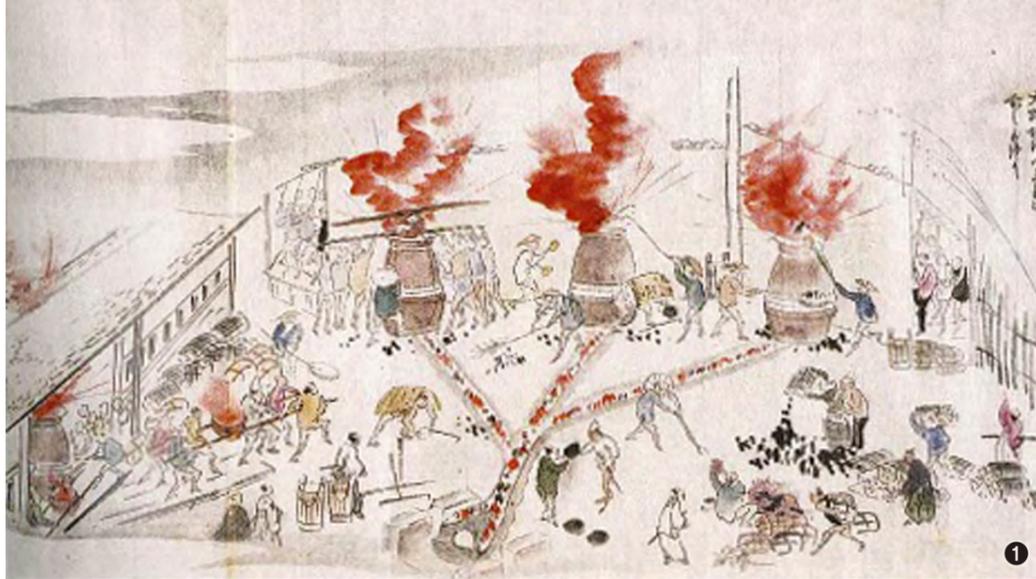
「鋼」の時代の始まり
フォース橋(1890年イギリス) 鋼鉄製
全長約2,528m、鉄重量5万1,000t、800万個のリベットが使われた鉄道橋。のちに日本土木史の父と呼ばれる渡邊嘉一が技師として工事に参加。2015年ユネスコ世界遺産に登録。

もっと
知りたい!

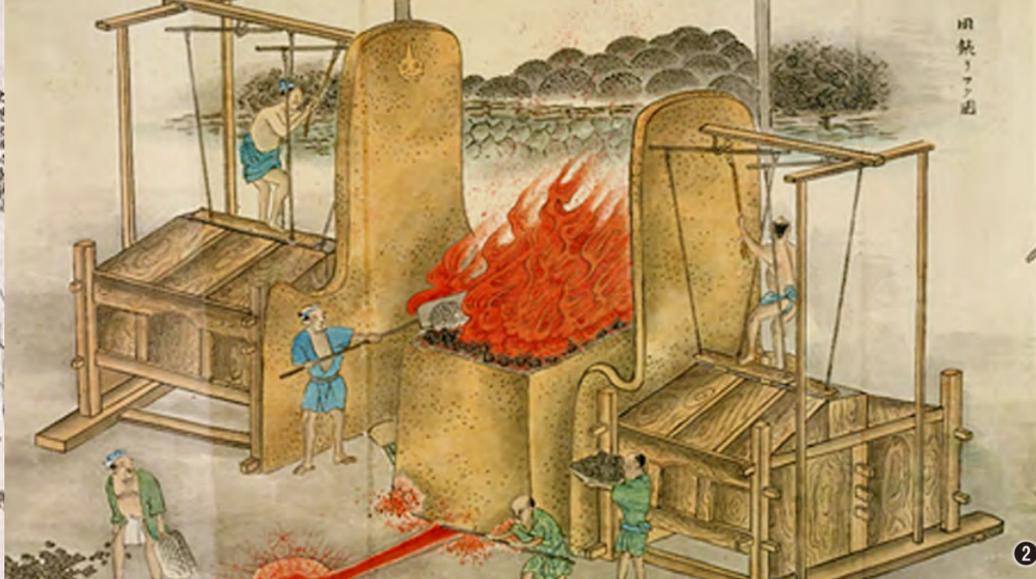
製鉄・製鋼技術の進化の歩み
⇒P33-34をチェック

06 1843年 グレート・ブリテン号の進水風景
(イギリス) ©ss Great Britain Trust
鉄を本格的に使用した初めての大型船。この船に用いられた船体構造の基本部材や二重底構造などは現在の船舶設計にも引き継がれています。





①



②



③



④

西洋技術の導入に成功した軌跡

日本を覚醒させた産業革命技術

18世紀からイギリスで始まった産業革命は、工業生産力や軍事力の飛躍的な向上をもたらし、19世紀にはヨーロッパ諸国やアメリカに普及しました。それを契機に市場や資源の確保を目指し、欧米諸国は競って海外での植民地の獲得に乗り出しました。

日本近海にも大砲を搭載した蒸気船が頻繁に現れるようになり、欧米諸国の進出への危機感が高まりました。そして1840～42年のアヘン戦争で清国がイギリスに大敗すると、江戸幕府は諸藩に沿岸の防御を固めるように指示し、各地で砲台(台場)の建設と共に大砲が製造されました。

日本には鉄素材にたたら和銃、鑄造するための溶解炉にこしき炉がありました。しかし大型の鑄鉄製大砲をつくるためには、こしき炉では短時間に大量の和銃を溶かすことができなかったため、西洋の反射炉技術が必要になりました。

反射炉は1850(嘉永3)年の肥前藩をはじめ各地に建設され、鑄鉄製大砲づくりへの挑戦が始まりました。しかし和銃でつくられた鑄鉄製大砲は、使用時に破裂し、性能に限界がありました。たたら日本のたたら炉は、西洋の高炉と異なり鉄だけでなく鋼も同時につくることができたものの、生産性が低く、品質も不均質でした。先人たちはたたら和銃とは異なる鉄が存在することと、それが高炉からつくられ、たたらでは製造できないことを知り、一種のカルチャーショックを受けたものと思われます。蘭書には鉄の性状や金属組織に基づいて評価分類されており、日本の使用経験による用途別の評価分類とは異なっていました。反射炉の建設は、西洋の産業革命が科学に基づく理解の上に成り立っていることを知る大きな第一歩となりました。

そのことに気づいた盛岡藩士の大島高任^{たかとう}は、鉄鉱石を産出する釜石で木炭高炉を建設し、1858年1月(安政4年12月)に高炉銃鉄をつくることに成功しました。このとき西洋ではコーク

ス高炉の導入が始まって1世紀半がすでに経過していました。さらに日本のたたら炉から木炭高炉への製鉄法の革新は、西洋の歴史から見ると14世紀に行われた塊鉄炉から木炭高炉への技術革新に相当します。日本は一巡前の産業革命の技術導入からスタートすることになりました。しかし、たたら炉が鉄鉱石1tあたり和銃0.15tに対して、木炭高炉は0.5tと3倍以上も効率良く生産でき、日本古来の製鉄たたらの生産能力や品質を超越した技術でした。そのパワーを目の当たりにした先人たちは、西洋の高炉技術が産業革命の源泉となったことを認識することになり、日本を覚醒させました。

銃鉄から錬鉄、そして鋼鉄をつくる

明治維新後の日本では、富国強兵のスローガンの下、殖産興業の一環として鉄鋼業の育成が促され、産業革命の本命技術であるコークス高炉・錬鉄生産に挑みました。官営釜石製

こしき炉から反射炉へ

①大砲鑄造絵巻©佐賀城本丸歴史館

江戸幕末、小田原における青銅製大砲の鑄造を描いた絵巻。3基のこしき炉を用いて地銅を溶かし、それぞれの炉から樋で溶けた銅を流し、手前で合わせて垂直に固定した鑄型に注入して砲身を鑄込んでいました。

たたら炉から高炉へ

②先大津阿川村山砂鉄洗取之図©東京大学

先大津阿川村(山口県下関市)の絵巻。江戸末期の狩野派の絵師作と伝えられています。たたら製鉄は、良質な砂鉄産地の中国地方で著しく発達しました。たたら炉に足踏みふいごで風を送り、砂鉄を木炭で還元して和銃などをつくっていました。

もっと
知りたい!

日本伝統の製鉄技術たたら
⇒P34をチェック

鐵所は高炉銃鉄から半溶鋼の錬鉄を生産し、それを長崎など陸海軍工廠のるつぼ炉で鋼鉄を製造して船や大砲などをつくる目的で、イギリスの最新技術を直接導入しました。1880(明治13)年に操業を開始しましたが、銃鉄のみで錬鉄の生産に至らず、コストが輸入銃鉄の2倍に達したため、経営の見通しが立たず、財政難も加わりわずか2年余りで廃止されてしまいます。しかし民営化され釜石釜山田中製鐵所として継承されると、1894(明治27)年に官営時代のイギリス製高炉を用いて、日本初のコークス高炉による操業に成功し、翌年には錬鉄を試製しました。還元剤が木炭からコークスに替わることで高炉銃鉄の品質が高まり、大阪砲兵工廠から輸入銃鉄に勝るとの評価を得て、砲弾や水道用鉄管の需要に応えました。

西洋の技術に追いついたかに思われましたが、そのとき欧米諸国では錬鉄より均質で強靱な鋼鉄を生産する溶鋼の時代へと移行していました。産業革命を成し遂げた19世紀前後のイギリスでは、コークス高炉で銃鉄を大量生産し、パドル炉で半溶融の錬鉄をつくり、その錬鉄をるつぼで溶解して鋼鉄をつくり、圧延機で鋼鉄を薄く延ばして鉄鋼製品をつくっていました。蒸気機関の力で高炉や圧延機は大型化したものの、パドル炉だけは手作業があるため大型化できず、炉の数を増やすことで対応するしかありませんでした。またパドル炉やるつぼで大量のコークスを必要とするなど、生産性が低い小規模な溶鋼法にとどまっていた。この技術課題を解消したのが、19世紀後半に発明された転炉や平炉の新しい製鋼技術で、溶鋼の量産化と品質の飛躍的な向上を実現しました。

そこで1901(明治34)年に操業を開始した官営八幡製鐵所では、溶鋼を生産する銃鋼一貫製鉄方式のドイツの最先端技術が導入されました。これまで製鐵所は鉄鉱石や石炭の産地近くに建設され、銃鉄を生産していました。銃鉄は冷却した上で別の場所にある製鋼や圧延の工場へ運び、再加熱して溶鋼をつくり、最終製品に加工しなければなりません。一方、

銑鉄から最終製品まで同じ場所で生産する銑鋼一貫製鉄方式は、生産性やエネルギー効率がが高く、現在も主流の生産体制となっています。

官営八幡製鐵所は、釜石と同じように操業開始後の数年間トラブルが続きました。しかし、その困難を日本人自らの手で乗り越えて、本格的に鋼鉄を生産する技術を確立しました。釜石や八幡での自力再生には、明治政府の人材育成への理解が大きな原動力となりました。西洋の科学技術を導入し殖産興業政策を推進する工部省の設置や、近代国家の土台を技術で支える人材を輩出する工部大学校(現在の東京大学工学部)の設立に尽力し、日本工学の父と称された山尾庸三は、「工業無クモ、人ヲ作ラバ、其ノ人工業ヲ見出スベシ」という言葉を残

しています。明治政府は西洋への留学生派遣とともに、外国人教師や技術者の招聘を積極的に行いました。こうした施策の下、当時世界最先端の技術の学習・吸収が進み、自ら巨大製鉄所を建設・運営できるまでの人材が育ち、明治日本は近代化を実現しました。

明治日本の産業革命遺産に登録されている製鉄・製鋼に関する資産群には、先人たちが試行錯誤を繰り返しながらも、「反射炉・木炭高炉の技術導入」「コークス高炉・錬鉄生産への挑戦」「銑鋼一貫製鉄所の建設」の3段階を経て、西洋で500年にわたって培われた革新技術を50年余りで導入に成功した英知が刻まれています。その軌跡をたどりながら近代の鉄づくりを解説し、世界遺産としての普遍的価値を紹介します。

産業革命をけん引した製鉄・製鋼技術の導入推移

年代	主な出来事	西洋での技術開発	日本の技術導入	中心地
			<日本の在来技術> たたら(古代~近世)	
1300年		塊鉄炉(古代~中世)		
1400年		木炭高炉(14~15世紀)		
		反射炉(15世紀)		スウェーデン
1500年		鑄鉄製大砲(1540年頃)		
	アルマダ海戦(1588年)			
1600年	鎖国(1641年)			
1700年		コークス高炉(1735年)		
		るつぼ製鋼(1740年)		
1750年	産業革命(18世紀後半)			
		バドル炉・圧延(1783年)		イギリス
1800年	蘭学の隆盛(19世紀前半)			
	アヘン戦争(1840~42年)	鑄鋼製大砲(1843年)		
1850年			<鉄の時代の技術> 反射炉(1850年佐賀)	
	ペリー来航(1853年)		<鋼の時代の技術>	
		ベッセマー転炉(1856年)	木炭高炉(1858年釜石)	
	明治維新(1868年)	平炉(1864年)	木炭高炉・バドル炉・圧延(1880年官営釜石)	ドイツ
		トーマス転炉(1879年)	るつぼ製鋼(1882年東京海軍造兵廠)	
			コークス高炉(1894年釜石田中)	アメリカ
1900年			平炉(1890年大阪砲兵工廠)	
			コークス高炉・平炉・転炉・圧延の銑鋼一貫(1901年官営八幡)	

3段階を経て50年余りで西洋技術をキャッチアップした軌跡

STEP 1 1850年代~1860年代
試行錯誤の挑戦

欧米に対抗可能な鑄鉄製大砲製造
反射炉と木炭高炉の銑鉄技術導入

STEP 2 1870年代~1880年代
西洋技術の直接導入

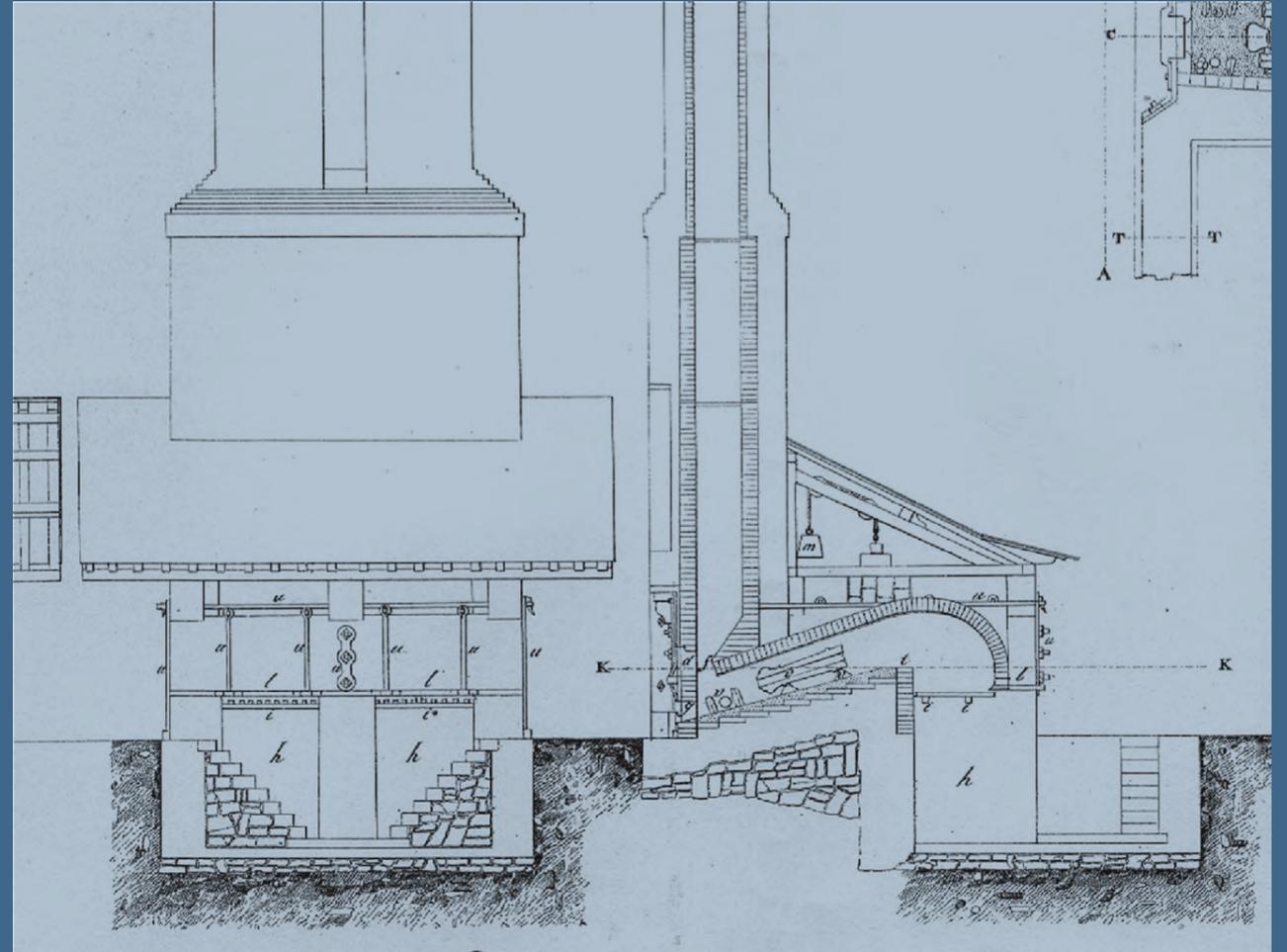
輸入鉄を抑制し殖産興業
釜石でコークス高炉・錬鉄生産の
技術導入

STEP 3 1890年代~1910年
産業化完成期

輸入鉄から脱却し溶鋼国産化へ
官営八幡製鐵所で銑鋼一貫方式を
本格導入

STEP 1 試行錯誤の挑戦

扉を開いた一冊の蘭書



「ルイク国立鉄製大砲鑄造所における鑄造法」反射炉設計図

アヘン戦争での清国の敗北、黒船来航など、江戸幕末の日本は国防の危機に直面しました。幕府や諸藩の志士たちは国を守るため、オランダのウルリッヒ・ヒューゲニン少将が記した技術書『ルイク国立鉄製大砲鑄造所における鑄造法』を片手に、設計図を模して反射炉や高炉を建設し、鑄鉄製大砲を製造しました。



1854(嘉永7)年 ペリー提督が横浜に上陸。横濱開港資料館
ペリー艦隊2度目の来航。幕府は砲艦外交に屈し、開国を余儀なくされました。

12 国を守る 鋳鉄製大砲の製造に挑む

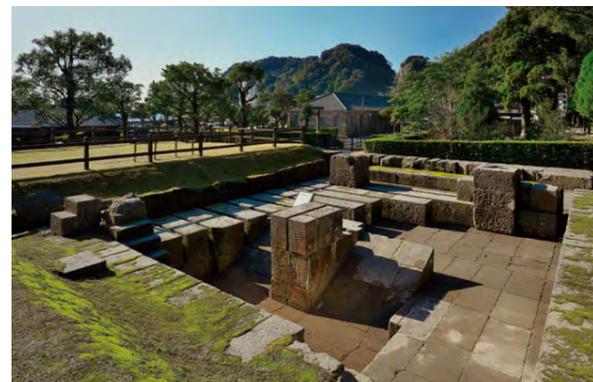
日本では江戸時代、二百数十年間にわたって、鉄砲や大砲を必要としない平和国家を実現していました。一方、西洋では製鉄・製鋼技術の発達とともに大砲技術が進化を遂げ、鋳鉄製大砲がイギリスで開発されました。鋳鉄製大砲は従来の青銅製大砲に比べて、豊富な天然資源の鉄を原材料とするため、製造コストが安く大量生産ができるとともに、強度や飛距離などの性能面にも優れ、大きな威力を発揮しました。鋳鉄製大砲の実用化は、大航海時代に無敵艦隊と呼ばれたスペインに替わり、イギリスが世界の覇権を握った要因の一つとしてあげられるほど大きな影響を与えました。

19世紀になると、極東の日本近海に鋳鉄製大砲を搭載した欧米諸国の艦船が現れるようになり、国防の危機が高まりました。幕府は1849(嘉永2)年、諸大名に対して海防強化を奨励し、1853(嘉永6)年のペリー来航後には国を挙げて鋳鉄製大砲の製造が加速しました。経験のない鋳鉄製大砲の製造にあたって参考としたのは、『ルイク国立鉄製大砲製造所における鋳造法』という1冊の蘭書でした。この本はオランダのヒューゲン少将が退役後の1826年に執筆したもので、長崎・

出島を經由して日本に輸入され、蘭学者たちによって1850(嘉永3)年頃に翻訳されました。欧米の大砲技術は日進月歩で進化を遂げていたため、時流よりも少し遅れた技術内容でしたが、高炉で鉄鉱石を木炭やコークスで還元して銑鉄をつくり出すことから始まり、銑鉄を反射炉で再溶解して鋳型に流し込んで砲身素材や弾丸をつくること、大きな錐で砲身素材の中央部に穴を開けて砲身をつくることまで網羅されていました。日本にとって“待望の秘伝書”となりました。

古来から日本では、たたら炉を用いて砂鉄を木炭で還元して和銑をつくり、こしき炉を用いて鉄の鋳物をつくっていました。しかし大砲のような大型製品をつくるためには、こしき炉の溶融能力が不足していました。そこで鋳鉄製大砲の製造には、まず反射炉の建設が必須と理解されました。反射炉の建設は肥前藩を皮切りに、薩摩藩、長州藩、水戸藩、幕府直轄地の伊豆・韮山など、全国各地で展開されました。ヒューゲンの書との出会いによって、大砲鋳造という鉄の加工技術から、産業革命をけん引した近代西洋の製鉄・製鋼技術の導入が日本で始まりました。

明治日本の産業革命遺産に 登録された反射炉



1857(安政4)年 旧集成館反射炉跡

薩摩藩主の島津斉彬は大砲鋳造や造船を核とした集成館事業を興しました。事業の一端を象徴する反射炉は、鋳鉄製大砲の製造を目指して建設されましたが、実際は銅の鋳造に使われました。



1856(安政3)年 萩反射炉

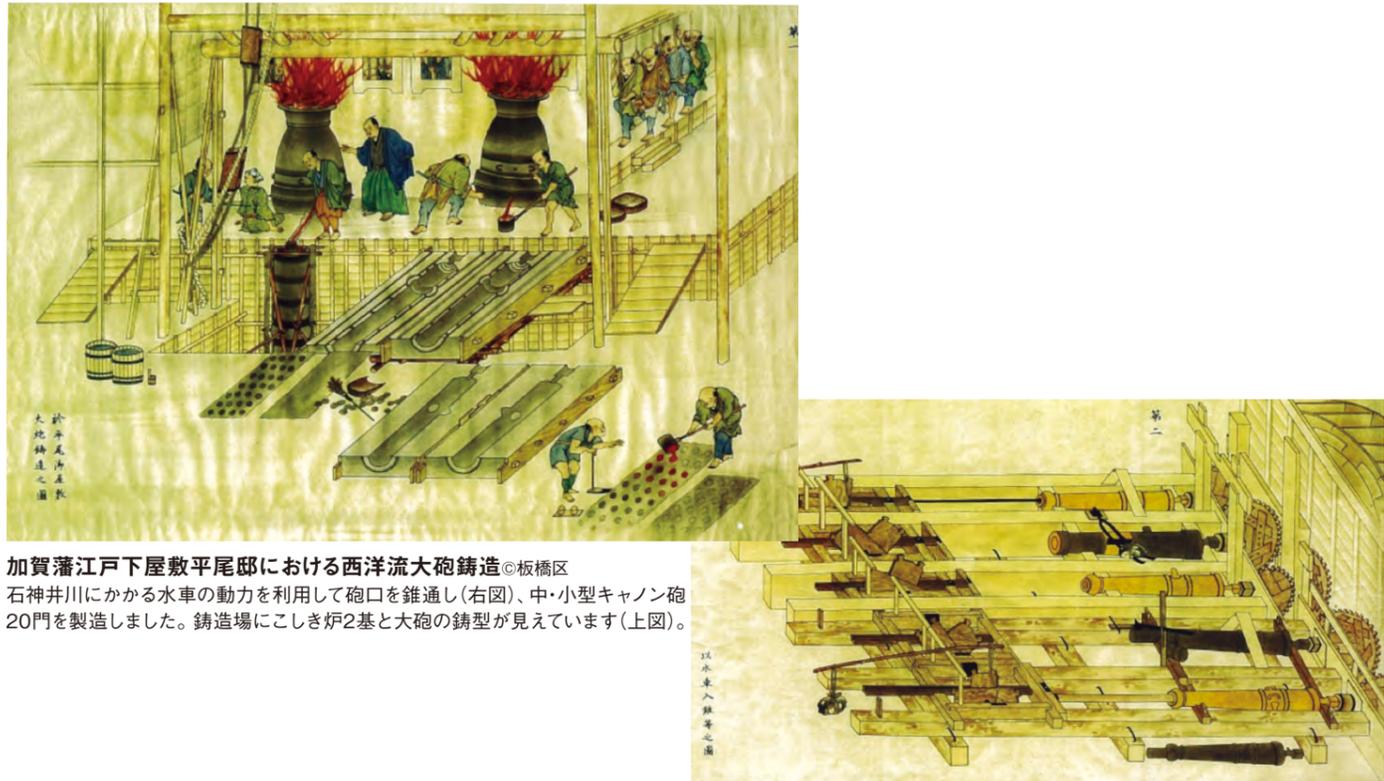
肥前藩の反射炉の目視情報をベースに建設されたもので、同時期の反射炉に比べ一回り小さく、炉内も独自の構造となっています。西洋科学への試行錯誤の取り組みを象徴しています。

1857(安政4)年 韮山反射炉

韮山代官の江川太郎左衛門英龍は鋳鉄製大砲の国産化を幕府に進言し、反射炉と品川砲台(東京・台場)の築造責任者となりました。英龍の急逝後、息子の英敏が反射炉を完成させました。実際に可動した炉が一部補修されたものの、完全に残されている世界的に貴重な遺跡です。



鑄鉄素材の性能限界に直面 苦闘した和鉄での大砲製造



加賀藩江戸下屋敷平尾邸における西洋流大砲製造©板橋区
石神井川にかかる水車の動力を利用して砲口を錐通し(右図)、中・小型キャノン砲20門を製造しました。鑄造場にこしき炉2基と大砲の鑄型が見えています(上図)。

反射炉の建設は、長崎警護役として特例的に青銅製大砲の製造技術が担保されていた肥前藩で、1850(嘉永3)年にいち早く始まりました。幕府から資金援助を得て、西洋との交流や情報入手が容易な地の利を活かし、藩命で「大銃製造方」と呼ばれたタスクフォース・チームが結成され、蘭学者の主導のもと鑄物師や刀匠など、匠の集団の技術力が結集されました。

肥前藩は非常に短期間で反射炉を完成させたものの、操業開始当初は和鉄の再溶解すらできず、操業の見通しがつくに数年を費やしました。ヒューゲニン書の翻訳に携わった技師長格の杉谷兼介は「操業8回目でやっと地金が全溶解でき、大砲が製作できるようになったが、試砲の折に砲身の破裂を起こし、15回目で初めて実戦用の砲身が鑄造できた」と書き残しています。

鑄鉄製大砲はもともと破裂しやすい性質があり、同様の失

敗例はヒューゲニン書のにも記されていました。その原因は溶融温度の不足や鉄素材の不良などにありました。長崎のオランダ商館に技術相談などを行い、改善が積み上げられていくと、次第に破裂問題を克服していきました。大口徑砲を装備する本来の計画には間に合わず、青銅製大砲が代替製造され、目標達成には道半ばでしたが、1854(安政元)年までに青銅製42門、鑄鉄製9門を長崎に供給しました。

肥前藩に続き、薩摩藩では1853(嘉永6)年に反射炉と高炉が建設されました。高炉建設は和鉄の大砲破裂問題を解決するためであったことが記録されています。しかし高炉の操業は軌道に乗らず、和鉄での大砲製造も苦闘が続きました。そのため錦江湾の要塞には、青銅製大砲を主体に防備が固められました。

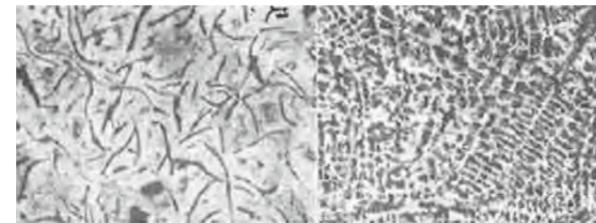
水戸藩では1855(安政2)年に肥前藩や薩摩藩の前例を参考に反射炉が建設されましたが、ここでも和鉄の限界を再確認

するにとどまりました。また幕府直轄地の韭山では肥前藩の応援協力が行われたものの、1857(安政4)年～1860(万延元)年に18ポンド砲3門の試射に成功しただけでした。

各地の反射炉建設の記録には共通して、和鉄による鑄鉄製大砲に性能の限界が示されています。先人たちは和鉄と異なる鉄が存在することや、高炉鉄でなければ巨大な鑄鉄製大

砲がつかれないことを知り、大いに驚いたことでしょう。ヒューゲニンの書には、鉄の種類が科学的に鉄の性状や金属組織に基づいて分類されていました。一方、日本では使用経験による用途別の評価分類にとどまっていた。鑄鉄製大砲製造の失敗体験は、西洋の産業革命技術が科学に立脚していることを理解する第一歩となりました。

大砲破裂の原因を探る

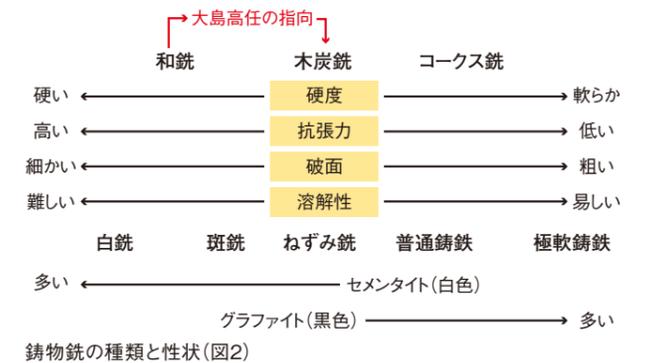
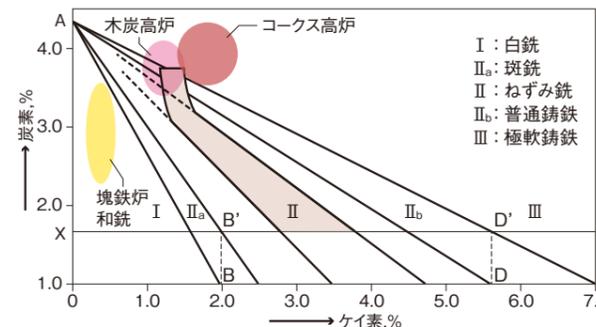


ねずみ鉄(左)と白鉄(右)の金属組織(写真1)

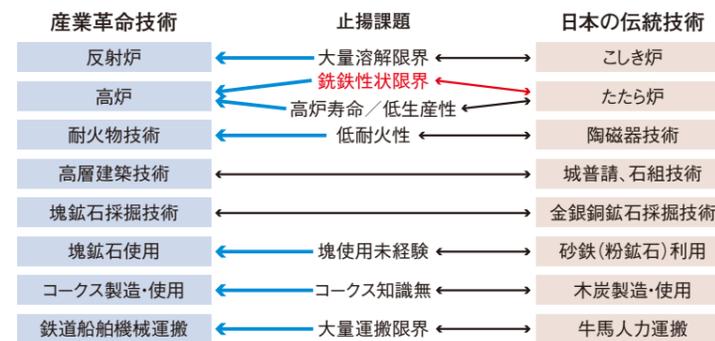
鉄は炭素の含有量などによって、その性格を大きく変えます。鉄鉄中に含まれる炭素が少ないと、金属組織のセメント化が進み、白色の炭化鉄となります。白色の炭化鉄は硬くて強度はあるものの、脆くて粘

り強さ(靱性)がないという欠点があります。肉眼で見ると白色なため白鉄と呼ばれています(写真1右)。一方、鉄鉄中に含まれる炭素やシリコンの濃度が多く、鑄造時にゆっくり冷やして凝固させた場合は、黒色の炭化鉄となります。炭素がグラファイト(黒鉛)として含まれているため、鉄と混色してねずみ色に見えることから、ねずみ鉄と呼ばれています(写真1左)。金属組織のグラファイト化によって、靱性の優れた鉄になります。

現代の金属工学の見地から、大砲破裂の原因を分析すると、和鉄は高炉鉄に比べて、炭素やシリコンの濃度が少ない(図1)ことから、金属組織のグラファイト化が進まず白鉄になりやすく、鑄物に適したねずみ鉄になりにくい(図2)ことがわかります。さらに反射炉の加熱温度が十分でない場合、和鉄は流動性が悪く、材質が不均一になることなどから強度が低下し、大砲製造に適した鑄鉄をつくることができません。このように和鉄は反射炉を用いた鑄造品の品質に不利な成分であったため、鑄鉄製大砲は砲弾発射の衝撃に耐え切れず、破裂を繰り返したのです。



ものづくりの心を育んだ 西洋技術との出会い



反射炉の建設を通して、日本の伝統技術と西洋の近代技術の相違点だけでなく、共通点も認識するようになりました。例えば基礎資材の耐火レンガは日本にありませんでしたが、陶磁器技術を活用しました。当初は耐火性がなく、原料粘土の産地を何度も変えて試行錯誤を繰り返した末、実用化に至りました。先人たちは日本と西洋の技術を比較して、吟味し、選択しながら、国内原材料と伝統技術を基盤として、西洋技術を短期間のうちに消化・吸収していったのです。西洋技術との出会いが、日本のものづくりの心を育み、産業革命技術の導入を成功させていくこととなります。

赤文字・赤矢印: 大島高任が改革を率先。破裂しない大砲素材製造に挑戦

盛 岡藩士の大島高任は、水戸藩の要請に応じて、那珂湊で反射炉の建設・操業の任に当たりました。大砲製造の材料として和銃は不向きで、高炉を用いて鉄鉱石からつくった銃鉄が必要なことを、自ら翻訳に携わったヒューゲニンの書や肥前藩の苦心談を通して強く認識していました。

大島高任は理想の鉄材を「柔鉄」と呼びました。高炉銃鉄は反射炉で熱して再溶融すると、餅米を練り合わせた餅のようになり、大砲製造に適した鑄鉄になります。出身地の盛岡藩には良質な鉄鉱石が豊富にあることから、柔鉄を求めて釜石・大橋で木炭高炉の建設に着手しました。

釜石での高炉建設もまた、反射炉と同じようにヒューゲニンの書が頼りでした。簡単な完成図面は書かれているものの、製作図面ではなく、具体的な製作方法が説明されていません。しかも日本で調達できる原材料も西洋とは異なります。そこで日本の伝統技術を駆使して、製作イメージを組み立てて推察しながら、西洋装置を模倣した和製高炉を完成させました。

こうして外国人技術者の手を借りず、1858年1月(安政4年12月)に日本で初めて木炭高炉で鉄鉱石の製錬による連続出銃操業を成功させました。わずか15カ月という短期間で、西洋技術の模倣的導入を果たす奇跡的な偉業でした。

釜石の高炉銃鉄は那珂湊の反射炉で大砲に鑄造され、和銃と異なる成績を収めたと記されています。しかし海防参与として幕政に関わっていた水戸前藩主の徳川斉昭が失脚したため、水戸藩の大砲鑄造事業は中止され、釜石の高炉銃鉄の需要は絶たれてしまいました。さらに長州藩は馬関戦争、薩摩藩は薩英戦争で欧米の大砲性能が格段に進歩して青銅砲はもとより鑄鉄製大砲では太刀打ちできなくなっていることを痛感しました。欧米では日本が鑄鉄製大砲のキャッチアップに挑戦している間に、日進月歩の製鉄技術の革新によって、大砲は鑄鉄製から一段と向上した鋼製(鍊鉄製のアームストロング砲、溶鋼製のクルップ砲)へとすでに移り変わっていて、反射炉技術は時代遅れとなっていることを知りまし

た。己を知り敵を知るため、幕府や長州藩、薩摩藩では密航留学が行われました。留学生たちは大砲製造技術の背景にある産業革命技術の威力を悟り、欧米諸国との差があまりにも大きいことを認識することになりました。そして通商条約の締結により、大砲は次第に輸入できるようになると、反射炉による大砲製造ラッシュは幕を閉じました。

釜石では高炉銃鉄の大砲への販路を失いましたが、鑄鉄などに新たな供給先を見出し、高炉による鉄づくりが継続されました。高炉はたたら炉を凌駕する生産実績が評価され着実に根付いていき、その後の釜石や八幡の官営製鐵所へと持続的に発展していくことになります。鑄鉄製大砲の製造という初期の目的は達成できませんでしたが、反射炉や高炉の技術導入における試行錯誤は、大量生産と品質向上を可能にする産業革命技術のパワーを認知する貴重な体験となり、明治維新の近代化政策を推進する大きな原動力となりました。

地震に強い構造設計

高炉は反射炉と同じように高層建築物で、炉が傾いたり倒れないような基礎工が重要になります。水戸藩の反射炉建設の際、大島高任は念入りに基礎をつくった結果、安政の大地震で炉は倒壊しませんでした。この経験が橋野高炉の建設にも活かされ、高炉の基礎トラブルは発生しませんでした。また高炉上部は石組固定構造で、城の石垣構築技術が活かされています。

橋野高炉に活かされた匠の技

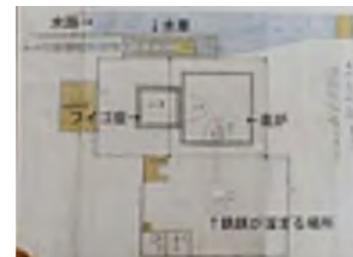


橋野鉄鉱山の三番高炉

1858(安政5)年に建設された現存する日本最古の高炉跡。橋野鉄鉱山は1868(明治元)年、高炉3基、約1,000人、牛150頭、馬50頭で年間出銃量30万貫(112.5万)に達し、最盛期を迎えました。明治政府の鑄鉄禁止令により一番高炉と二番高炉は操業を中止したものの、三番高炉は1894(明治27)年まで稼働を続けました。



絵本両鉄鉱山御山内並高炉之図(高炉断面図)



模倣ではなく創造的な改善

溶けた銃鉄をつくるためには、炉内の温度を高くしなりません。フイゴとは炉内に空気を送り込む道具で、橋野高炉では動力源に農業灌漑用の水車が使われました。また送風量を増やす必要があったとき、フイゴを西洋の円形から日本の鍛冶で使う箱型に変え、蘭書とは異なる知恵が加えられました。

「柔鉄」を求めて 釜石で木炭高炉の操業に成功



1857(安政4)年 釜石の木炭高炉で初出銃
橋野鉄鉱山の模型 ©鉄の歴史館
鉄の原料が砂鉄から鉄鉱石へと変わり、日本は近代製鉄技術へと一気に飛躍した。

日本近代製鉄の父・大島高任



大島高任
1826(文政9)年~1901(明治34)年

盛岡藩の藩医の家に生まれました。1846(弘化3)年藩命により長崎で蘭学を学び、洋式砲術や採鉄精錬術を修め、手塚謙蔵によるヒューゲニンの書『西洋鉄鑄造篇』の翻訳に参加。安政4年釜石で洋式木炭高炉による初出銃に成功した12月1日(新暦では1858年1月15日)は「鉄の記念日」に制定され、「日本近代製鉄の父」と称えられています。また小坂・阿仁・佐渡などの鉱山を開拓し、金銀銅の精錬にも画期的な成果を収め、1890(明治23)年日本鉱業会の初代会長に就任しました。

近代製鉄への道を切り拓いた 橋野鉄鉱山

釜石には橋野をはじめ7カ所13基の高炉が立ち並び、日本最大級の製鉄コンビナートを形成しました。マニファクチャーの手工業から大量生産への転換点となり、日本の近代製鉄への道を切り拓きました。

●鉄ができるまで

紙本両鉄鉱山御山内並高炉之図 ©釜石市

[採掘]
高炉場から約2.6km離れた山中の砕石場で、鉄槌やくさびを使い露天掘りで磁鉄鉱を採掘していました。



[運搬]
採掘された磁鉄鉱をコダスやカマスに入れ、牛や人力で運び出します。



[種砕き]
種焼き窯で磁鉄鉱を焼いて不純物を除き、大きさを砕いてそろえます。



[投入]
木炭と磁鉄鉱を高炉の上に運び投入します。



[冷却]
固まった鉄鉄を池につけて冷やします。



[計量]
重さを測り、製品として出荷します。

[連続操業]
30~50日、この行程を繰り返します。

[湯出し]
高炉から溶けた鉄鉄を砂場に流し出します。



●代表的な鉄鉱石



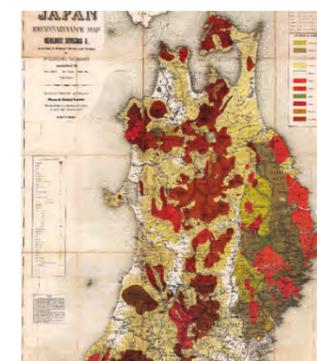
磁鉄鉱の標本 ©東京大学総合研究博物館

マグマ(岩漿)活動が石灰岩と接触して生成された釜石の磁鉄鉱原石(黒色が磁鉄鉱、茶色はザクロ石などスカルン鉱物)。鉄の含有率が極めて高く、磁石がくっつくほどの磁性があります。たたら(原料)である砂鉄も磁鉄鉱の小さな粒子ですが、花崗岩などの火成岩の風化層を粉碎・選鉱(カンナ流し)したり、風化層が川や海岸に流れ出したものを採取・選鉱して、磁鉄鉱の精鉱として使われていました。



赤鉄鉱の標本 ©東京大学総合研究博物館

38億~19億年前に海中で鉄分が沈殿して生成され、縞状鉄鉱層として世界的に分布しています。19世紀半ば北米五大湖周辺で大鉱山が発見されると、製鉄の中心地はイギリスからアメリカへと移り、1960年代以降オーストラリアやブラジルの大鉱山から日本へ鉄石が輸入されると、日本が世界の鉄鋼業をリードしました。



1886(明治19)年 東北地方の地質図

ドイツの地質学者H.E. ナウマンによって作成。日本の鉄鉱石埋蔵量は何千tで、世界全体の埋蔵量の何千億tに比べてあまりにも少なく、品質も恵まれていません。しかし、その中でも釜石エリアには磁鉄鉱が豊富に埋蔵されていました。

原料を使いこなす工夫 焙焼で磁鉄鉱の還元性を改善する

一口に鉄鉱石と言っても、いろいろな種類があります。釜石の鉄鉱石は「磁鉄鉱」と呼ばれ、欧州ではスウェーデンなどで限定的にしか使われていない鉱種でした。一方、産業革命発祥のイギリスをはじめとする欧州全般では、「赤鉄鉱」などの還元しやすい(鉄にしやすい)鉱種が使われていました。しかしヒューゲニンの書には、良質な鑄鉄生産に磁鉄鉱が適していることが記されていたため、大島高任は釜石の磁鉄鉱が理想的であることに目ざとく気づきました。

さらに還元しにくい鉱石には焙焼が必要であることも注記されており、これも見逃しませんでした。たたらでは焙焼により製鉄しやすくなることが知られており、医学の知識を持つ大島高任は、高炉の使用原料は人間と同じく消化の良いものが必要という医食同源の思想のもと、焙焼による鉄石の還元性改善を重視しました。焙焼炉の設計もヒューゲニンの書を参考としていますが、橋野ではたたらで行われていた方法に近いピット状の炉がつけられ、種焼窯と呼ばれました。

その後、官営釜石製鉄所では焙焼が軽視されたため、操業失敗の原因の一つとなりました。また官営釜石製鉄所の払い下げ後の釜石鉄山田中製鉄所でも、高炉操業は48回も失敗を繰り返しましたが、49回目で焙焼鉄石を使うことによって軌道に乗りました。大島高任の理解力の高さが感じられます。西洋の外来技術と異なる使用原料を、地域に合ったものを使いこなす工夫は、資源小国である日本の強みとして発揮されていくことになります。

貪欲に学んだ幕末の先駆者たち

江戸末期に国を挙げて日本を守るため、反射炉や高炉の建設をリードしたのは、大島高任をはじめとする蘭学者や下級武士でした。1774(安永3)年に医学書『解体新書』が翻訳されて以来、西洋の科学知識が蘭学者を中心に普及していました。特にヒューゲニンの書を西洋技術輸入の教科書として利用できた背景には、1837(天保8)年から10年の歳月をかけて発行された日本初の体系的な化学書『舎密開宗』の存在が大きく、元素や化合物、化学反応が日本語化されました。翻訳した宇田川榕菴は、さらに原著に記されているとおり実験を重ね、考察を加えたとされています。

また医学や砲術の新たな知識を蘭学に求めた学者や技術者の間には、幕藩体制の中でも身分階級の垣根を乗り越えて学び合い、競い合うネットワークが形成されました。ヒューゲニン書の完訳だ

けでも3種類、部分訳を含めると相当数の翻訳が行われ、江戸や大坂の蘭学塾、蕪山の江川邸などが拠点となり、多くの人材に学ぶ機会を提供していました。こうした蘭学の蓄積と人的なネットワークによって、200年以上を費やして確立された西洋の反射炉・高炉技術を、わずか数年でキャッチアップすることができたのです。

さらに長州藩や薩摩藩では、幕府の禁制を犯して若い藩士たちを秘かにイギリスへ渡航させ、西洋の最新知識や技術の取得を試みました。幕府もまたオランダやロシア、イギリス、フランスへと留学生たちを次々と送り出しました。産業革命による西洋の繁栄ぶりを目の当たりにした若者たちは、幕藩体制の枠を超えて日本人という意識に目覚め、産業国家日本を志すようになり、その後の明治日本の産業革命を主導していったのです。

●江戸時代後期における反射炉と高炉の分布

- 高炉(遺構が現存するもの)
- ▲ 高炉(遺構の状態が不完全なもの)
- 反射炉(遺構が現存するもの)
- ▲ 反射炉(遺構の状態が不完全なもの)



『鑪砲全書』伊東玄朴・池田才八・杉谷雅介 訳
 ©(公財)鍋島報効会
 肥前藩の蘭方医・伊東玄朴と門人・杉谷雅介らが1849(嘉永2)年、江戸でヒューゲニンの『ロイク国立鉄製大砲鑄造所における鑄造法』を翻訳。杉谷は帰藩後に大砲製造を実地で手がけ、1857(安政4)年には幕府の要請で蕪山反射炉の技術指導に派遣されました。

●明治日本の礎を築いた幕末留学生



長州五傑(長州ファイブ)

萩城下町が育んだ5人の長州藩士たちは、松下村塾での吉田松陰による教えに大きな影響を受け、「生きた器械」として日本の近代化に貢献したいという決意を抱き、1863(文久3)年イギリスへ渡り、ロンドン大学ユニヴァーシティ・カレッジなどで学びました。写真左から井上馨(のちの初代外相「外交の父」)、遠藤謹助(造幣局長「造幣の父」)、井上勝(鉄道庁長官「鉄道の父」)、山尾庸三(工部卿「工学の父」)、伊藤博文(初代首相「内閣の父」)。



萩城下町

西洋技術の導入についての政策が形成されました。

松下村塾

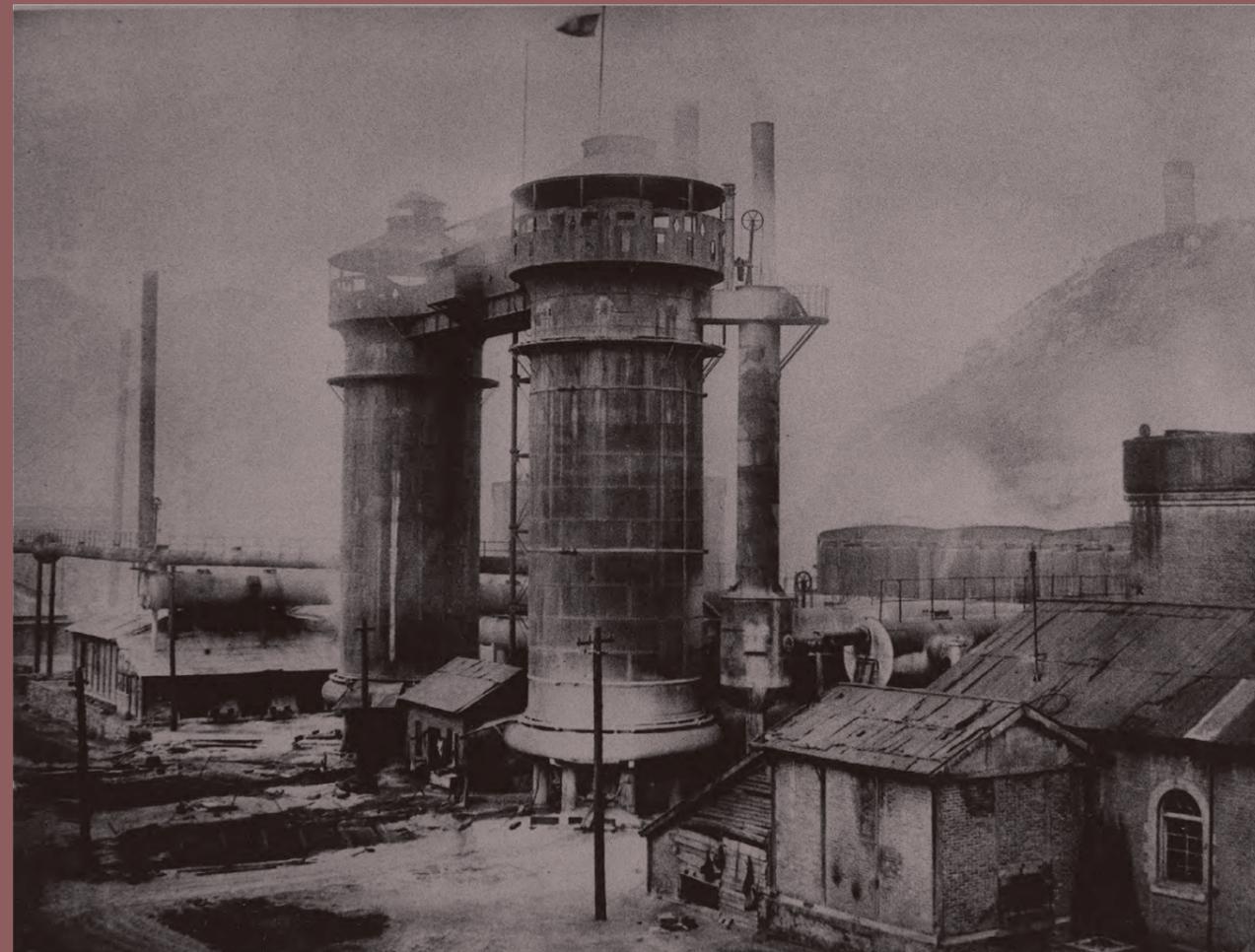
吉田松陰が主宰した私塾。工学教育の重要性を提唱し、日本の近代化を説きました。



STEP 2

西洋技術の直接導入

日本の近代製鉄の礎を築く

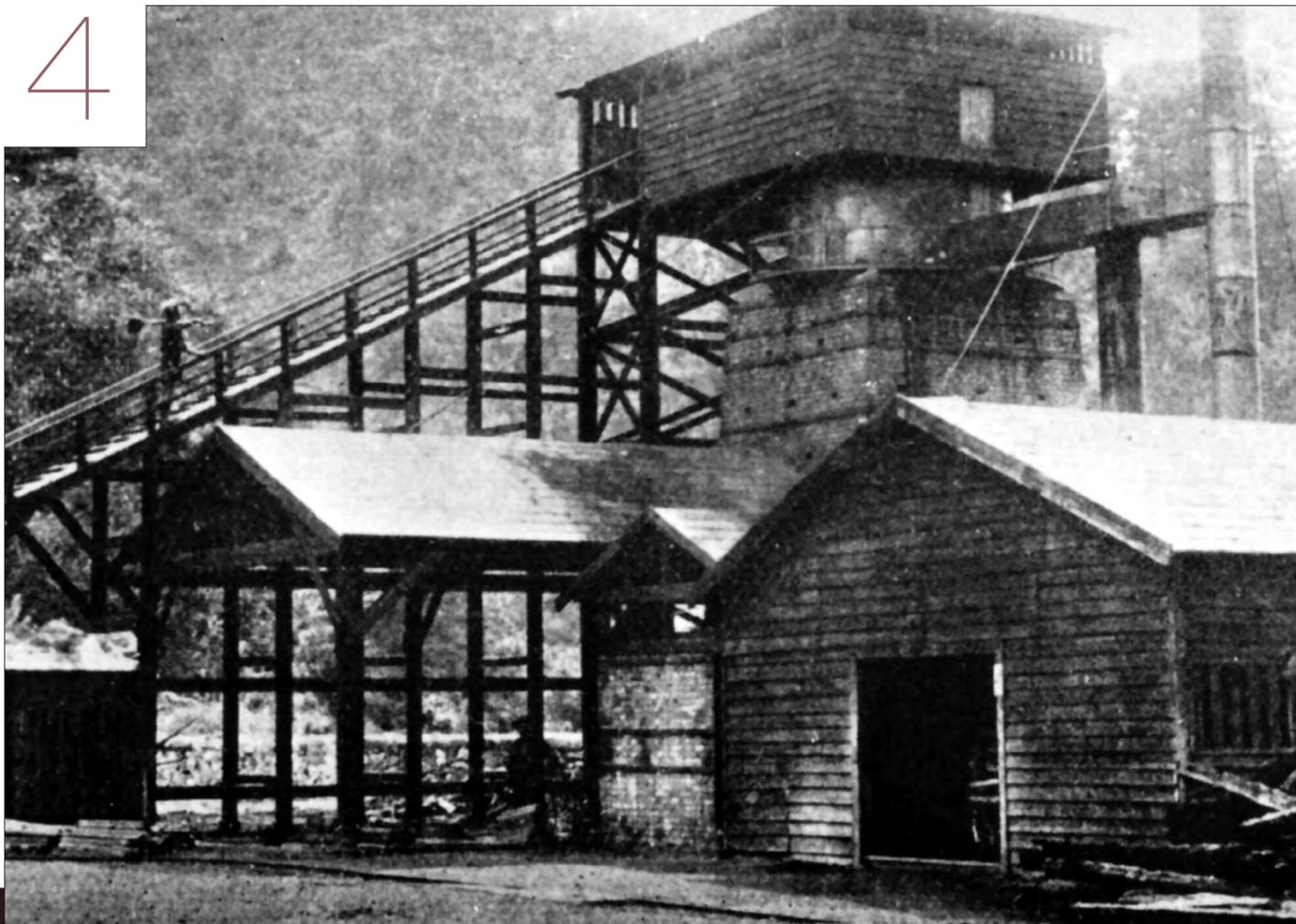


1880(明治13)年 釜石で官営製鐵所が操業©新日鐵住金(株)

日本の近代化を急ぐ明治政府は、鉄鉱石と還元剤である木炭、添加剤の石灰石を同一地域で入手できる釜石に着目しました。

官営釜石製鐵所は当時世界最新鋭のイギリスの技術を全面的に導入したものの、財政難に加え、操業トラブルが続いたことから、わずか2年余りで廃止されてしまいます。

しかし大島高任が釜石に灯した技術を受け継ぎ、民間の釜石釜山田中製鐵所として日本人自らの手で再生を果たし、産業革命の本命技術であるコークス高炉・鍊鉄生産に挑みました。



1886(明治19)年 釜石鉱山田中製鐵所が49回目で出鉄に成功©新日鐵住金(株)

官の挫折と民による再生 小さく生んで大きく育てる

明治政府は鉄鉱石があり、高炉製鉄の実績を持つ釜石に、官営釜石製鐵所を設置し、1880(明治13)年に操業を開始しました。当時としては最も進んだイギリスの製鉄技術の導入を決め、設備一式購入と技術指導を外国に依頼し、鉄の大量生産を目指しました。製鉄方式は産業革命技術本来の高炉・錬鉄生産で、鉄鉱石の採掘から始まり、蒸気機関車による鉄鉱石の運搬、高炉による製鉄、パドル炉による錬鉄製造、そして厚板やレールなど錬鉄圧延製品の生産が計画されました。ただし高炉については、釜石近隣に炭田がないためコークスではなく木炭で、最新の産業革命技術の導入とはなりませんでした。

製鉄設備の決定にあたっては、外国人技師のルイス・ビヤンヒーと大島高任の間で意見が分かれました。大島高任は大橋・橋野高炉の操業経験に加えて、岩倉使節団に随行して欧州の高炉や鉱山を視察した知見から、ビヤンヒー案の25t高炉2基では大き過ぎると考え、釜石の原料事情に合った5t高炉10基を建議していました。しかし大島案は採用されませんでした。

官営釜石製鐵所は高炉操業開始のわずか2年後、明治政府が官営としての事業継続を断念しました。官営休止の原因は深刻な財政事情、需要産業が十分育っていないこと、生産コストが輸入鉄の2倍に達して販路が限られていたことなどがあ

ますが、技術的には木炭の大量生産による脆い品質と供給不足にあったと考えられます。

1887(明治20)年、実業家の田中長兵衛に払い下げられると、釜石鉱山田中製鐵所として再出発しました。このとき高炉の規模を大島高任式の5tに戻しました。高炉操業は48回失敗を繰り返しましたが、49回目の挑戦で成功すると、鉄鉄生産は軌道に乗りました。大阪砲兵工廠から砲弾用の高価な輸入鉄鉄(イタリア製グレゴリ鉄鉄)に勝るとの評価を得て、軍需の国産化を可能にするとともに、水道用鑄鉄管など近代化により増加した民生需要に応じて事業を拡大していきました。

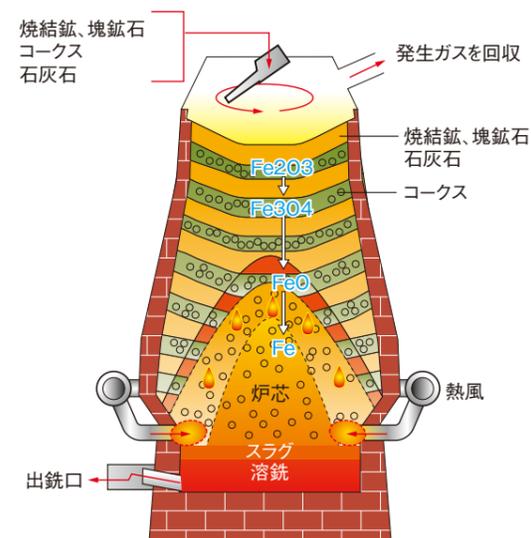
田中製鐵所では生産が順調になるほど、次第に木炭供給の限界が大きな課題となりました。そこで産業革命の本来技術であるコークス高炉として操業するため、東京帝国大学教授の野呂景義を顧問、野呂の教え子で農商務省技師補の香村小録を技師長に迎え、廃棄されていた25t高炉を改修しました。

その結果、1894(明治27)年に北海道夕張炭を原料としたコークスを還元剤として、日本で初めてコークス高炉の操業に成功すると、日本の鉄鉄生産量は高炉鉄がたたら和鉄を初めて上回りました。木炭をコークスに代えることで炉内の温度が上昇し、鉄鉄中のケイ素含有量が増加し品質が向上した結果と考えられます。

官営釜石製鐵所の挫折は、産業革命の根幹技術である鉄の国内生産の前途に大きな暗い影を落としました。しかし民間の田中製鐵所で、小さくとも絶え間ない努力で大きく育てていくという大島高任の考え方の実践によって、鉄の国産化への道が奇跡的に切り拓かれました。

撓まず屈せず。試練に立ち向かい、困難を乗り越えて、近代製鉄の礎を築いた先人たちの不撓不屈の精神は、日本のものづくりの心と技に宿り、脈々と受け継がれています。

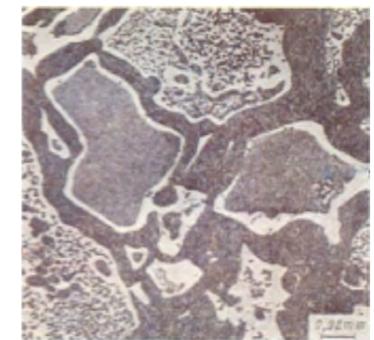
還元しやすい赤鉄鉱と 還元しにくい磁鉄鉱の違いを探る



高炉内部の様子(図1) ©新日鐵住金(株)

なぜ赤鉄鉱は還元やすく、磁鉄鉱は還元しにくいのかを科学的に分析すると、田中製鐵所で49回目に高炉操業が成功したヒミツがわかります。

まず化学成分の違いを見ると、赤鉄鉱は Fe_2O_3 (鉄1に酸素3/2が結合)、磁鉄鉱は Fe_3O_4 (鉄1に酸素4/3が結合)で、赤鉄鉱のほうが酸素を多く含んでいます。天然資源の鉄鉱石は酸素と結びついて酸化鉄として地球上に存在しているため、高炉で酸素を取り除いて(還元して)います。高炉内部では、木炭またはコークスの炭素が燃焼してできた一酸化炭素(CO)が、鉄鉱石に含まれる酸素と結びついて二酸化炭素(CO_2)とし



磁鉄鉱と赤鉄鉱の構造比較(図2)

て排出されるとともに、酸素を奪い取られた鉄の酸化物がどんどん反応して鉄鉄(Fe)ができていきます。 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ という赤鉄鉱の還元反応(図1)を見ると、磁鉄鉱は赤鉄鉱をやや還元した状態であるにもかかわらず、還元しにくいのはなぜなのかという矛盾が残ります。

しかし物質的な性質を見ると、その矛盾が解決します。天然の磁鉄鉱は非常に緻密で高密度な構造であるのに対して、赤鉄鉱から還元された磁鉄鉱は密度が低く、一酸化炭素が浸透しやすい構造になっています(図2)。つまり天然の磁鉄鉱に比べて、赤鉄鉱は酸素除去の必要量が多いため還元時間が長くなるものの、細かい穴の空いた多孔質化構造に変化することによって還元速度が速くなるため、総合すると還元しやすくなるのです。

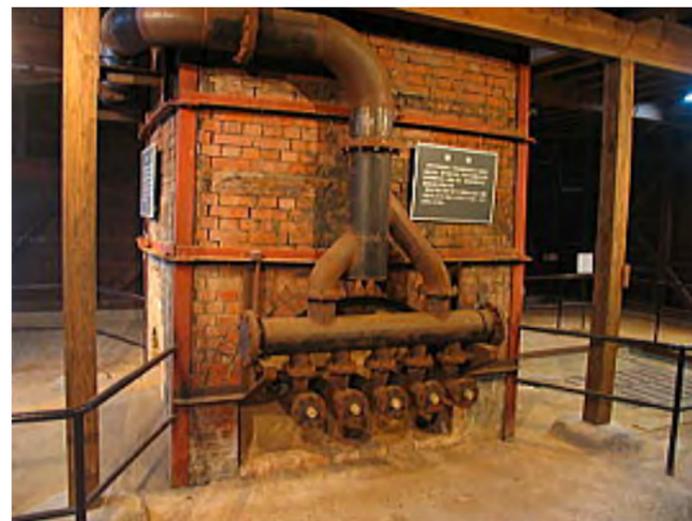
磁鉄鉱は焙焼すると酸化して一部が赤鉄鉱になり、還元しやすくなります。田中製鐵所で49回目に高炉操業が成功したときに使われた磁鉄鉱は、よく焙焼された赤っぽい焙焼鉄でした。大島高任と同じように、鉄鉱石の特徴を理解し、性状を改善する原料利用の創意工夫が功を奏したのです。

官と民の試み

明治時代の前半期には、釜石以外にも民間や官業で近代製鉄への試みが行われていました。旺盛な国内の鋼材需要に応える製鉄・製鋼技術の確立が模索されていました。

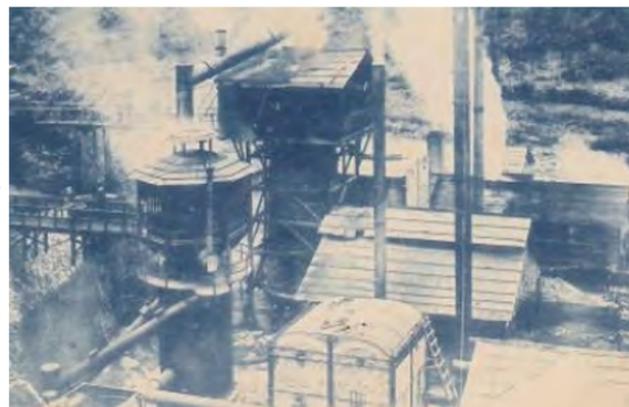
中小坂鉄山◎下仁田町

官営釜石製鉄所の開発とほぼ同時期に、中小坂(現在の群馬県下仁田町)で民間資本によって鉄鋼業が起こされていました。蒸気機関で送風する熱風炉を備えた高炉と、鍊鉄生産のためのバドル炉で構成されていたといわれ、産業革命技術を小規模ながらも日本で初めて実現していました。工部省は1879(明治12)年にこの製鉄所を買収して官業化し、るつぼによる製鋼事業を試みましたが、採算性や原燃料確保の不安から、1882(明治15)年に廃業となりました。



広島鉄山◎たたら角炉伝承館

中国山地一帯のたたら産業の救済と振興のため、1875(明治8)年に官業化されましたが、個々のたたら集合体の総称で単一事業所ではありませんでした。砂鉄を木炭で還元して連続操作が可能な角炉(写真)が開発され1893(明治26)年に操業を開始すると、たたらに代わる製鉄法として普及し1980年代後半(昭和60年代)まで使われました。広島鉄山で技術開発に取り組んでいた小花冬吉は、のちに官営八幡製鉄所の製鉄技師となりました。



和賀仙人製鉄所

実業家の雨宮敬次郎が和賀仙人(現在の岩手県北上市)に鉱山を開発し、野呂景義の設計と指導のもと、1900(明治33)年に和賀仙人製鉄所で12t木炭高炉の操業に成功しました。日本では希少な赤鉄鉱を産出していたため、良質な銑鉄が生産できました。1903(明治36)年の内国勸業博覧会や翌年のセントルイス万国博覧会で2等賞を獲得し、陸海軍工廠に納入していました。釜石とともに民営の製鉄所として先駆的な役割を果たしました。

STEP 3

産業化完成期

鍊鉄から溶鋼の時代へ



1900(明治33)年 建設中の東田第一高炉◎新日鐵住金(株) 伊藤博文首相、井上馨元外相、九州財界の重鎮・麻生太吉(麻生太郎財務相の曾祖父)ら明治日本の産業革命を主導した人々が一堂に会しました。

鋼材国産化の使命を担い、官営八幡製鉄所が1901(明治34)年に創業しました。

鋼の時代の国際競争力を持つ銑鋼一貫製鉄所として、

ドイツの最新技術と釜石の経験を注力しましたが、やはり操業トラブルに悪戦苦闘しました。八幡でもまた先人たちの努力と英知を結集し、困難を乗り越えて操業の安定化を実現しました。

これにより、日本は幕末からわずか50年余りで、

非西洋諸国で唯一産業革命をけん引した西洋の製鉄・製鋼技術の導入に成功したのです。

19世紀後半、欧米では「錬鉄の時代」から「溶鋼の時代」に転換していきました。この変化に敏感だったのが日本の陸海軍で、明治10年代(1877～86年)から積極的に製鋼技術の導入に取り組んでいました。明治政府は海軍製鋼所の設立を提出しましたが、否決されました。一方、農商務省による製鉄所新設の検討は認められ、1893(明治26)年に臨時製鉄事業調査委員会が設置されました。農商務省への移管の背景には、大型船の建造や鉄道建設が急ピッチで進み、輸入鋼材が急増し、国家財政を圧迫していた事情がありました。

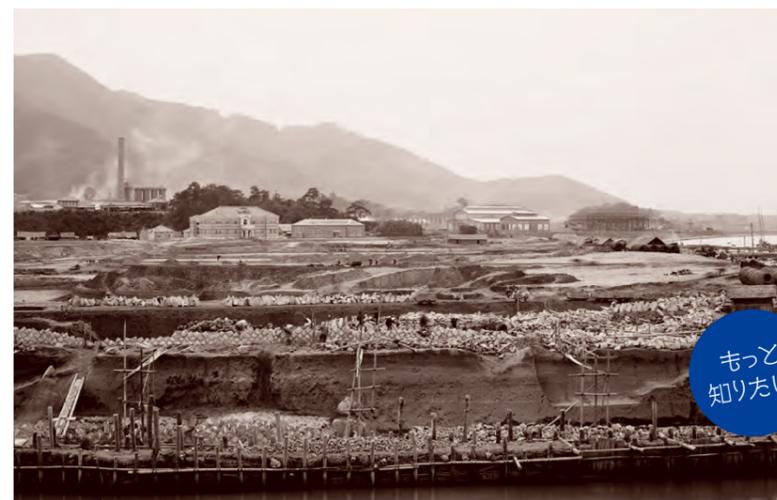
製鉄所設立建議案が1895(明治28)年、第8回帝国議会で可決されました。製鉄事業調査会が設置され、当時の採鉱冶金分野の英知を集め検討が進められました。そして農商省所管製鉄所が発足しました。製鉄所の最高技術責任者である技監職には、東京帝国大学教授の野呂景義がふさわしいと考えられていました。しかし東京市水道鉄管事件に巻き込まれたため白紙に戻され、紆余曲折を経て、大島高任の長男で銅製錬の専門家であった大島道太郎が任命されました。

立地は防御、輸送、原料供給、工場用水、労働力、資材調達、製品販売の観点から検討が進められました。なかでも石炭の確保が重視され、筑豊エリアに近く、海に面したのどかな村であった八幡に建設することを1896(明治29)年に決定しました。

原燃料を安定的に確保するため、自ら鉄山と炭田を所有し

ました。鉄鉱石は良質な赤鉄鉱を産出する赤谷鉄山(新潟県新発田市)の採掘権を三菱から買収しましたが、開発が操業には間に合わない事態が予想されました。そのころ大冶鉄山を傘下に収める清国から磁鉄鉱売却の打診があり、購入契約を締結しました。石炭は筑豊二瀬の炭田を買収しましたが、その決定の遅れがドイツへのコークス炉発注の遅れとなり、適質なコークスを製造できない一因となりました。

官営八幡製鉄所の建設にあたっては、製鋼法の選択が根本的な技術課題となりました。当時の欧米では技術革新が日進月歩で進んでいたからです。1855年に発明されたベッセマー転炉は、溶銑(溶融銑鉄)を溶鋼(溶融鋼鉄)に転換する技術で、鉄を圧延できる鋼に変えました。続いて1865年には平炉の発明によって多様な鋼材の大量生産が可能となり、1885年以降の溶鋼生産は錬鉄を上回りました。溶鋼からつくられた鋼材は、錬鉄に比べて強度がほぼ2倍のうえ、均質であることから、構造材料として極めて優れた特性を持っていたため、欧米では「溶鋼の時代」を迎えていました。それまで銑鉄は原料立地、鋼生産・加工は消費地立地で別々の離れた場所で行われていましたが、1880年代になるとドイツで銑鋼一貫製鉄所が建設され始めました。そこで官営八幡製鉄所はベッセマー転炉と平炉を併設した銑鋼一貫製鉄所が採用されました。いよいよ産業革命の最新技術に追いつく瞬間が訪れました。



1899(明治32)年 日本事務所
周辺の様子 ©新日鐵住金(株)

もっと
知りたい!

製鉄・製鋼技術の進化の歩み
⇒P33-34をチェック

官営八幡製鉄所の創業 日本初の銑鋼一貫製鉄所

ドイツ技術の 導入秘話



1896(明治29)年 海外鉄鋼視察団を派遣 ©新日鐵住金(株)
後列左から香村小録(釜石釜山田中製鉄所技師長)、小花冬吉(官営八幡製鉄所技師)、前列左から安永義章(同技師)、大島道太郎(同技監)、高山甚太郎(同技師)

初代技監の大島道太郎(写真中央)は、官営八幡製鉄所の実行計画の策定と設備機器を調達するため、アメリカ、イギリス、フランス、ベルギー、ドイツ各国の製鉄関連施設を視察し、ドイツでは母校のフライベルク鉱山学校に立ち寄りました。

フライベルク鉱山学校は1873(明治6)～1914(大正4)年の間、44人もの日本人学者・技術者が留学し、鉄冶金学の世界的権威であったアドルフ・レーデブーア教授にも学び、野呂景義や今泉嘉一郎ら、のちに官営八幡製鉄所の立ち上げに関わる人材を輩出しました。米独両国の鉄鋼業が進んでいることを目の当たりにした大島道太郎は、少品種大量生産のアメリカに対し、日本の需要構造によく似た多品種大量生産のドイツを選び、恩師レーデブーア教授に相談したうえ、師の働きによりGHH(グーテホフマックスヒュッテ)社と交渉することができました。

鉄鋼メーカーは鋼材を生産・販売することによって収益を確保する事業体であり、製鉄所建設の計画策定や操業技術の供与といったソフトウェア販売だけでは多くの対価を期待できないため、貴重な人材を派遣してまでライバルを育てる技術輸出を取り組む動機は本来ありません。GHH社は日本への協力について積極的ではありませんでしたが、製鉄所建設に必要な中核設備を製作できる機械製作メーカーでもあったため、収益機会は設備装置や建屋の販売によって十分確保できると判断したものとされます。

工場建築の 原点

1899(明治32)年 日本事務所
©新日鐵住金(株)
初代日本事務所は、中央にドームを持つ左右対称形の赤煉瓦建造物で、長官室や技監室、外国人顧問技師室などが置かれました。



1900(明治33)年 修繕工場 ©新日鐵住金(株)
製鉄所で使用する機械の修繕、部材の製作加工等を行う目的で、GHH社の設計と鋼材を用いて建設された鉄骨建造物。鋼材生産量の増大に伴って3回増築され、海外の技術導入から国産化に至る技術の発展過程を示しています。

1900(明治33)年 旧鍛冶工場
©新日鐵住金(株)
製鉄所建設に必要な鍛造品の製造を行う目的で、修繕工場と同様、GHH社の設計と鋼材を用いて建設された鉄骨建造物。製鉄所の拡張工事により増築され、1917(大正6)年に現在地へ移築されました。





1910(明治43)年 官営八幡製鐵所の全景©新日鐵住金(株)

英知を結集し、 自主技術のを確立



『熔鉱炉調査既報』
野呂景義
炉内の温度をより高温に保つため、高炉の形状を改良し、操業方法の改善を行うとともに、本格的なコークス炉を竣工するなど、日本人技術者たちの英知を結集して、最新のドイツ技術を使いこなす日本独自の生産技術を創造しました。



野呂景義
1854(嘉永7)～1923(大正12)年

日本最初の工学博士。ロンドン大学、フライベルク鉱山学校に留学し、鉄冶金学を修めました。帰国後に東京帝国大学教授と農商務省技師に就任。製鉄事業の調査、官立製鉄所設立の計画に従事し、釜石鉱山田中製鐵所や官営八幡製鐵所の高炉改良にもあたりました。1915(大正4)年日本鉄鋼協会を創立し初代会長に就任するなど、草創期の日本鉄鋼界に大きく貢献しました。

初期トラブルを乗り越えて 産業国家の屋台骨を構築する

1901(明治34)年2月、第一高炉の火入れが行われ、官営八幡製鐵所は操業を開始しました。操業にあたって技術者をドイツのGHH社や釜石の田中製鐵所から迎えました。ただし製鋼以降の工程は未完成で、作業の習熟を目的とする試製の位置づけでのスタートでした。製鋼や圧延の設備がある程度完成した同年11月、農商務大臣の主催で要人を集めて作業開始式が執り行われました。

操業開始後は数々の初期トラブルに見舞われました。ドイツの最新技術を導入したものの、当初コークス炉がなく、使用した鉄鉱石や石炭の質も西洋のものとは異なっていました。高炉の操業は高コストで、製鋼以降の工程も不調で鋼材が思うように製造できませんでした。生産量が目標の半分に満たない状態が続くなか、鋼材の製品化は思うに任せず、資金予算が不足する事態が見込まれました。そのため最もコストのかかる高炉を1902(明治35)年7月に停止し、銑鉄在庫と購入した釜石銑を使って平炉と圧延工場で生産を維持しました。

1904(明治37)年2月に日露戦争が始まり、4月に高炉の第2次火入れを行いました。わずか17日で操業を休止しました。

この事態に対して、田中製鐵所でコークス高炉の操業に成功した野呂景義に、第2次火入れの失敗の対策と第3次火入れの指揮を嘱託しました。野呂は教え子でもある製鐵所の服部漸技師の報告書などに基づいて、高炉の部分的な改造や福岡県三池炭を調査したコークスの製造などの対策を実行しました。そして7月に第3火入れを行った結果、第一高炉は安定的な操業を維持することが可能となりました。さらに1905(明治38)年には、炉体の小型化と形状を変更した第二高炉が順調に立ち上がり、優れた操業成績を残しました。西洋とは異なる性質の鉄鉱石や石炭を活かす方針のもと、日本人技術者の手で設計の見直しと改造によって高炉の操業は安定化し、鋼材の生産も設備機器の充実によって、次第に軌道に乗りました。

官営八幡製鐵所は初期操業の安定化に苦しみ、幹部の更迭や多大の追加資金の投入に迫られました。しかし日本人自ら創意工夫して困難を乗り越え、1910(明治43)年の鋼材生産は当初目標6万tを大幅に上回る15万t超を記録し、国内鋼材の90%以上を生産しました。操業後10年にして作業利益を計上し事業化にこぎつけ、西洋技術の導入を成し遂げました。

日本の風土に合わせた改善の 担い手を育てる

近代の生産技術は、より専門的な技術知識と高度な技能を持つ現場の担い手を必要とします。官営八幡製鐵所では、鉄づくりの現場で働く頭脳集団としての職工を育成するため、1910(明治43)年に幼年職工養成所を設置しました。所長に東田第一高炉改善の現場を指揮した技監・服部漸が兼務し、教授陣には現場第一線の幹部技術者を動員。製鉄技術の教科書もつくられました。

さらに日常作業を円滑に遂行するため、統一的な鉄鋼用語の手引書『独英和・英独和製鉄用語字彙』が1916(大正5)年に完成しました。これによって鉄鋼の技術と科学への理解がさらに深まり、技師だけでなく職工も日本の風土に合わせた改善の担い手となり、自主技術を確立していきました。



宿老・田中熊吉のドイツ留学時代のスケッチ

田中熊吉は1901(明治34)年官営八幡製鐵所の職工となり、1912(明治45)年ドイツに派遣され、ドイツ語を習得し高炉技術を学びました。1920(大正9)年には職工としての最高の地位である宿老となり、高炉の神様と呼ばれました。



1910(明治43)年 遠賀川水源地ポンプ室©新日鐵住金(株)

製鐵所第一期拡張工事に伴う工業用水を確保するため、八幡から11.4km離れた遠賀川沿いに設置された取水・送水施設。外観は明治建築の典型的な煉瓦建造物ですが、動力を蒸気から電気に変え、ポンプも一新して、現在も重要設備として稼働しています。

製鐵所の拡張 旺盛な鋼材需要に応える

鋼材を生産することは品質や数量などを含めた総合的な生産管理が求められます。銑鉄は基本的には1種類ですが、製鋼は6種類、圧延は形状まで含めると100種類を超え、鋼種×形状では数百種類にも及びます。さらに加熱炉やボイラーなどへの熱エネルギー、照明やクレーン、工作機械を動かすための発電、冷却や洗浄のための工業用水の確保など、鋼材生産を支える間接的な技術も求められます。官営八幡製鐵所は高炉操業が安定化すると1910(明治43)年には鋼材年間生産量が当初案の6万tに対し15万t超え、総合的な生産管理体制を整えながら拡張工事を続け、旺盛な国内需要に応えていきました。

世界遺産としての価値 日本と西洋の技術が 独創的に融合

産業革命技術は国の自立のための軍勢力や経済力を明治日本にもたらしました。日本の近代化は、産業革命をけん引した製鉄・製鋼技術の導入なくしてあり得ませんでした。

明治日本の産業革命遺産に登録されている製鉄・製鋼に関する資産群には、西洋の産業革命技術を導入するために乗り越えなければならなかった課題を克服していった軌跡をたどることができます。高炉法による製鉄技術(溶鉄の時代)を経て転炉・平炉法による製鋼技術(溶鋼の時代)に至るまで、西洋が500年の歳月をかけて培った産業革命技術を、日本はわずか50年余りで導入することに成功しました。19世紀後半、極めて短期間に非西洋世界で唯一産業革命をけん引した製鉄・製鋼技術が移植されたことは、産業化と技術の歴史において稀有な出来事でした。

産業革命当時のイギリスには、世界制覇による富の蓄積と

巨大な鉄製品の需要がありました。そして高炉操業に適した鉄鉱石と石炭を欧州で最も多く保有し、製鉄・製鋼技術の発明に挑戦する人材に満ちていました。一方、日本は鉄鉱石、石炭共に乏しく、商業資本も限定的で、産業革命をけん引した技術の成立条件として必ずしも恵まれていませんでした。しかし外来文化を柔軟に受け入れる伝統と風土がありました。

日本の鉄づくりは、古代にも中国大陸や朝鮮半島から輸入された鉄の効用を知り、その技術を導入しようとした歴史があります。このときは大陸で使われていた塊鉄石が日本に乏しかったため、代わりに粉鉄石である砂鉄を用いた独自の製鉄技術たたらが開発されました。還元しにくい磁鉄鉱を粉状で使うことで還元しやすくするという独創技術を生み出しました。日本固有の原料を活用するハングリー精神は、幕末から明治にかけての産業革命技術の導入でも発揮されました。

人類は古来より異なる文明技術の交流と融合によって発展してきました。明治日本の産業革命遺産に登録されている製鉄・製鋼に関する資産群もまた、そのことを示す普遍的な価値を持っています。西洋固有の科学的な産業革命技術と、たたらなどの日本伝統の匠の技が独創的に融合することで、西洋の延長線上にない技術が醸成され、日本の近代製鉄の礎が築かれました。その結果、1910(明治43)年には日本国内の鉄鉄の67%、鋼材の91%を生産できるようになり、ロンドン開催の日英博覧会ではメイドインジャパンの鋼材が評価され、日本は初めて世界で産業国家として認知されました。

さらに近代製鉄技術によって日本は、産業国家としての発展を加速させました。1901(明治34)年に官営八幡製鐵所で生産が始まった鉄道レールは、品質の向上とともに自給率が高まり、1930(昭和5)年には100%国産化を達成しました。また1909(明治42)年に官営八幡製鐵所の鉄を用いて製鐵所自身の設計により所内にロール旋削工場が完成すると、国産鋼材による鉄骨建造物の建設が普及し始めました。1914(大正3)年竣工の東京駅(当時は中央停車場)では鉄骨の半分以上、1936(昭和11)年竣工の国会議事堂(当時は帝国議事堂)の全ての鉄骨鋼材が、官営八幡製鐵所で生産されました。国産の鉄が近代日本の社会インフラをつくり、日本人の心を一つに結んでいったのでした。

明治日本の産業革命をけん引した鉄づくりの遺伝子は、その後も脈々と受け継がれ、20世紀後半には世界最高水準を誇る日本の製鉄・製鋼技術として花開き、21世紀の現代社会においても世界の持続可能な発展を支え続けています。

鉄が日本人の心を 一つに結んだ



1911(明治44)年 東京駅駅舎の建設工事©(株)大林組
鉄骨が組み上がった状態。鉄骨は官営八幡製鐵所のほか、イギリスやアメリカからの輸入鋼材が使われ、使用量は約3,500tにのぼりました。



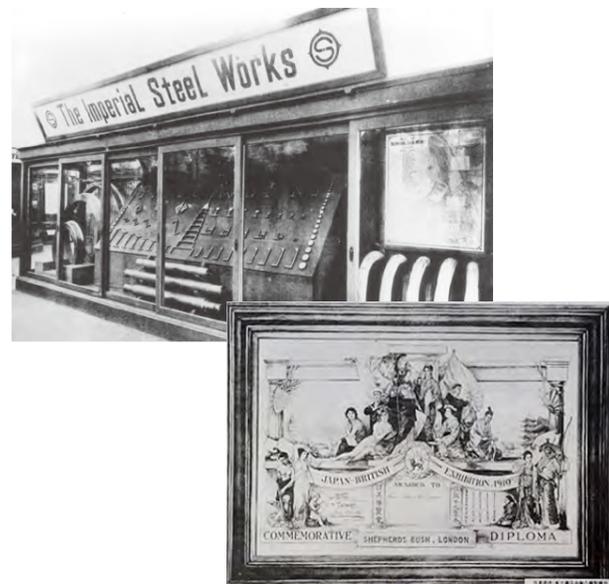
1911(明治44)年 官営八幡製鐵所製造のレール©京都鉄道博物館
当初は製造面においてトラブルが絶えず、品質も良くはなかったが、1910(明治34)年頃から質量ともに生産が安定し始めました。このレールは国産品質の向上を示しています。

1927(昭和2)年 国会議事堂の鉄骨組立全景©参議院



1920(大正9)年に着工され、17年の歳月をかけて完成。鉄骨構造の設計施工は官営八幡製鐵所の景山齊が責任者となり、9,800tにのぼる膨大な鋼材を供給しました。

Made in Japan ものづくり日本が世界に認知された



1910(明治43)年 ロンドンの日英博覧会に出展©新日鐵住金(株)
官営八幡製鐵所が出展し、日本の製鉄・製鋼技術の水準の高さを示すことで、日本が産業国家として欧米諸国に認知されるようになりました。

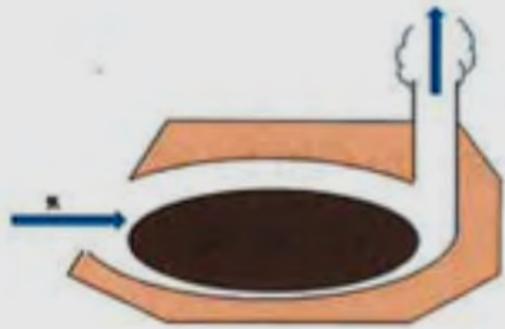


GHY(左)とYAWATAの鋼材

製鉄・製鋼技術の歩み

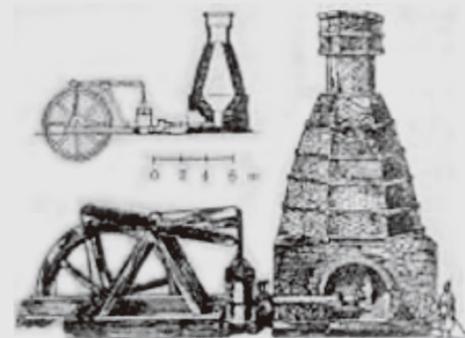
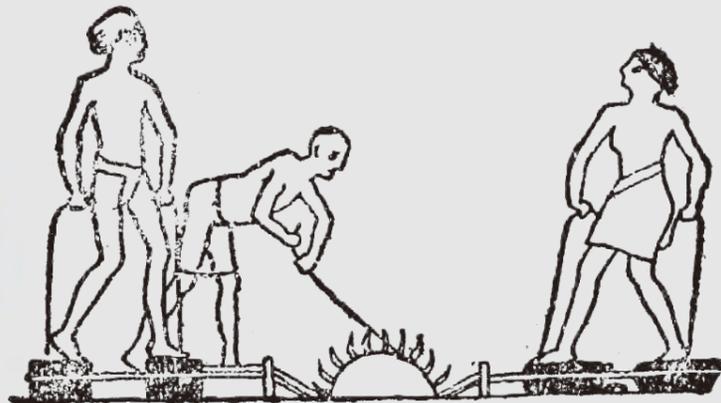
製鉄とは何か？
鉄鉱石から銑鉄をつくる技術

地球上にある鉄は、純粋な鉄ではなく、酸素と結合した酸化鉄として存在しています。鉄づくりは鉄鉱石や砂鉄に含まれている酸素を取り除くことから始まります。この酸素を除去することを還元といいます。還元反応は木炭やコークスが燃焼して生成される一酸化炭素や高温下での炭素の働きによって行われています。このように鉄鉱石から銑鉄をつくり出す技術を製鉄と呼んでいます。



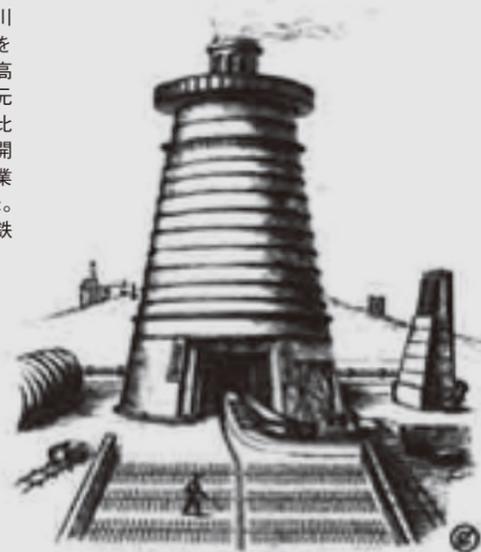
塊鉄炉 (古代)

400℃以上に熱すれば、鉄を固体のまま還元することができます。半溶融の塊となった鉄を炉から取り出し、ハンマーで叩いて炭素などの不純物を取り除きながら成形して、武器や農具をつくっていました。直接製鉄法と呼ばれ、日本では伝統的な製鉄技術たたらに相当します。



木炭高炉 (中世)

14～15世紀に現在のドイツ・ライン川流域で開発されました。水力(水車)を利用して、ふいごで効率的に空気を高炉内に送風できると、さらに鉄の還元が促進されました。溶解した銑鉄は比重が大きいため、高炉最下部に穴を開ければ取り出すことができ、連続操業が可能となり、生産性が高まりました。日本では橋野鉄鉱山や官営釜石製鉄所で技術導入されました。

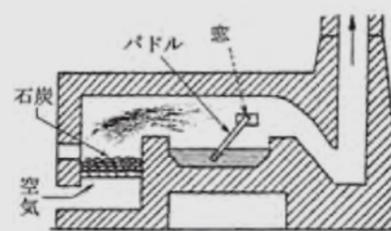


コークス高炉 (近代)

森林資源の枯渇問題に直面していた木炭に代わる還元剤として、石炭は鉄に有害な硫黄分を多く含むため利用できませんでした。しかし1709年にイギリスでエイブラハム・ダービーが石炭を蒸し焼きしたコークスを用いることで、問題を解決しました。日本では釜石鉱山山中製鉄所で初めて技術導入に成功しました。

製鋼とは何か？
銑鉄から鋼をつくる技術

鉄は炭素の含有量によって性質が大きく異なり、硬さと粘り強さ(強靭さ)を兼ね備えることができます。高炉でつくられた銑鉄を、転炉などの製鋼技術によって、炭素分を大幅に取り除くことで、強靭な鉄鋼材料をつくり出すことができました。大型化と連続操業によって高炉で炭素含有量の多い銑鉄を大量生産し、転炉で脱炭するという二段構えの製造法は間接製鉄法と呼ばれ、現代もこのプロセスで鉄づくりが行われています。

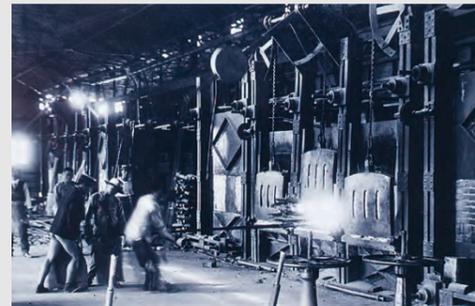


パドル炉 (1783年)

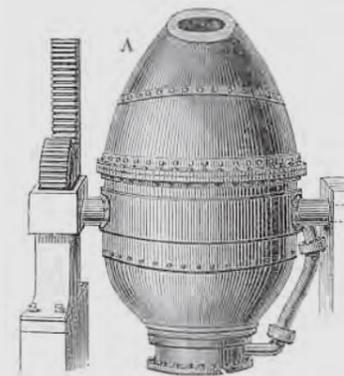
反射炉に窓を設置し、その窓からパドル(櫂)を入れて銑鉄を攪拌(パドリング)すると溶銑表面部の炭素が減り、粘り強い錬鉄がつくれるようになりました。さらにヘンリー・コートはパドル炉とともにロール圧延を開発しました。水力を利用していたハンマーから、蒸気機関を動力とした圧延機が用いられると、精度の高い成形を連続的に行うことができるようになりました。

平炉 (1861年)

ウィリアムとフレデリックのシーメンス兄弟が開発した蓄熱切替法を、エミールとピエールのマルチン父子が反射炉の高温化に応用して、シーメンス・マルチン平炉を開発しました。転炉に比べて設備費が安く、反応がゆっくり進むことから制御しやすい一方、反応時間に約10時間(1960年代には約3時間まで短縮)も要したため、1960年代を境に日本からは姿を消しました。



©新日鐵住金(株)



ベッセマー転炉 (1856年)

洋梨形の転炉に、高炉でつくられた溶銑を入れ、下部から空気を吹き込んで銑鉄中の炭素を燃焼させて脱炭します。パドル炉では燃料として莫大な木炭や石炭を必要としていたのに対して、ヘンリー・ベッセマーが発明した転炉は空気を酸化剤として化学反応させるだけでした。反応時間は約20分と速く、完全に溶融した鋼鉄を均質に効率良くつくり出すことができました。アメリカで積極的に採用され、20世紀にはイギリスを凌駕する世界の製鉄中心地となりました。



トーマス転炉 (1879年)

イギリスでシドニー・ギルクリスト・トーマスによって発明されました。鋼はリンを多く含むと脆くなってしまうため、それまではリンを多く含む鉄鉱石は原料として使うことができませんでしたが、転炉内に塩基性の耐火煉瓦を張ることで問題を解消しました。欧州大陸に分布するリンを多く含むミネット鉱が使えるようになり、ドイツは19世紀末までにイギリスと肩を比べるようになりました。

●炭素含有量で呼び名が違う

種類	炭素含有量
鉄 Iron	0.02%以下
鋼 Steel	0.02～2.1%

日本人は通常Iron(鉄)とSteel(鋼)を区別せず、鉄と呼んでいます。しかし炭素含有量の違いによって、鉄が0.02%以下、鋼が0.02～2.1%以下と区分されています。鉄に含まれる炭素量を調整することによって、近代では大きく分けて「銑鉄」「錬鉄」「鋼鉄」の3種類がつけられていました。

日本人は通常Iron(鉄)とSteel(鋼)を区別せず、鉄と呼んでいます。しかし炭素含有量の違いによって、鉄が0.02%以下、鋼が0.02

銑鉄：銑鉄を溶かし、鑄型に入れて固めた鉄。炭素含有量が2.1%以上と多いため、硬くて脆いものの、複雑な形状をつくりやすい特性があります。現在も自動車のエンジン部品などに広く使われています。
錬鉄：銑鉄を繰り返し鍛錬することで不純物を除いた鉄。炭素含有量が0.2～0.02%と極めて少なく、軟らかく粘りがあります。鍛錬では不純物の完全除去はできないので均質性に劣ります。
鋼鉄：炭素のほかにケイ素、リンなどの合金元素で鋼の性質が決まります。鋼は銑鉄と錬鉄の間でバランスがいいという特性があります。

鉄と鋼の
基礎知識

日本古来の製鉄技術たたら

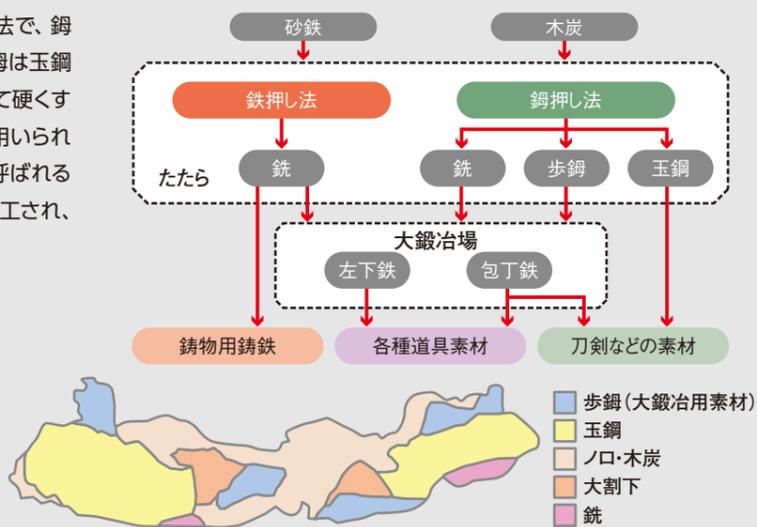
砂鉄を粘土製のたたら炉で木炭を用いて還元し、鉄から直接鋼をつくる鑄押し法と、主に銑をつくる銑押し法の2通りの製法で、鑄(鋼)、銑(銑鉄)、包丁鉄(鍊鉄)をつくり分けていました。鑄は玉鋼のもとになる塊で、叩いたり延ばしたり鍛えて、焼きを入れて硬くすることができ、日本刀などに用いられました。銑は鑄物に用いられるだけでなく、大鍛冶に運ばれて炭素を取り除き左下鉄と呼ばれる鋼や、さらに炭素含有量を減らして軟らかくした包丁鉄に加工され、釘などさまざまな道具の素材に用いられていました。



鑄押し法でできた鉄素材

銑(銑鉄)や鑄(玉鋼)の鉄素材の塊ができます。

●たたら吹きでできる鉄素材



和鉄の鉄素材ができるまで

画像：先大津阿川村山砂鉄洗取之図©東京大学



砂鉄採取

土砂混じりの濁水を水路へ流して軽い土砂と分離して、重い砂鉄を採取しました。



木炭生産

山奥から木を切り出し、製鉄に近い場所で木炭を焼きました。砂鉄は約32km、木炭は約12kmより遠くから運ぶと輸送費用が高くなり採算が合わないため、「金八里に炭三里」と言われました。



鉄素材生産(たたら炉)

鑄押しでは6人が3日間3交替で天秤ふいごを踏んで空気を送り、たたら炉の様子を見ながら原料の量や挿入間隔、送風量を変えていました。



鉄素材生産(大鍛冶)

鑄を小さく割り、混在していた銑を取り出して木炭で加熱し、錘で叩いて不純物の除去や炭素含有量の調整を行い、包丁鉄に加工しました。

鉄素材生産(針金製造)

大鍛冶でつくった割鉄を加熱して叩き延ばします(左)。さらに冷やしたまま引き延ばして針金を製造しました(右)。



鉄と鋼の基礎知識

現代の鉄づくり

高炉は鉄鉱石に含まれる酸素を効率良く取り除く(還元する)装置で、溶銑(溶けた銑鉄)をつくっています。それでは一体どのように鉄鉱石から銑鉄が生まれるのかを説明してみましょう。

まず高炉の最上部から鉄鉱石とコークスを交互に層状に入れ、下部の送風羽口から熱風を吹き込みます。熱風によりコークスがガス化して、一酸化炭素などの還元ガスを発生させます。還元ガスは激しい上昇気流となって炉内を吹き回り、炉内を下降する鉄鉱石から酸素を奪い取っていきます。溶けた鉄分はコークスの炭素と接触して、さらに還元され、炭素を5%弱含む溶銑となって炉底に溜まります。銑鉄は出鉄口から取り出され、ラグビーボールのような形をしたドーピードカーで、転炉へと運ばれていきます。

画像提供：新日鐵住金(株)

ダイナミックで繊細な現代の製鉄・製鋼プロセス

高炉で生産された溶銑は、転炉で成分を調整して溶鋼をつくり、ある一定形状の鋼片として冷却し固めていきます。鋼片にたとえ微小であっても介在物が含まれていると、優れた品質の鋼材をつくることはできません。トン単位のダイナミックな鉄づくりには、ミクロン単位を制御してつくり込んでいく繊細な技術が共存しています。



転炉

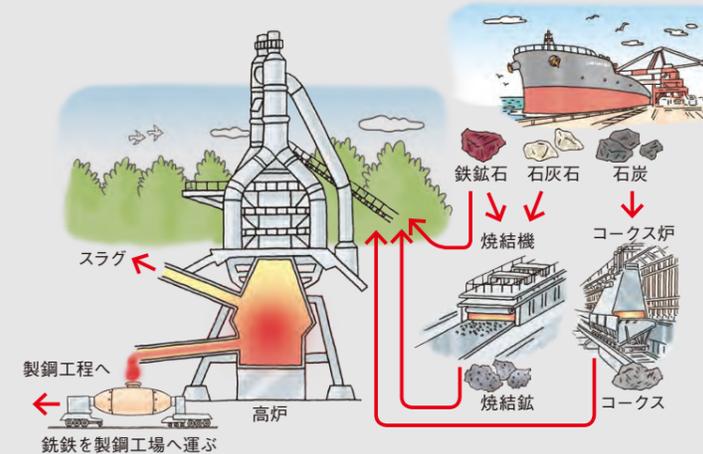
銑鉄を洋梨型の転炉に入れ、炭素などの不純物を取り除き、必要に応じて合金元素を添加して、粘り強い溶鋼をつくります。空気を吹き込み溶銑に含まれる炭素を燃やして脱炭するベッセマー転炉を原型として、現代の製鋼技術に進化を遂げました。

連続鑄造

溶鋼は固められて鋼片となり、さまざまな鋼材の半製品となります。連続鑄造では溶鋼が固まる前に介在物を取り除きます。微細な介在物を除去することで、曲げても割れない加工性に優れた鋼材を生み出すことができます。



●銑鉄ができるまで



高炉

現在使われている鉄鉱石はオーストラリアやブラジルから輸入され、5mm以下の粉状の粉鉱石が主体となっています。産地も性質もばらばらな粉鉱石の配合をそろえてブレンドし、焼き固めて還元しやすい焼結鉱に事前処理しています。



圧延

圧延はうどん粉を麺棒で薄く平らに延ばす原理と似ています。加熱した鋼片をロールで上下にはさんで押し延ばし、最終的に1.2mmまで薄くする熱間圧延では船やビルに使われる厚板などがつくられます。熱間圧延後、さらに常温で1mm以下に薄くする冷間圧延では、クルマの車体や飲料缶に使われる薄板などがつくられています。

鉄鋼製品

鉄は強いものの、「重くて、硬い」というイメージを持っているかもしれません。しかし「軽くて、軟らかい」鉄もあり、用途に応じて多種多様な性質や形状の鉄鋼製品がつくられています。鉄は変幻自在に姿を変え、私たちの社会や暮らしを支えています。

現代の私たちの暮らしと社会を支え続ける鉄

鉄は現在、最も広く利用されている“金属の王様”です。金属は自動車やビル、鉄道、船舶、橋梁などに使われている材料の約半分を占めています。その金属のうち95%を鉄が占めています。まさに鉄は空気や水のようになくてはならない存在です。今までも、これからもずっと。私たちの暮らしと社会を支え続けていきます。



船舶©新日鐵住金(株)
腐食性に優れた厚鋼板が原油タンカーに使われ、油漏れを防ぎ海洋環境を守っています。



鉄道
レールや台車、車輪、車軸に高機能鋼材が使われ、安全運行を足元から支えています。



缶詰・缶飲料©新日鐵住金(株)
スチール缶は旬のおいしさのまま中身を長期間保存でき、使用後は何にでも何度でもリサイクルされています。



橋梁©新日鐵住金(株)
吊橋の命であるメインケーブルに超高強度ワイヤ(鋼線)が使われています。明石海峡大橋では直径約5mmのワイヤ総延長が約30万km(地球7周半相当)に達しました。



パイプライン©新日鐵住金(株)
天然ガスや都市ガスを届けるエネルギー動脈に高機能鋼管が使われています。



トンネル©新日鐵住金(株)
地下鉄や道路、地下河川などに鋼製セグメントが使われ、地下インフラを構築しています。



住宅©新日鐵住金(株)
省エネと快適な住み心地を実現する鉄骨造の住宅が増えています。



高層ビル
地震に強く、溶接性を向上させた厚鋼材が、高層大型化が進む建物づくりを支えています。



スタジアム©新日鐵住金エンジニアリング(株)
軽く強い鋼材が広く美しい大空間のフィールドを生み出しています。



海底油田・ガス田開発©新日鐵住金(株)
掘削・生産設備に高張力厚鋼板が使われ、エネルギーを安定供給しています。



護岸©新日鐵住金(株)
堤防や岸壁の基礎構造に鋼板や鋼管が使われ、豪雨や津波の災害から街を守っています。



水素ステーション©新日鐵住金エンジニアリング(株)
燃料電池自動車に水素燃料を供給する配管に高機能鋼材が使われ、水素社会の実現に向け貢献しています。



自動車
車体や部品の安全性と軽量化を両立する高張力鋼板が、環境にやさしい魅力ある車づくりに貢献しています。

東京スカイツリー
©(株)大林組
縦・横・斜めに立体的に張り巡らされた最高水準の設計強度を誇る鋼管が、高さ634mの世界最大の電波塔を支えています。



貯蔵タンク©北九州エル・エヌ・ジー(株)
LNGなどのエネルギーを溜める貯蔵タンクに高機能鋼材が使われています。



火力発電所©新日鐵住金(株)
高温高圧に耐える高機能鋼材が発電所設備に使われ、電力を安定供給しています。



浮体式洋上風力発電
©福島洋上風力コンソーシアム
福島県沖に設置された日本初の浮体式洋上風力発電設備に高機能鋼材が使われ、東日本大震災の復興に貢献しています。



モーター・変圧器©新日鐵住金(株)
高機能鋼板が発電・送電・消費の各段階で発生する電力ロスを低減しています。



家電
快適な暮らしに欠かせない各種家電製品に薄鋼板が多く使われています。

鉄と鋼の
基礎知識

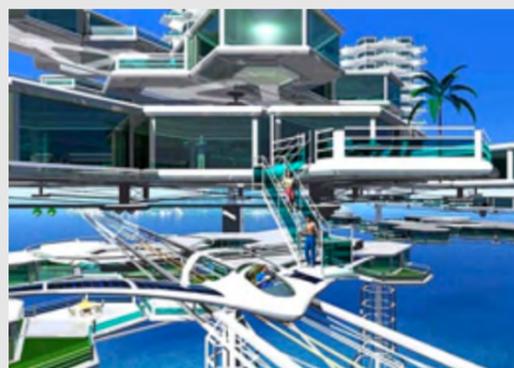
もっと強くしなやかに、未来を切り拓く鉄

現在の鉄鋼材料の最高強度は、鋼の理想強度の4分の1～5分の1程度とされています。鉄は無限の可能性を秘めた金属なのです。日本の鉄鋼メーカーでは鉄が本来持っている機能を十分に引き出すための研究開発を進めています。これからも鉄はもっと強くしなやかに、多彩な魅力を放ちながら、フロンティアを切り拓いていきます。



環境都市 GREEN City

地球の多様な生態系と共生する社会をつくるテクノロジーとして、これからも鉄のチカラが発揮されていくことでしょう。



海上へ FLOAT Innovation

海底へ OCEAN Innovation



大空へ SKY Innovation



宇宙へ SPACE Innovation

未来都市 FRONTIER City

人類の生活圏を宇宙に広げていくテクノロジーとして、これからも鉄のチカラが発揮されていくことでしょう。

画像提供: Maruko Hirofumi

