

# 鉄器時代に生きる

この原稿は 1970 年頃執筆し、放置していたものを 1985 年に推敲し、21 回に分けて社内報に連載したものである。これを原稿として、2011 年 4 月我がホームページに連載するため、ウイキペディアの画像、その他を追加・推敲したものである。

## <はじめに>

現代は「鉄器時代」といわれます。

それほど鉄は私たちの生活と深く結びついており、ちょっと目を外に向ければ、このことがよく分かります。

船舶、自動車、鉄道、橋梁、工作機械などなど、その50～80%は鉄系材料で出来ています。

プラスチックやセラミックスなどの新しい材料の開発も急速に進められているが、何故、鉄がこんなにも使用されるようになったのでしょうか。これからその理由をひも解きたいと思います。

鉄器時代の夜明けは紀元前 2000 年頃といわれています。それから今日まで 4000 年近くも続いている秘密(原因)は何なのでしょう。

これから人類の歴史を道具、あるいは金属文化の変遷として捉え、どのように進展してきたか、一緒に考えていきましょう。

私たちの祖先がこの世に姿を現したのは、およそ 200 万年前のことです。

この原始の時代の人間は強大な他の動物を抑え

て、どのように生き延びてきたのでしょうか。

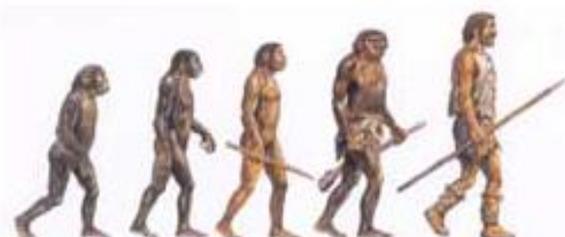
弱弱しい人間が他の動物を支配し得たのは何故か。それは道具を使うことを発見したからです。

道具の発明は他の強い動物を打ち負かすだけでなく、生活環境の変化にも適応できる、という知恵を人間に与えました。

新しく生み出された道具は、さらに人間の生存を豊かに保証し、様々な道具の発明と改良へと進み、生存をより強固に(生活をより豊かに)展開させる原動力となりました。

原始時代の農耕具である木製のクワも現代の自動化された最新の工作機も、それぞれの時代を生きてきた人類の英知の結晶であり、偉大な道具です。テレビも、自動車も、高層ビルも、旋盤も、コンピューターも、すべてこれらは人間が作り出した道具《TOOL》です。

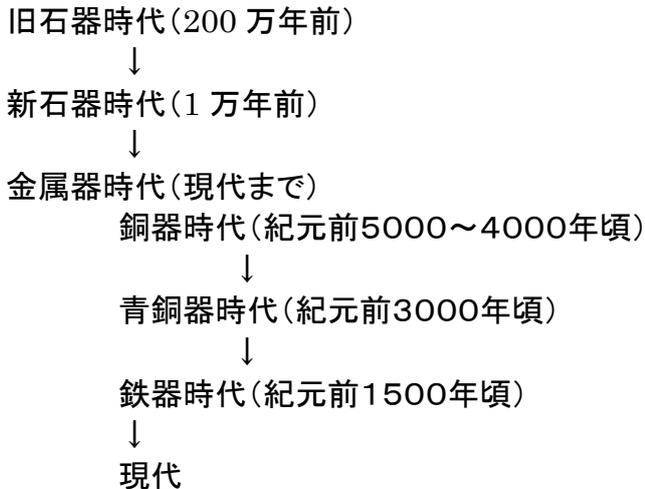
当社の主要生産品目である「切削工具」は物を作り出すための道具、すなわち、道具を作るための道具といえます。(1つづく)



旧石器時代の人びとの狩猟のようすを示すジオラマ(兵庫県立考古博物館)

## <原始時代の道具>

歴史に沿って金属文化の発展を眺めるとき、そこに人間の偉大な足跡を発見し、驚嘆します。大略、次のように分類できます。



このように原始人は200万年もの長い間、原始的な石器を主な道具として生きてきました。その後、農業技術を学んだ原始人は従来の石器に手を加え、より使いやすいものに改良しました。これが約1万年前のことです。これ以後、金属器時代に入ると飛躍的な技術革新があらゆる分野に現れてきます。

それでは石器時代からの道具の変遷をみましょう。原始時代においては身近にたくさん転がっていた「石」が最も硬い物質でした。この時代は生き残るために他の動物と戦う毎日で、道具はほとんどが「武器」として用いられたでしょう。

岩石を砕いて小さくし、先の鋭利なものは槍の穂先などにし、また手頃な大きさと形のものは斧にしました。ナイフなどの刃物は石ではなく「貝殻」で作り、獲物を開いたり、木の皮を剥いたりしたでしょう。この他、骨や木で矢じり、釣り針、穴を掘る道具を作ることも考えられています。

人間は石を加工する過程で様々なことを学びました。石の先を鋭く尖らせたり、磨いて刃先を鋭利にしたり、穴をあけたりすることもできるようになってきました。このようにこの時代ではそれほどの道具は発明されておられません。

しかし、ちょうどこの時代、人類の歴史に重大な影響を及ぼす「火」の発見があります。火は偶然発見されたものと思われませんが、この

火がまさに人間の生存を保証してきたといっても過言ではありません。

さらに、この火がこれからの金属文化発展の上で多大な影響を与えることになるのです。

旧石器時代の人間は自然によってもたらされた食物をとって生活してきました。

しかし、新石器時代の初め頃、人間は自ら食物を作り出すことを考え出しました。この偉大な技術革命が「農業」であり、「牧畜」です。

食物を生産することによって生活の地は定住し、そこに社会が生まれ、生活構造に根本的に変革を与えました。さらに、食物を保存することによって毎日採集する必要がなくなりました。農業には今までにない全く新しい道具が必要となり、数多くの様々な道具が発明されるようになってきました。

そして、この頃から人間は自然界に存在する美しい金属を少しずつ知ることになります。もちろん、当時は鉱石から金属を溶錬して作り出すことなど知られていませんから、もっぱら自然界にころがっている金属だけです。すなわち、自然金、自然銀、自然銅などで、いずれも美しい光沢を放ち、人目につき易かったためと思われれます。

これらの金属は軟らかく、加工しやすいため石でたたいて伸ばし、またたくさん手に入るものではなかったため主に装飾品や美術品などに使われていました。古代エジプトで発見された黄金製品は紀元前6000年の昔に作られたものと言われています。

なお、鉄も金や銅同様に、ごく稀にはあるが自然界に存在していたようです。しかし、鉄は原則として自然には出来ない金属です。鉄は酸素と結び付き易く、地球上では酸化して鉄鉱石になってしまうからです。自然鉄は地球上のものではなく隕石によるものと考えられます。

この地球には年に数千から数万という数量の隕石が天体から落下しますが、この一部が自然鉄として人間の目にとまったわけです。

隕石のほか、砂鉄なども存在しましたが、砂鉄はもっとずっと後にならなければ実用化されませんでした。(2つづ3)



スクレイパーとよばれる  
剥片石器



後期旧石器時代に作ら  
れた釣り針。材質は動物  
の骨



磨製石斧



### <金属文明のあけぼの>

自然銅や自然鉄も当時の人間にとっては石ころと同程度の価値しか認められておらず石の代用品として用いていたにすぎませんでした。

それではどのようにして銅が広く知られるようになったのか？おそらく、銅の製法はステンレス鋼(不銹鋼)同様、偶然に発見されたものと考えられます。銅は美しい銅赤色で人目につき易いが、同様にして銅鉱石も青緑色その他の美しい色を持っています。

従って、古代人にはこの石ころ(実際は鉱物)が神秘的なものに見えたことでしょう。焚き火を囲う石にこれらの鉱石が混入しただろうことも容易に推察できるし、また好んでこの美しい石を使ったかもしれません。焚き火の燃焼によって鉱石は還元され、さらに焚き火で強熱されて不純な金属銅が炉底にたまり、冷却固化したことでしょう。これ

を発見した人々はどのような原理でこのような美しいものができたのか理解できなかったが再三の経験により焚き火を熱してその中に美しい石を投入すれば銅赤色の金属銅が得られることだけは知ったのです。

また、炉底の凹みにたまった銅を見ると底の形と同じ形状をしており、これから鑄造することを知ったことでしょう。その後、銅の製法技術が進歩し、炉・燃焼方法等に改良が加えられ、かなり大量に作られるようになりました。

この銅の溶錬技術と鑄造技術は紀元前4000年頃メソポタミア文明によって生み出されました。しかし、これらの銅は何と言っても軟らかすぎて労働用具には使用できませんでした。ところがある時、偶然に今までよりも硬くて強い金属ができました。(3つづく4)



青銅器時代の武器や装飾品



青銅器時代 - Muséum de Toulouse

これが青銅であったわけです。青銅は銅と錫(すず)の合金ですが、銅鉱石の溶錬をしている時、鉱石の中に偶然この二つの金属を含むものがあり、溶錬によって合金化されたのでしょう。

色も多少黄色っぽいので古代人にもすぐ判りましたが、どうしてこういうものができたのか？その原因(錫の含有)が解らなかつたため優れた金属ではあったが偶然にしか手に入らず、貴重な金属でした。

その後の絶えざる研究により溶錬技術は急速に進歩し、銅よりも硬くて強い金属(合金)〈青銅〉がほぼ紀元前 3000 年頃のメソポタミア付近において意識的に作られるようになり、このときには「錫」の存在が理解されていました。

とはいえ、合金銅の製造は非合金銅の場合より技術的に困難が多く高価であったため、労働用具や日用品にはあまり使用されず、もっぱら戦争用の武器や装飾品や美術工芸品などに用いられていました。

これが農具などの労働用具に用いられるようになったのは銅と錫の両金属を別々に精錬し、かつ

それぞれの含有量を制御できるようになってからであった。

この技術の開発で青銅の価格はかなり安くなったが、一般にはまだまだ貴重な存在だったから農業を飛躍的に向上させるほどには用いられなかった。従って、当時は旧来通りの石器と木製の道具で農業を行う原始的農耕に甘んじ、農機具の金属化は次にくる「鉄器」の普及まで待たなければなりませんでした。

高価な青銅ではあったが、時の権力者はこれを武器として戦争に用いられ、槍や剣として目覚ましい効果を発揮しました。飛躍的に進歩したと言えばこの戦争技術といえるでしょう。

これ以後の金属文化発展において、様々な金属器が戦争に利用され、金属と戦争は相互に密接に関連しあって進歩していきます。新しい金属の発明によって新しい戦争技術が生み出され、逆に戦争の勃発が新しい金属を生み出すという全く皮肉な現象が現代まで続くことになるのです。

(4つづく5)



当然のことながら、これらの技術は人間社会そのものにも著しい影響を及ぼし、社会の変革を促進させるわけですが、社会文明の発展についてはここではふれないことにします。

青銅器とその製造技術は以後、世界各地に広がってゆき、文明の進歩発展に多大な貢献をすることになります。

例えば、お隣の中国では中央アジアからの民族移動(アーリア民族)によって伝えられたとされる意見や、中国独自に発明されたという意見と両方あって、いまだにはっきりしていません。

いずれにしても紀元前 2000 年頃起こった殷王朝時代の中期(紀元前 1500 年頃)には青銅器が数多く使用された跡が見られます。

この後の周時代(紀元前 1000 年頃)は青銅器の全盛時代といわれるほど多量に用いられており、驚くべきことは、この時代すでに青銅器の成分規格が作られていたことです。

この成分規格は錫の含有量を規定したもので、「周礼考工記」という本の「金の六齐」で、錫の量によってその用途が定められています。

「齐」というのは《等しくする》というような意味で、現在でいえば「標準規格」ということになります。そこには次のように書かれています。

しょうてい せい 鐘鼎の齐	錫14%…鐘、要などの鳴り物
ふきん 斧斤の齐	錫17%…斧
かげき 戈戟の齐	錫20%…鉞(ほこ)
たいじん 大刃の齐	錫25%…刃物
さくさつし 削殺矢の齐	錫30%…矢じり
かんすい 鑑燧の齐	錫50%…鏡、火打ち金
(5つづく6)	



前漢代の青銅製灯明具(中国)



青銅は錫の含有量を増やしていくと急速に硬くなるので、この齊(規格)は特性に合った用途であることが解ります。いかに周時代の青銅製造技術が進歩していたかお分かりでしょう。

この青銅器はその後春秋戦国時代(紀元前 600年頃)に入ると武器として非常にたくさん製造され青銅器の特徴がフルに発揮されるのです。

ところで、青銅(Bronze ブロンズ)の呼び名は古代ローマ帝国の時代、青銅器を作る工場で有名な都市「ブルンドウズイウム市」がありました。現在はイタリアの「プリンディシ市」となっていますが、ここから生まれた名前だと言われています。

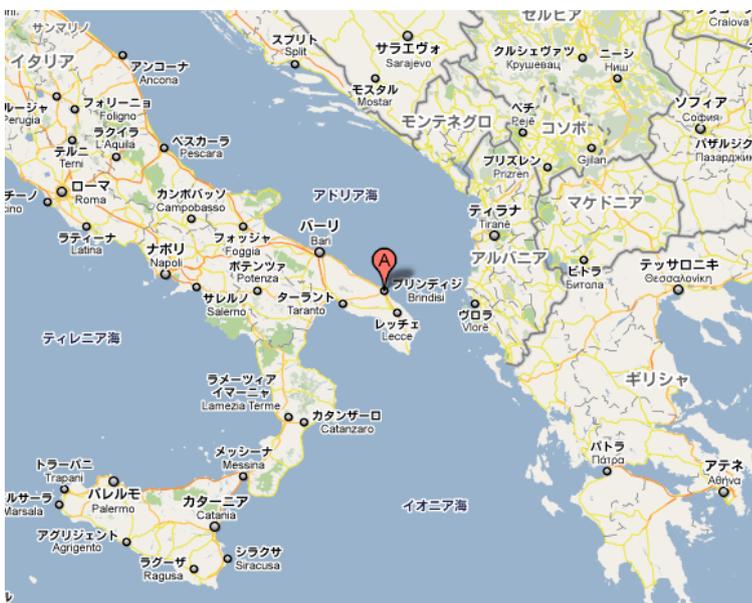
さて、2000年にわたって青銅器時代を見てきましたが、この頃には大陸の西方、西アジアでは鉄が相当量製造され、使用されていました。鉄は人類の歴史を根本的に変えるほどの大発明であり、私達が今日こうして存在し得るのもこの偉大な発明があったればこそともいえます。

それでは人類に輝かしい未来を約束してくれた鉄の生い立ちを探ることにしましょう。

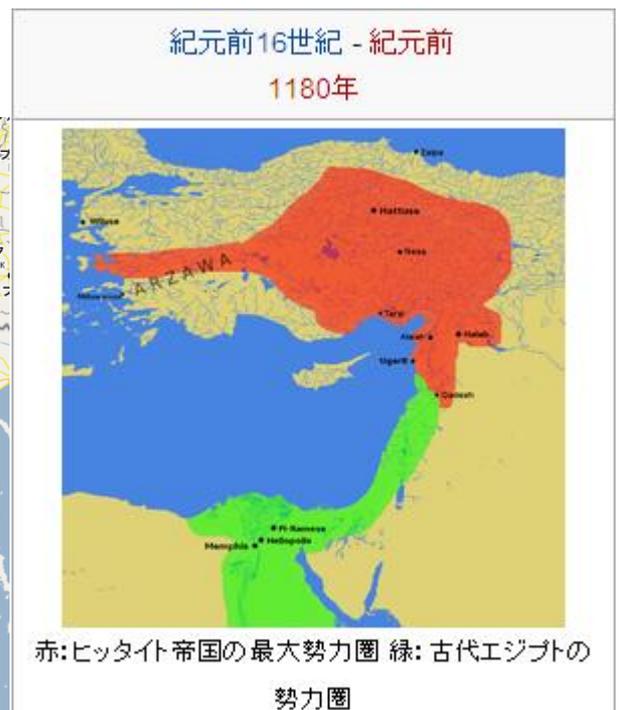
よく知られるように鉄の資源(鉄鉱石)は世界各地に分散しており、製鉄技術もそれら各地の人々によって開発されたものと思われませんが、ここに特に鉄を大量生産し、その鉄の威力によって大帝國を築き上げた種族がありました。

それは西アジア(現在のトルコ地方)に紀元前2000年頃から活躍したヒッタイト人であり、紀元前1500年頃には鉄精練が本格的に行われたようです。ヒッタイト人はまさにこの鉄製武器の全面的使用によって西アジアから中央アジアの一部、エジプト方面へと勢力を拡大し、大統一帝國を築くことができたのです。

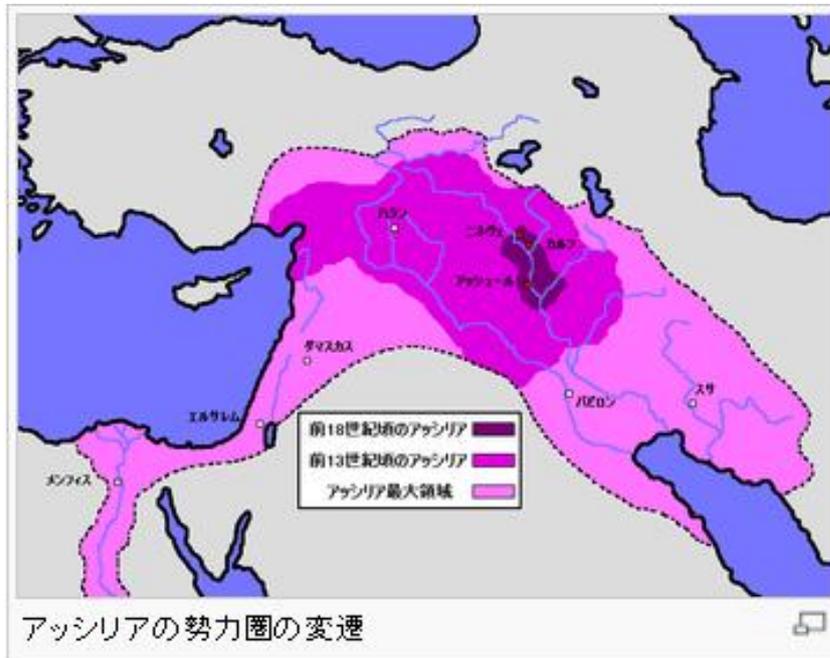
この製鉄技術はヒッタイト国王の嚴重な秘密政策によって独占され、ヒッタイト帝國の滅亡とともに徐々にエジプトへ、中央アジアへと伝わりました。ヒッタイト帝國のあと、紀元前1000年頃、新しくアッシリア帝國により再びメソポタミア地方は統一され、鉄器の生産も著しく増大しました。(6つづく7)



Bronze(青銅)の呼び名発祥の地「プリンディシ市」の位置



赤:ヒッタイト帝國の最大勢力圏 緑:古代エジプトの勢力圏



紀元前850年頃のアッシリア帝国はその軍隊全部を鉄製の武器で装備していたといわれ、その力がいかに強大であったか推察されます。このように初期の鉄器は主に武具として戦争に用いられていました。このことは、その当時の製鉄技術の水準からも無理からぬことではありました。その後、生活に密着した農具の製造へと進み、農業生産の飛躍的な増大を実現。名実ともに強大な国家となりました。

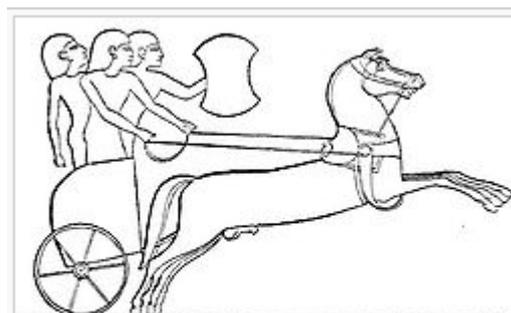
以後、製鉄技術は東ヨーロッパから中央アジアを経由して中国へと伝わることとなりますが、その前に古代人がいかにして鉄を見つけ出すことができたのか、また製鉄の技術においてどのような問題があったのかを考えてみましょう。

鉄鉱石は鉄と酸素が結びついた褐色あるいは黒褐色の硬くてもろい石です。また鉄は銅に比べる

と融点が高く(鉄1540℃、銅1083℃)、今までのような原始的な炉では溶かすことができません。しかし、鉄には非常に重要な性質があります。

それは鉄と酸素との結びつきを破壊(鉄の還元)することが銅の場合よりはるかに低い温度で起きることです。鉄鉱石を木炭の中に入れ燃焼させ、送風して強熱すると、木炭の燃焼によって炭素が鉄鉱石の酸素を奪い、炭酸ガスとなって逃げ、そのあとに鉄が残るわけです。このときの鉄は海綿のようにたくさんの穴があいているため海綿鉄と呼ばれています。

古代においてはもちろん木炭などはありません。従って、意識的に鉄を作ることはほとんど不可能です。鉄もまた銅のように偶然出来たものを発見したと考えたほうが正しいでしょう。ここで鉄の発見を推理してみることにします。(7つづく8)



エジプトの壁画に表現されたヒッタイト軍の戦車

古代の人々は火が良く燃えるようにたき火の周りを石（中には鉄鉱石もあった）で囲ったことでしょう。このとき、焚き火の炭素と鉄鉱石の酸素が結合し、古代人の知らない間に鉄が還元され、かまどの一部にスポンジ状の鉄があるのを発見できた。

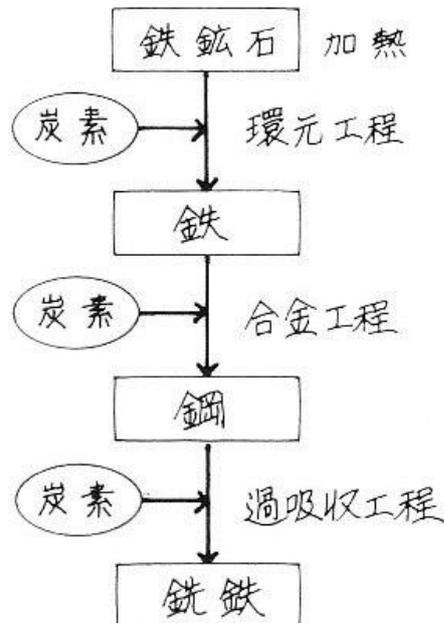
その金属は叩いて伸ばすことができた。また、熱して叩くとどのような形にも加工することができました。ところが、このままの鉄では軟らかすぎて使い物になりません。

鉄の精錬は炭素の還元によるものであるため温度、時間によっていつもこのような軟鉄ばかりではなかった。

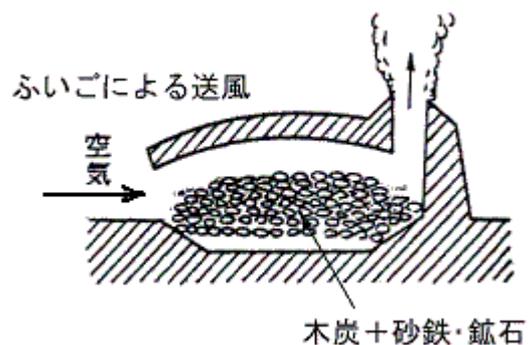
炉や送風方法の改善、燃料などなどの研究開発によって加熱温度は高くなり、また精錬時間を変化させて硬くて強い鉄《鋼》の製造技術を習得していきました。

しかし時として、さらに炭素を含んだ銑鉄（鑄鉄）になることもありました。銑鉄は非常に脆く、このままでは割れてしまって当時の技術では使い物にならず、多分捨てていたでしょう。

このように鉄精錬の難しさは炭素の吸収によって三段階に変化することです。この関係を次に示します。（8つづく9）



東アフリカ Makololo 族の鉄加工の作業図  
 (D. Livingstone, Neue Missionsreise vol. I)



(引用: FN の高校物理)

古代における製鉄はもっぱら炭素による鉄の還元のみであったため、低炭素の軟らかい鉄しか製造できず、道具に使用できるものではなかった。いろいろ試すうち、軟らかい鉄を木炭とともに強熱し、何回もハンマーでたたくと硬くなるのが解ってきました。ハンマーで叩くと表面の炭素濃度が高くなり、次第に鋼へと変わっていったと思われます。これでやっと道具として使える段階になりました。

鋼は今までの金属＝青銅＝よりもはるかに硬くて強い金属で、なによりも安く作ることが可能でした。さらに驚くべきことにヒッタイト帝国ではこの鋼を焼き入れ処理していることです。焼入れ法も前述した通り秘密とされ、その後、数世紀の間、独占的にこの技術を使用して軍事的優位に立ち、帝国繁栄に大きな役割を果たしています。さて、再び製鉄技術の伝播を見ましょう。

西アジアにおける偉大な製鉄技術は中央アジアからインドを通過して中国に伝わりました。青銅とは違い、鉄器は明らかに他の国から伝わったもので、中国が独自に発見したものではないことが解っています。中国で鉄器が使用されたのは春秋時代の前半（紀元前700年頃）のことで、戦国時代（紀元前600年頃）には様々な鉄器が製造され、中国に繁

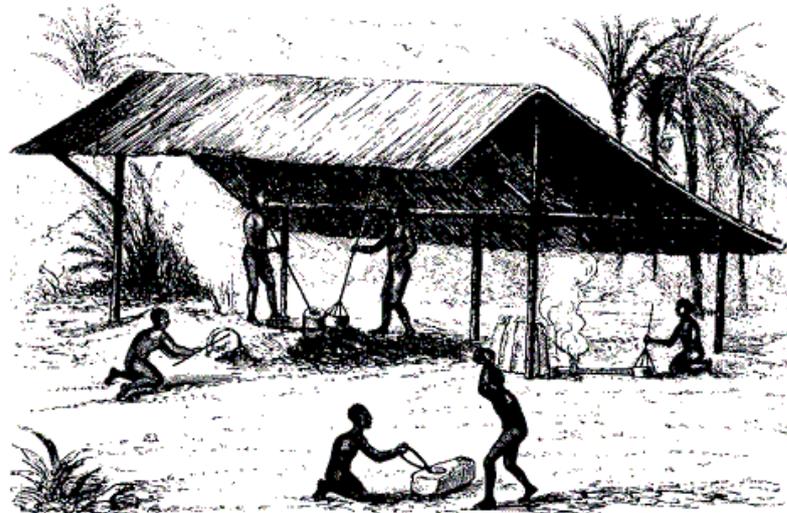
栄をもたらした。また鉄製農具は農業生産を飛躍的に向上させ、前漢帝国（紀元前200年頃）の経済的基盤を築いたとも言われています。

中国における鉄器には極めて重要な特徴があります。古代ヨーロッパでは今まで述べてきたように銅も鉄も「鍛錬」できる金属で、鉄も鍛錬できる「鍛鉄」でした。しかし、中国ではもっと炭素含有量の多い「鑄鉄」が先に使用されました。鑄鉄は脆くてそのままでは鍛錬できないため望みの道具を作るにはまったく厄介な金属です。

今日、我々がズク（銑）というのもここからきています。銑鉄を使いこなすには優れた鑄鉄技術が必要なのです。中国では紀元前700年頃には小規模ではあるが鑄鉄技術を会得しており、このことは世界に誇れる大発明といえるでしょう。

戦国時代（紀元前600年頃）に入ると鉄の精錬技術も進歩し、加えて優秀な鑄造技術によって様々な鉄製の農具や工具が作られるようになりました（鋤、鍬、鎌、斧、シャベルなど）。

特に農具などはあまり鋭利である必要がないため鑄造製品がかなり出回っていた。鍛鉄が使われ始めたのは、2、3世紀後の戦国時代中頃からであった。（9つづく10）



南アフリカ Wane-Kirumbo の製鉄場  
(H. Stanley, durch den dunkeln Weltteil, Leipzig 1878年)

(引用: FN の高校物理)

ヨーロッパでは逆に鍛鉄が先に作られ、鑄鉄はずっと遅れて14世紀頃ドイツのライン地方で初めて生産されるまで鍛鉄の時代が3000年も続くことになります。

面白いことに中国では青銅を「美金」と呼んだが、鉄のことは「悪金」と呼び鋤や鍬などの労働用具とか、雑な製品を作るのに好んで用いられたことです。鉄は黒くて鈍い光沢を持ち見るからに汚い感じがするが、青銅は美しい光沢をもった気品高い感じがするからでしょうか。

こうして製鉄技術が世界各地に広まっていった最大の原因は何と言っても青銅に比べ安くできることと、鉄鉱石の資源が豊富で、しかも各地に分散していたからです。銅資源がある限られた地域にのみ存在していたことはその鉱石を運搬するのに莫大な費用を必要とします。結果的に青銅は高い価格にならざるを得ません。

青銅がようやく一般的に用いられようとしたこのとき、それよりもっと経済的で優れた金属＝鉄＝が出現したため各国は先を争って鉄器の製造に努力し、鉄の需要は急激に増大しました。

しかしながら今までの製造方法では増大する需要を充たすこと無理でした。もっと大量に製造するため、溶錬炉の大型化、燃料炭の改良、送風方法の強制化などの改良が進み、今までのような海綿鉄ではなく、もっと炭素分を含みドロドロに溶けた鉄が炉底に溜まるようになりました。

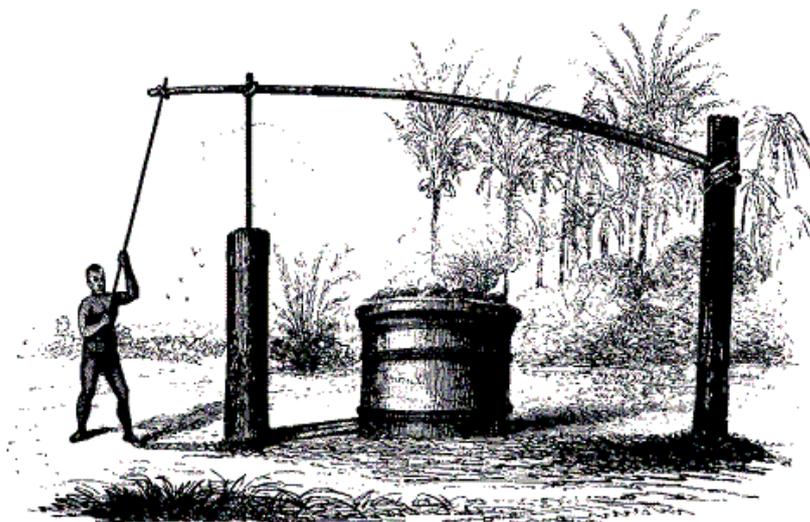
こうして炉の上部から原料(鉄鉱石、木炭、石灰)を投入すると、しばらくして炉の底では溶けた液状の鉄が得られるという製鉄作業の連続化に成功し、大量生産が可能となった。しかしここで困難な問題に直面しました。それは前にも説明した通り、鉄は過剰に炭素を吸収すると鋼を通り越して硬くて脆い銑鉄(鑄鉄)になってしまうことです。

鉄は大量に欲しい。しかし多量に作ろうとすると鍛錬ができず強靱な器具を作ることのできない脆い鉄ばかりできてしまう。この問題を解決するのに当時の冶金技術者がどれほど苦勞したことか、その努力は到底言葉では表現できるものではありません。人々が銑鉄から鋼を作る方法を学びとるまでにはこれから先長い年月が必要となるのです。

さて、これまでに3種類の鉄と炭素の合金を知りました。

- ① 鉄 炭素含有量の極めて低い、純度の高い鉄(炭素0.01~0.04%)
- ② 鋼 炭素含有量が0.04~1.70%程度までの鉄
- ③ 銑鉄 炭素含有量が1.70%以上の鉄(最大6.67%)

そしてこのうち実用化されたのは主に鍛錬可能な鍛鉄であるため、この時代を「直接製鉄時代」と呼んでいます。(10つづく11)



ボルネオにおける直接製鉄 (Schwaner の 1843~1847 年の旅行記) (引用: FN の高校物理)

## <近代製鋼技術の夜明け>

ヨーロッパ地方における製鉄産業は13世紀頃の銑鉄の出現により新たな技術的問題を解決しなければこの金属を広く利用することさえ困難となりました。

銑鉄の利用技術＝鑄造技術＝は一向に進展せず、ようやく15世紀頃になって鑄造品を作れるようになったが、これを中国の状況と比較すると実に1000年も遅れていることが解ります。

17世紀初めイギリスのダッドソーは従来の木炭に変えて石炭を燃料として製鉄したが、石炭を燃やすには木炭の場合に比べて大量の空気が必要でした。

また石炭には大量の硫黄分が含まれているため出来上がった銑鉄の品質は今までよりはるかに悪いものでした。

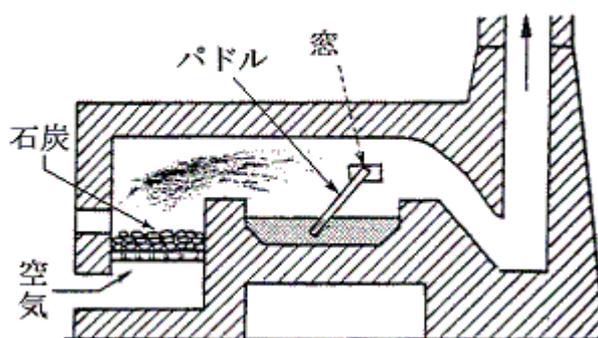
しかし石炭は木炭より燃焼熱量が高く、炉内の温度を著しく高めることができるので、何とかこの石炭を燃えやすく、しかも硫黄分を少なくできないものかと研究しました。

そして、ついに1735年イギリスの製鉄工場主ダービー2世は石炭をコークスにする方法を発明し、製鉄に初めてコークスを使用しました。このコークスの発明は以後の鉄精練に巨大な影響を及ぼすこととなります。

ところで、溶鉱炉からドロドロになって流れてくる鉄は炭素を多量に含んだ銑鉄（鑄鉄）でした。この銑鉄はこのままでは鍛錬や鍛接できません。そこで多量に含んだ炭素を除去してやれば強靱な鋼鉄となります。

精練工程の最初から炭素量を管理するのではなく、後から過剰な炭素を取り除いてやる。非常に回りくどく、不経済な方法と思うかもしれませんが、実はこの方法が鉄の有効利用から考えて最も経済的なのです。

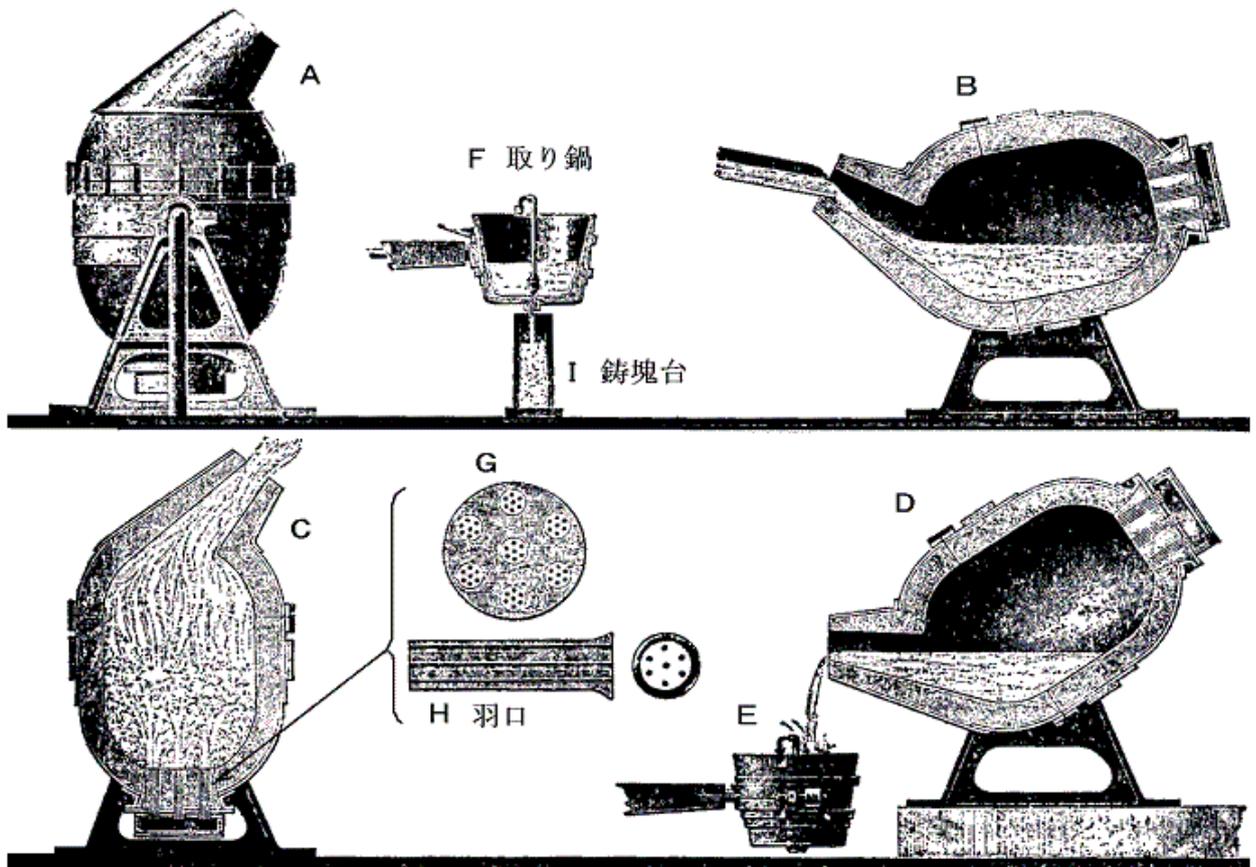
そして、製鉄と製鋼とは立場は逆でも酸素と炭素の激しい闘いといえます。近代における研究テーマは銑鉄をいかにして品質の優れた鋼鉄にするか、ということでした。そして、19世紀に入るや否や次々と新しい製鋼法が発明されていきます。  
(11つづく12)



(引用: FN の高校物理)

<1855年> ベッセマー転炉法の発明(酸性転炉)

イギリス人、ベッセマーは溶銑中に空気を吹き込むことにより不純物や炭素を燃焼させ除去しようとした。しかし、Si や Mn を含んだ銑鉄には効果的であったが S、P は除けなかった。



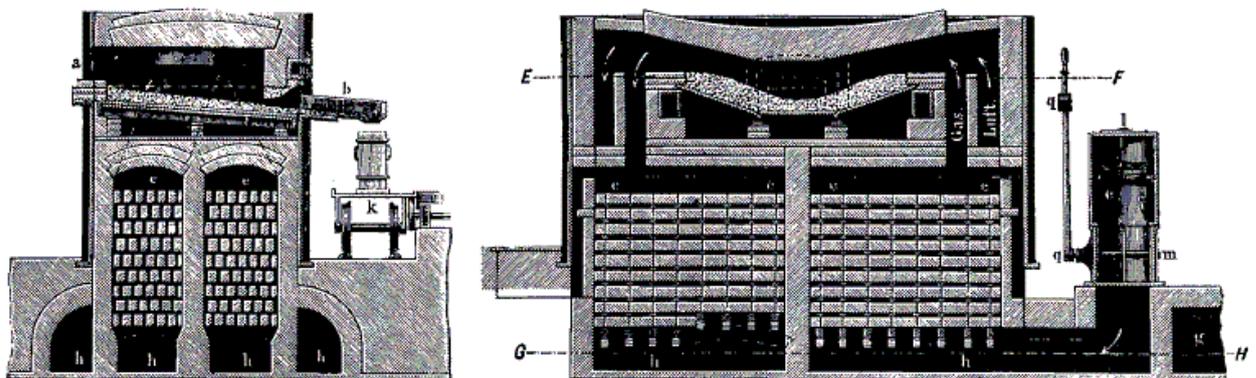
最初のベッセマー傾注式転炉と取りなべの形状(1860年)

(引用: FN の高校物理)

<1864年> 平炉法の発明(蓄熱式平炉法)

フランス人、エミール&ピエール・マルタン父子  
従来は燃料も空気も常温のままであったが、マルタン父子はこれらを予熱して燃焼効率を著しく改善した。この方法は余熱のための特別の炉(蓄熱炉)を必要としたため別名「蓄熱式平炉法」ともい

われ、また発明者の名をとって「マルタン法」とも言われている。このような優れた熱効率は屑鉄等も溶解することが可能でした。屑鉄を処理できないベッセマー転炉は徐々に平炉に駆逐されていった。(12つづく13)



マルチンの使用した最初の平炉

(反射炉の下側に空気とガス燃料の為の蓄熱室が各2室合計4室2列に配置されている)

(引用: FN の高校物理)

<1878年> トーマス転炉法の発明  
(脱燐吹製鋼法) <イギリス人、トーマス

ベッセマー転炉法の S、P が除去できない欠点を改良するため炉の内張りを塩基性材料で作ることに成功し、脱燐が可能となった。

<1880年>  
アーク式電気炉製鋼法 <イギリス人、シーメンス  
従来のガス炉ではどうしても高品質の鋼を作ることができません。それは燃焼中のガスが不純物として鋼中にかなり存在するからです。この電気炉

は放電現象を利用して溶鉄を数千度にまで局部加熱し、C・P・H<sub>2</sub>・N<sub>2</sub> などの除去しにくい不純物をほとんど除くことができるため、高級鋼の製造に用いられた。しかし多量の電力と炉容量の関係で高価になる欠点がある。

<1900年> エルー電気炉製鋼法 <フランス人、エルー  
今日、最も多く用いられている高級鋼作りの直接式アーク炉

<1953年> 純酸素上吹転炉法の発明  
(LD 転炉法)  
発祥がオーストリアのリッツ工場とドナヴィッツ工場であったためこの頭文字をとって LD 法と呼ばれている。

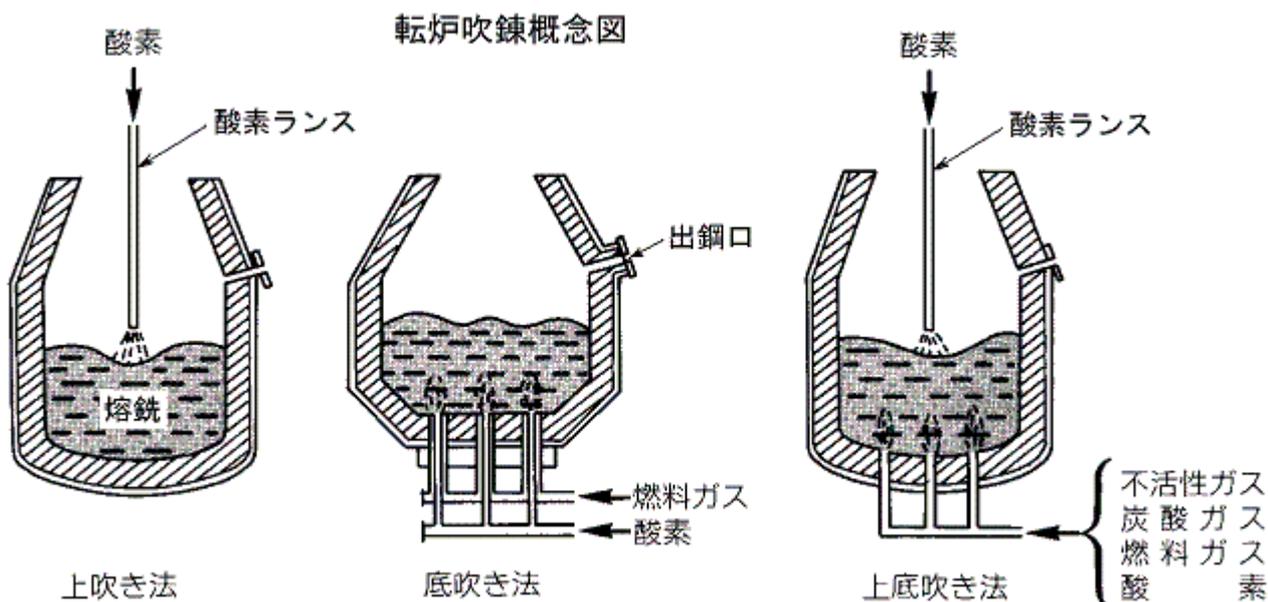
窒素は燃焼を妨げ、さらに鋼中に介在して鋼質を著しく悪化させます。この LD 転炉法の発明は製鋼法の大革命ともいえる技術で、今日世界の製鋼業の半分以上はこの方法を採用している。

ベッセマー法やトーマス法はいずれも冷風を溶鉄中に吹き込む方法であったため思ったほどの熱効果が得られず平炉に押されていたが、この冷風を酸素に変えることによって極めて良質の鋼が短時間のうちにできることが解った。

以上の推移に加えて、さらに近代の製鋼技術で特筆すべきことは、従来不純物として極力取り除こうとしていた元素を意図的に転嫁して、鋼に新しい性質を与えることに成功したことです。特殊鋼と呼ばれる数多くの合金鋼によって、鋼はほぼ無限に近い用途を持つようになりました。

空気中には燃焼を促進させる酸素が約 20%しかなく、大部分が不活性の窒素ガスである。  
(約 78%)

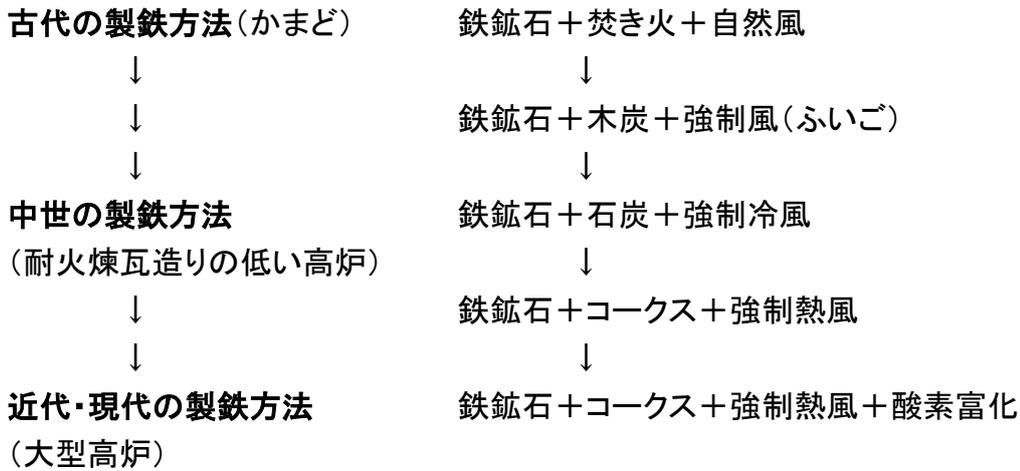
(13つづく14)



(引用: FN の高校物理)

## <製鉄技術の変遷>

一方、製鉄技術はどのように進歩しているのでしょうか。それを古代からおさらいします。

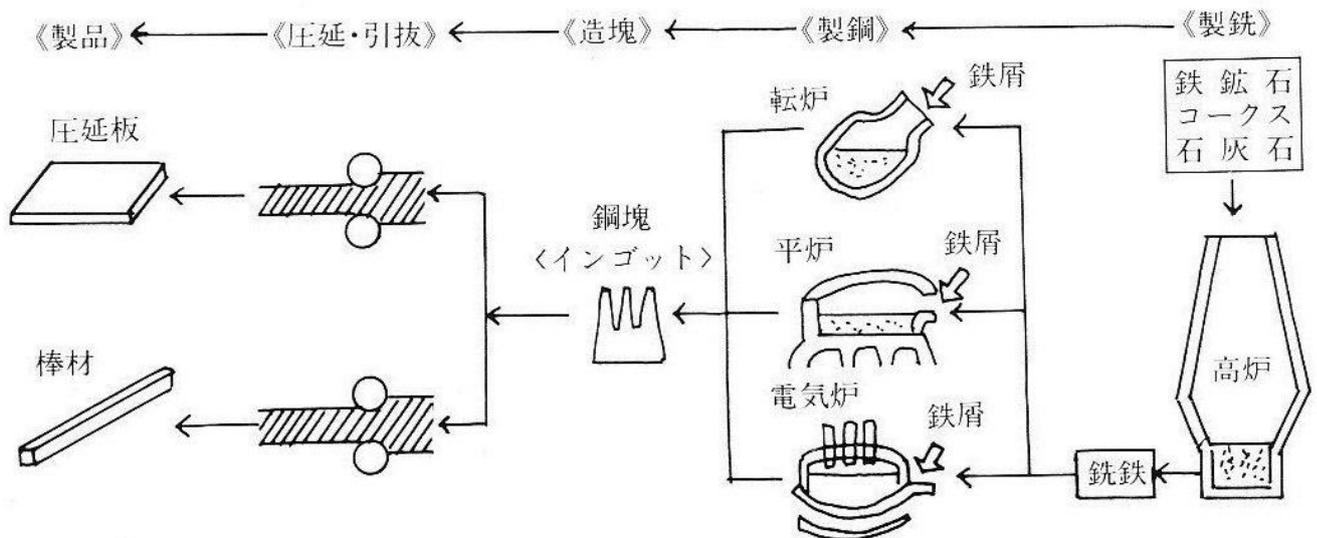


このように製鉄技術は増大する需要をまかなうため溶鉱炉を大型化し、それに伴う様々な問題を研究しながら今日に至っています。

そして溶鉱炉への原材料投入から最終製品である圧延鉄板や引抜き鋼を作り出すまでの全工程をコンピューターによって自動制御され、連続生産されているのが近代製鉄業の姿であります。

それでは、ここで我々の手に入る引抜き鋼材や自動車用鋼板がどのような工程を経て作られているのか説明します。

工程の中でも鉄鉱石を溶かし、銑鉄を作る最初の製銑工程があとあとの鉄の良否を決定する最も重要な工程です。(14つづく15)



それではいったい高炉の中に何を入れ、また高炉の中はどうなっているのか？  
 このことを考えてみるのもなかなか面白いことです。ただし、高炉の中で起こっていることをのぞいてみるわけにはいきませんので「恐らくこうなっ

ているのではないかと、推測する以外に方法はありません。まず、高炉に装入する原材料は、  
 [I] 鉄鉱石、[II] コークス、[III] 石灰石の3つです。順に説明します。

[I] 鉄鉱石の種類と鉄分の含有量

① 赤鉄鉱	酸化第二鉄 $Fe_2O_3$	55~65%
② 磁鉄鉱	四三酸化鉄 $Fe_3O_4$	55~65%
③ 褐鉄鉱	酸化第二鉄水和物 $Fe_2O_3 \cdot \eta H_2O$	40~50%
④ 菱鉄鉱	炭酸第一鉄 $FeCO_3$	30~40%

[II] コークス(還元剤・炭素)

コークスは石炭の粉末を700~1000°Cの温度で12~15時間ほど蒸し焼きするとスポンジ状になって出来上がる。石炭1トンで約0.75トンのコ

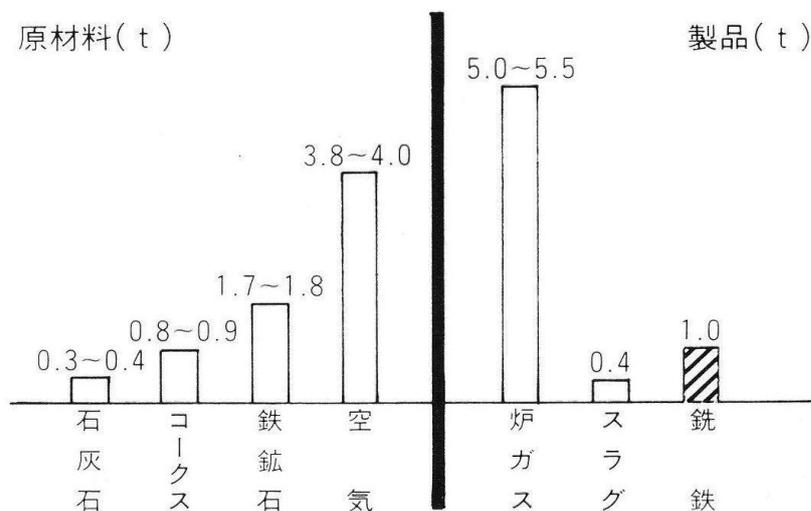
ークスができ、残りは石炭タールやガスとなりこれから医薬品や香料やアスファルトや塗料などが作られます。

[III] 石灰石(フラックス)

石灰石も製鉄においてはコークスに負けず劣らぬ重要な働きをします。それは、高炉の寿命を延ばし、鉱石中の不純物と結び付いて鉄を分離させる役目を担っているからです。鉄鉱石の中には溶けにくく、何の役にも立たない「ずり」と呼ばれる酸化物(ケイ酸  $SiO_2$ 、アルミナ  $Al_2O_3$ 、石灰  $CaO$ 、など)が多量に含まれています。これらが

炉壁にくっついて炉を破損させるので早く溶解して鉄分を分離する必要があります。石灰石は「ずり」を溶し込み、同時に他の不純物(硫黄 S)を溶かして「スラグ」にする働きをしています。この他にも大量の空気が必要ですが、いったい銑鉄1トン作るのにどれだけの原材料が必要なのでしょうか？

銑鉄1トン作るのに必要な原材料は大体、下表のとおりです。



原材料を高炉の頂上から投入すると鉄鉱石は還元されながら徐々に底のほうに降りて行き、どろどろに溶けて底に溜まる。

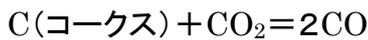
原料が上から下まで来る間にどのような反応が起こっているのかは大変興味深いことですが、このことを正確に説明することは中が見られないだけに非常に難しいことですが、大体の様子は解っています。

まず、高炉内の温度分布は図のようになっているものと考えられます。

鉄鉱石の還元は約400℃前後から始まり、その後どんどん酸素と結び付き、ガスとなって炉頂より排出される。

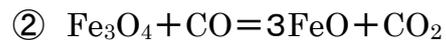
そして羽口付近の溶解帯では2000℃近くにまで熱せられ、銑鉄とスラグに分けられる。

高炉の中で最初に起こる化学反応はコークスの燃焼による炭酸ガスの発生です。



この化学反応が繰り返されていきます。ところで鉄鉱石の還元反応はどうでしょうか。

これを反応式で示すと次の3つの段階に分けることができます。



そしてこの反応は高炉の上部より他方に向かって段階的に進展します。

これを整理すると銑鉄ができるまでの還元状況は、

鉄鉱石  $Fe_2O_3$

↓

①  $Fe_3O_4$       発熱反応(+15050Kcal)

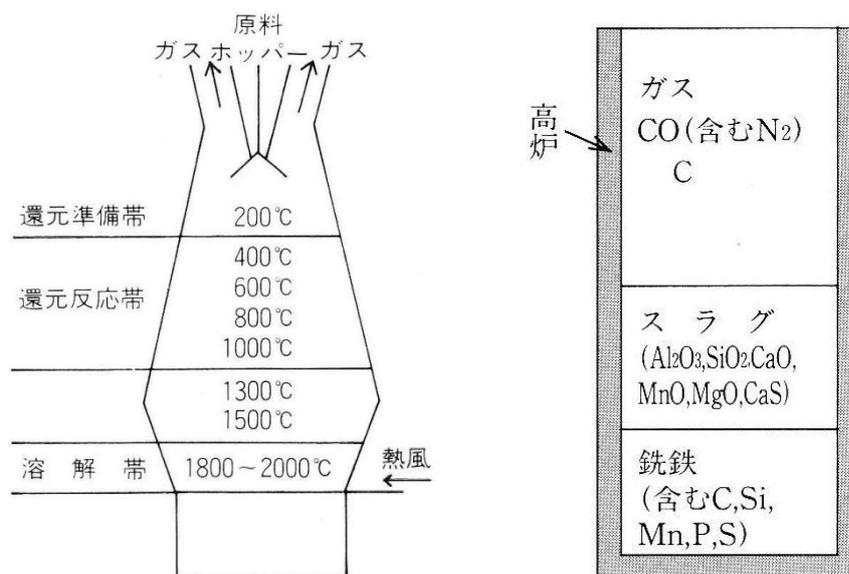
↓

②  $FeO$           吸熱反応(-5350Kcal)

↓

③  $Fe$             発熱反応(+3150Kcal)

このようにして溶けた銑鉄が炉底に溜まる頃にはその上をスラグが覆い、さらにその上はガスで充満されます。これらは各々独立に共存しており、その関係を模型図で示すと図のようになります。



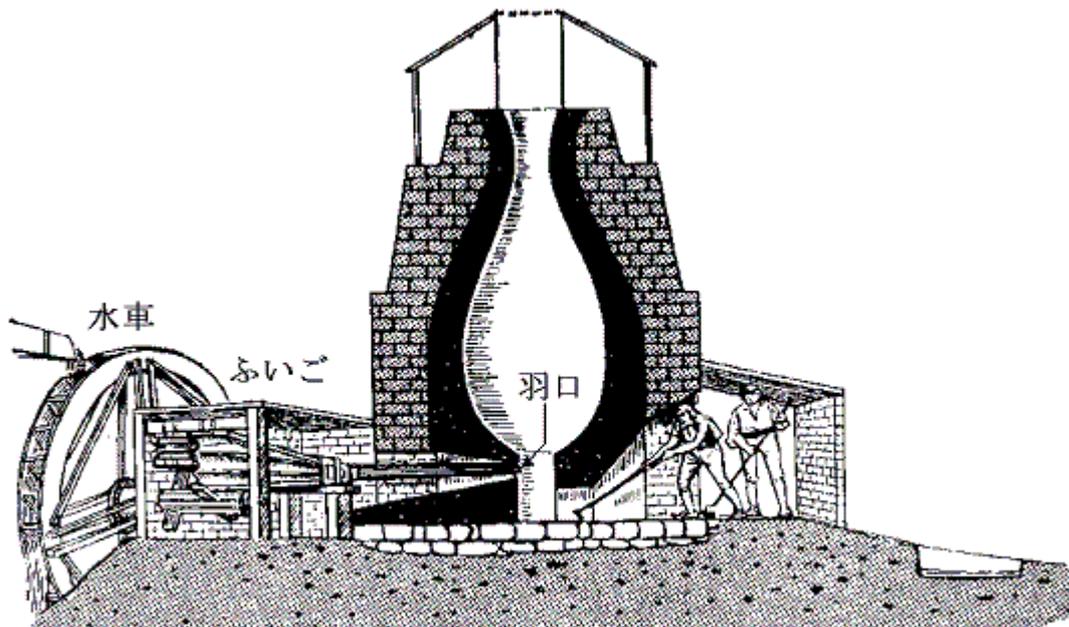
高炉内温度分布

高炉内成分

以上の化学反応によって鉄鉱石から炭素を多量に吸収した銑鉄が作られ、再びその炭素を所定の量にまで減らす製鋼工程を経たのち、半製品である板や棒となり、やっとのことで私達の目に入ります。

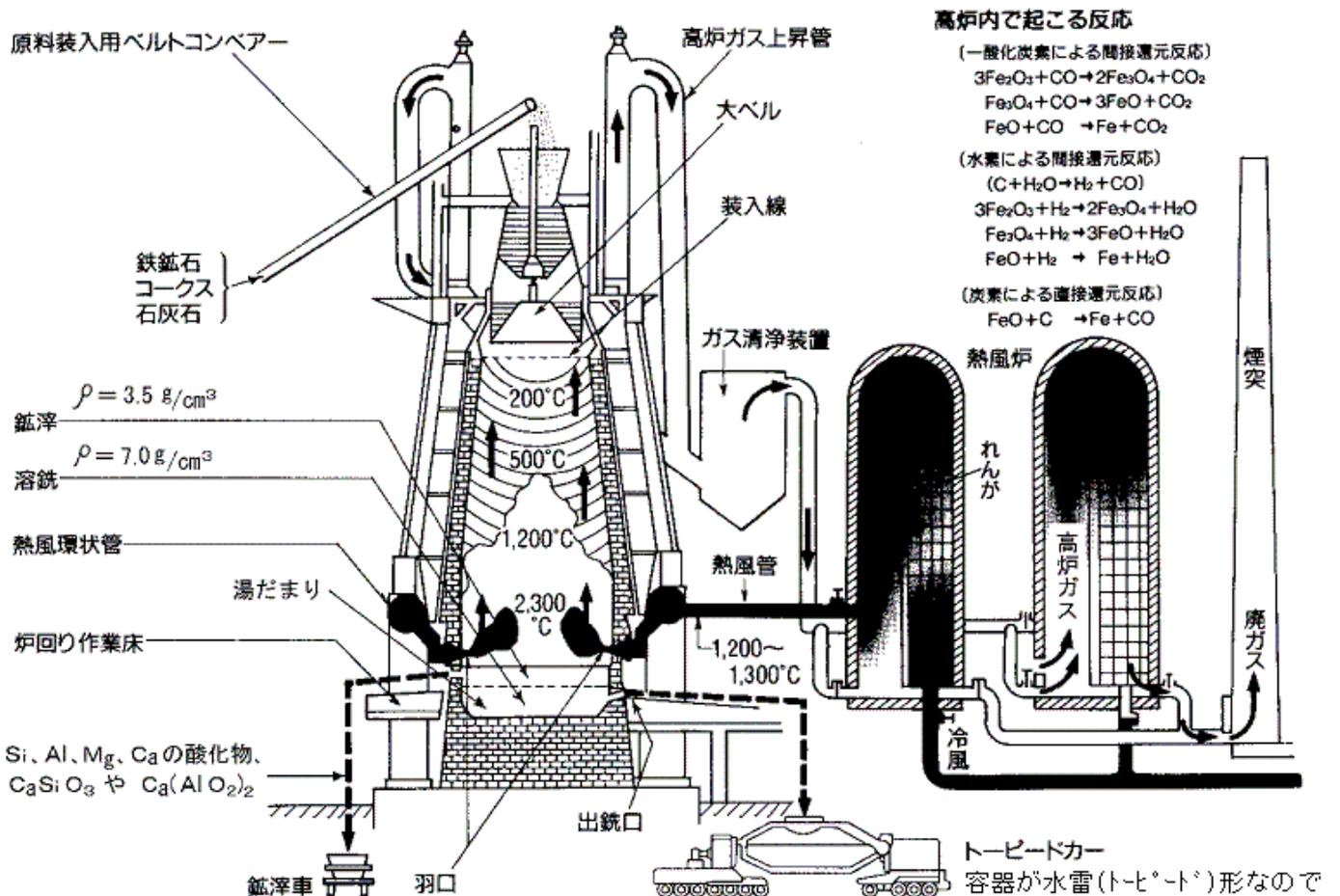
<参考資料>引用:FNの高校物理

① 初期の高炉(16世紀の高炉は本体高さ6mほど、日産1トン程度)



16世紀イギリスの高炉の想定図 (Aitchison, a history of metals, 2, p. 410)

② 近代の高炉(炉本体高さ40m、炉底直径14m、高炉全体の高さ125m程度、日産1万トン)



## <鉄器時代に生きる>

1750年頃からはじまった技術革命により、歴史上初めて農業中心の社会が工業中心の社会へと変わってきました。この工業化社会への転換に最も貢献したのは、1850年頃までの100年間のイギリスであり、この最大の担い手(技術)が**鉄**であった。「鉄は国家なり」ともいわれます。産業革命をきっかけにヨーロッパが世界の指導者たりえたのも鉄を安く、大量に生産する技術を入手したからでした。また、鉄は昔、**鐵**と書きました。この字は鉄が「金の王なる哉」と現しています。文字通り、鉄を制する国が世界を制するということなものでした。

さて、コークスを燃料とする溶鉱炉で銑鉄を製造する近代的製鉄工業は、19世紀の終末までには全世界の主要な鉄生産国にゆきわたった。

すなわち、1800年代はイギリスが長い間先導的立場を続け、ヨーロッパ諸国がこれを追っていたが、1900年代に入るとアメリカ合衆国がこれに取って代わり、さらにこの技術は延々と極東の島国「日本」へも伝わってきました。

古来、砂鉄と木炭による「たたら製鉄」に培われた日本の製鉄は19世紀中頃(安政)洋式高炉法への転換とともに急速に発展し、100年以上も前の1897年八幡(北九州市)に官営の製鉄所の建設が始まり、1901年に第1号溶鉱炉が完成した。

以来、技術立国日本を目指す技術者集団の努力により、ヨーロッパが4世紀かかった過程をわずか半世紀という驚異的なスピードで完全に習得し、定着させてしまった。

一方、鉄鋼の生産量は1850年から1900年にかけて世界全地域にわたって目覚ましく躍進した。需要増加の原因は機械の進歩と、それによる諸工業の発達で鉄を構造用材料として使用することが急増したためで、特に1840年頃の鉄道ブームの影響が大きく、以後あらゆる構造物に適用されていった。

例えば、1863年>鋼船、1889年>エッフェル塔(296m)、1890年>橋・高層建築、などです。

次の表は鉄鋼と他の代表的な金属である銅とアルミニウムの生産量と生産国シェアの推移を比較したものです。鉄がいかに多いか、また、生産国も欧州から日本やソ連(現ロシア)に移りつつあることが解ります。

世界の金属材料の生産量推移 (単位:万トン)

材 料	年 代				
	1850年	1900年	1950年	1980年	
銅	5.5	53.0	?	800	
アルミニウム	—	0.7	150	1,600	
鉄 鋼	6	3,000	21,000	71,800	
シ ェ ア %	日 本	—	—	2.5	15
	ソ 連	—	5	16	21
	アメリカ	5	40	50	14
	西ドイツ	20	22	—	6
	イギリス	60	15	8	2

また、一般的に国民所得水準の向上とともに一人当たりの鉄鋼消費量は、次の表に示す通り、ほぼ比例的に上昇します。

主要先進国の1人当たり鉄鋼消費量  
(出所：飯田賢一「風土と技術と文化」)  
(単位：kg/人)

国名	年 代			
	1950年	1960年	1970年	1980年
日 本	50	210	680	630
ソ 連	220	300	450	570
ア メ リ カ	570	500	620	510
西 ド イ ツ	215	530	660	550
イ ギ リ ス	280	425	?	250

日本の一人当たり最大消費量は 1973 年の 802Kgであり、この記録はまだどの国にも破られ

ておりません(追補情報1参照>2005年)ところが、アジア諸国の内、中国・インド・フィリピン・タイ・インドネシアなどは、まだ20~50Kg程度であり、日本の1920年代の水準にあります。

今や、自由主義経済圏 No1 の鉄鋼生産国となった日本の製鉄技術は広く世界の国々に伝播され、低廉で豊富な鉄鋼の供給を実現させるとともに、新興工業経済地域(NIES)の工業近代化と経済発展への道を促進させるでしょう。

(19つづく20)

注)NIESの対象地域と国

- ① アジア>韓国、台湾、香港、シンガポール
- ② 新大陸>メキシコ、ブラジル
- ③ ヨーロッパ>ギリシャ、ポルトガル、スペイン、ユーゴスラビア

### <追補情報1>

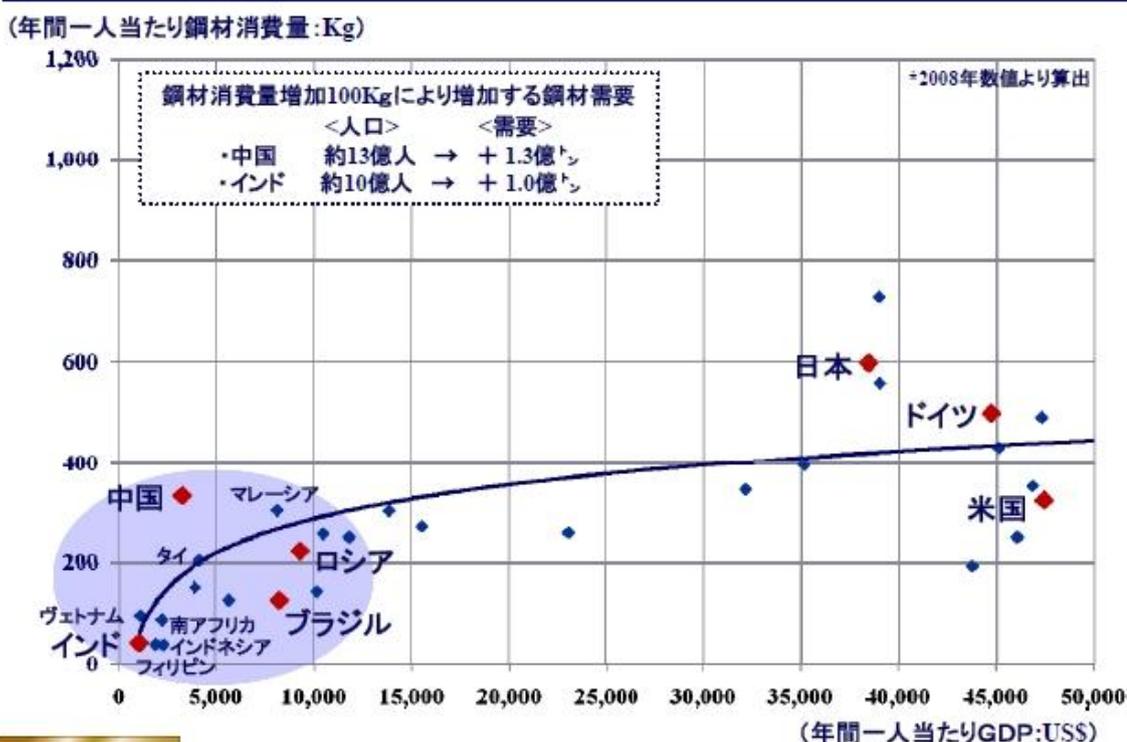
引用:2006年6月、国際鉄鋼協会(IISI)資料の分析で、韓国鉄鋼協会が出した報告書「2005年鉄鋼主要指標」

- ① 韓国>969Kg(韓国は2002年以降、世界1位)
- ② 台湾>944Kg(台湾は2001年まで、世界1位)
- ③ 日本>613Kg

- ④ イタリア>563Kg
- ⑤ カナダ>524Kg
- ⑥ スペイン>507Kg
- ⑦ ドイツ>431Kg
- ⑧ アメリカ>354Kg

### <追補情報2>引用:新日本製鉄決算説明資料

## 各国一人当たり鋼材消費量とGDPの相関関係



## <むすび>

石器 → 青銅器 → 鉄器 という材料の発達過程すなわち「材料革命」の歴史を見てきました。この中でも鉄器時代のなんと壮大でロマンに満ちていることか！！

最後に、これまでもたびたび述べてきたことですが、改めて鉄がこれほどまでに人類に活用された理由は何なのかを整理してみます。

① 資源が豊富で、かつ世界中に分布している。地球圏における元素分布を示す目安として「クラーク数」があります。これによれば鉄(5%)は酸素(49%)、ケイ素(26%)、アルミニウム(8%)に次いで 4 番目に多い元素となります。従って、鉄はアルミ以外のどの金属よりもこの地球上に多く存在するわけです。

他の金属元素のクラーク数は次の通りです。Mg1.9、Ti0.46、Mn0.09、Zr0.02、Cr0.02、V0.015、Ni0.01、Cu0.01、Zn0.004、Sn0.004、Pb0.0015 など。

② 他の金属(銅、亜鉛、アルミなど)に比べ精錬しやすい。

鉄は他の金属より融点が高いにもかかわらず鉄鉱石の還元に要する温度が非常に低く、極めて

精錬しやすい。

③ 他の金属に比べて強度を高くすることができる。

鉄はいろいろな異種元素と結合してその性質を様々に変えることができます。鉄が今日、広く利用される最大の理由がここにあります。

私達の希望する機械的性質をほぼ満足すべき姿で具現化できるのは鉄以外にありません。

そして、全てにバランスのとれた性質がますます私達の要求を充たすことになったのです。

④ 金属材料中、特に安価である。

最後に欠くことのできない特徴は、何といたっても安いことです。

これまでのいろいろな特色を総合して、さらに他の金属材料より極めて安いということが鉄という材料を人間が気前よく、多量に利用できたことにつながり、ひいては鉄材料の品質向上、性能改善に多大な影響を及ぼしているのだともいえるのです。

下の表は各種材料の機能別価格です。鉄鋼がいかに安い材料であるかが解ります。

(20つづく21)

### 各種材料の機能別価格

(出所：筑摩書房「日本の技術100年」)

材 料		重量当たり価格 円/kg	体積当たり価格 円/cm <sup>3</sup>	比強度換算価格 円	比 重	強 度
金 属 材 料	鉄 鋼	94	740	18	7.9	41
	A l 合 金	770	2,080	70	2.7	30
	銅 合 金	690	6,140	255	8.9	24
	T i 合 金	4,000	18,000	300	4.5	60
無 機 材 料	コンクリート	6	14	8	2.3	1.8
	ファインセラミックス	7,000	27,300	70	3.9	380 (アルミナ)
	炭素繊維	15,000	26,100	90	1.7	280
有材 機料	木 材	175	70	14	0.4	5
	樹 脂 (ポリプロピレン)	270	240	70	0.9	3.5

注1：比強度換算価格＝重量当り価格÷比強度

注2：比強度＝強度÷比重

注3：価格は1981年末現在のもの。

鉄の時代は今後も長い間続き、依然として人類にとって至宝であり続けるでしょう。

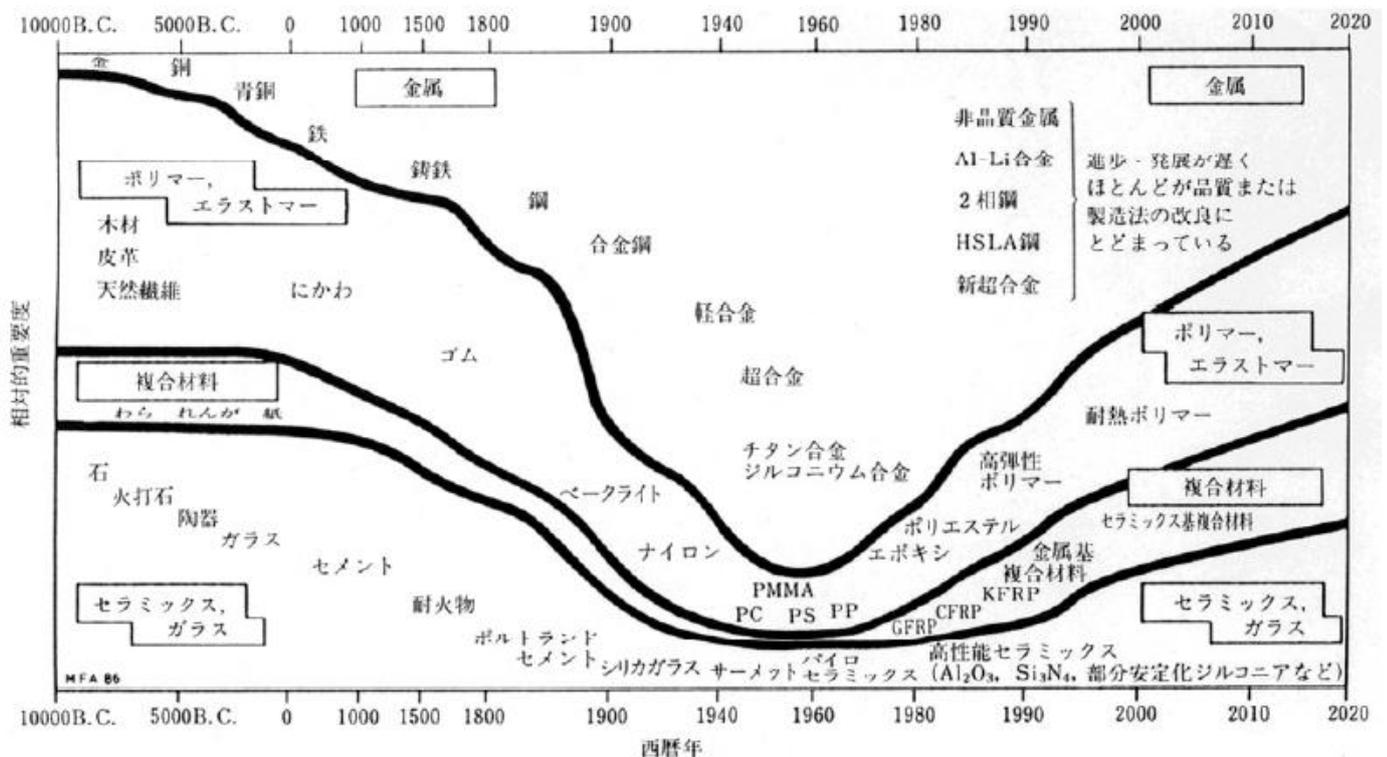
そして、文化・文明の発展、進歩に多大なる足跡を残して、いつか次に出現する新しい材料にバトンタッチすることでありましょう。

これまでの人類の発展と金属に対する知識の程度とが極めて深い関係にありました。

そのため、ある国家や民族がそれぞれの時代にどのような金属を知り、作り、使っていたかによって、それぞれの文化の程度をほぼうかがい知ることができました。

今後どのような材料が現れようとも(それが金属材料であろうとなかろうと)それは、いつも人類の発展に大きく影響を及ぼしていることでありましょう。(完)

<追補資料>引用:京都工芸繊維大学森田辰郎准教授の「金属材料テキスト」



<あとがき>

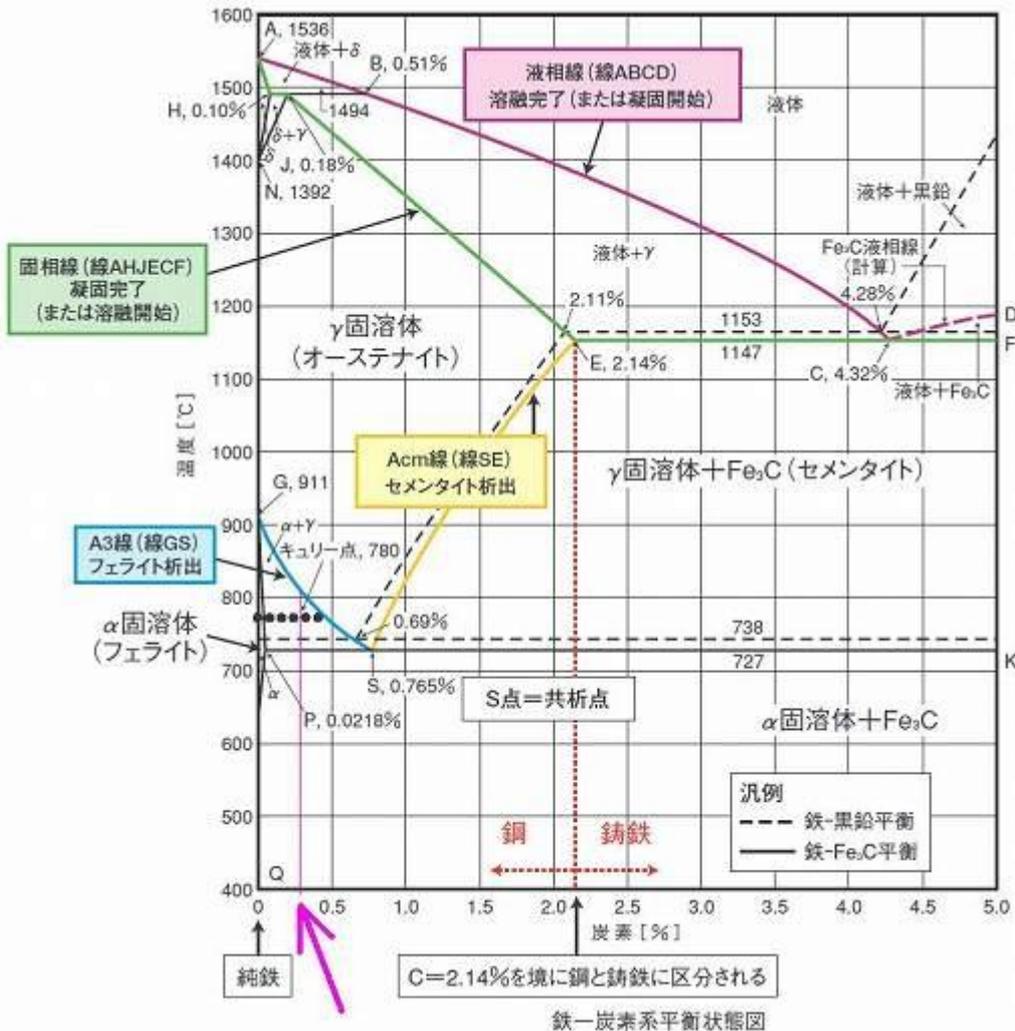
この原稿は1970年頃執筆し、放置していたものを1985年に推敲し、21回に分けて社内報に連載したものである。これを原稿として、2011年4月我がホームページに連載するため、ウィキペディアの画像、その他を追加・推敲したものである。

<2011年5月追補>金属学的考察

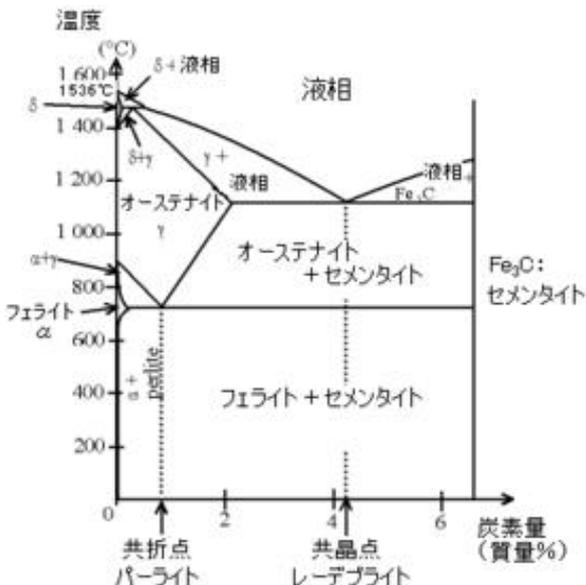
「むすび」で既述したように鉄がこれほどまでに利用されたのは、千変万化の特性にある。鉄はいろいろな異種元素と結合してその性質を様々に変え、私達の生活の隅々にまで入り込んできた。私達の希望する機械的性質をほぼ満足すべき姿で具現化できるのは鉄以外にありません。そこで、むすびのむすびとして鉄の百面相について考えてみることにしましょう。

次に示す Fe-C 状態図をご覧ください(出所不明)。この種の図はネットで膨大に公開されている。鉄と炭素の合金が温度によって、いかに状態を変化させるか驚かされる。鉄と炭素だけでこのような変化だから、さらに異種元素や金属元素を加えれば天文学的規模の性質を生み出すことができます。まさに、鉄は金属の王(鐵)なるかな、です。まずは鋼と鋳鉄との分岐点、あるいは固体と液体との境界などについて、図をじっくり観察してください。

**<鉄 Fe-炭素 C 系平衡状態図>** 横軸は鉄中の炭素含有量 wt%、縦軸は温度°C

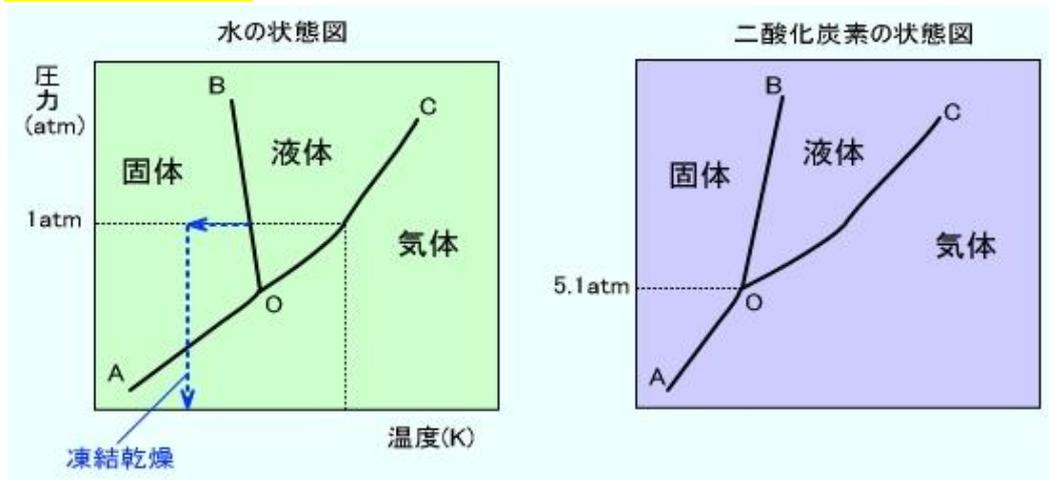


**<参考状態図1>** Wikipedia の Fe-C 状態図



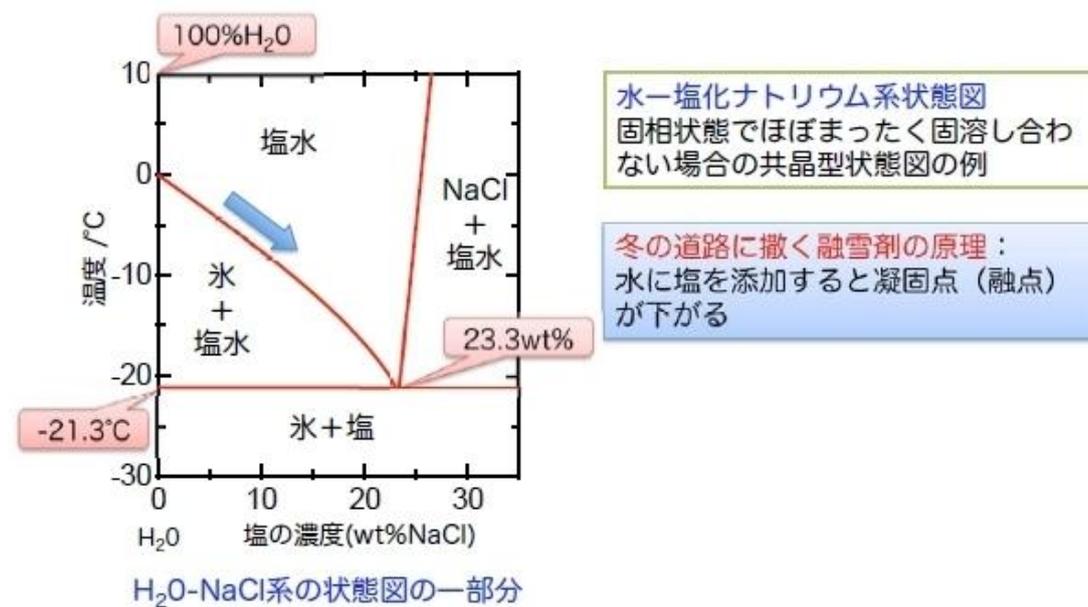
(追補1)

<参考状態図2>身の回りの状態図例>水の状態図、二酸化炭素の状態図

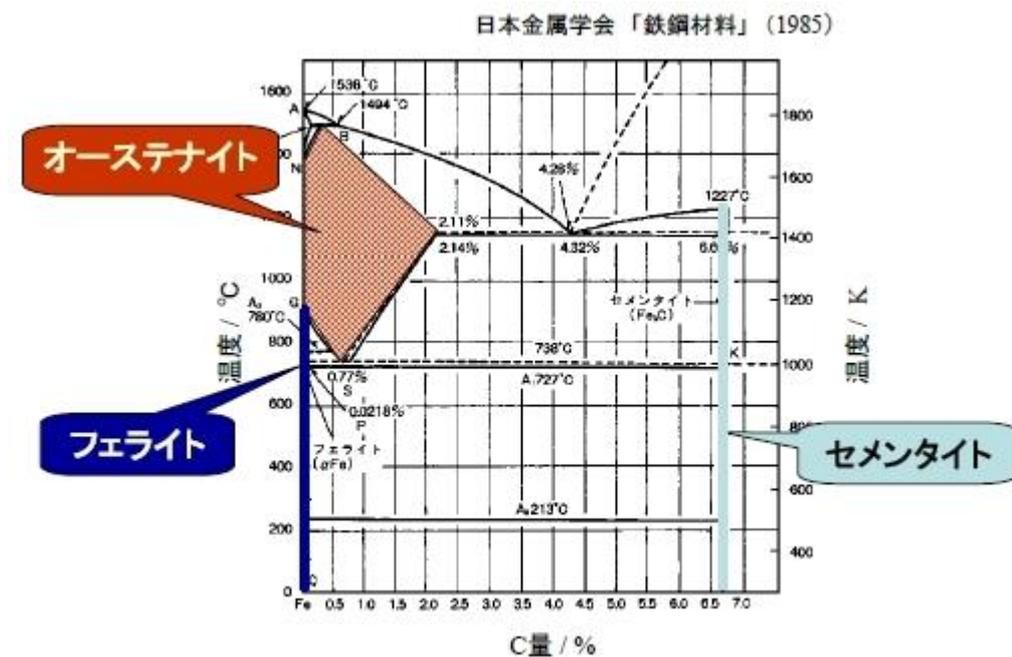


<参考状態図3>身の回りの状態図例>水—塩化ナトリウム系状態図

(引用: 東北大学亀川教授「材料学入門」合金の平衡状態図2)



<参考状態図4>フェライト、オーステナイト、セメンタイト各組織の析出位置(温度と炭素固溶量)



(追補2)

## ＜Fe-C 系合金における金属相(組織)の解説＞

フェライト	<p>純鉄に微量(常温で0.00004%、723℃で0.0218%)のCを固溶した<math>\alpha</math>-固溶体のことで、組織学上フェライトと云い、<math>\alpha</math>-鉄、地鉄と呼ばれることもある。</p> <p>語源はラテン語の鉄Ferrum(フェルム)からきている。bccの結晶構造を持ち、A3変態点で<math>\gamma</math>-鉄に変わる。</p> <p>軟らかく摩耗には弱いがねばく、展延性に優れ、常温から780℃までは強磁性体。顕微鏡的にはオーステナイトと同様、多角形状の集合体で腐食されにくい組織。硬さは70~100HV。</p>
オーステナイト	<p>Fe-C系合金において普通723℃以上の高温でだけ存在する組織。</p> <p>Cを最大2.06%まで固溶でき、やわかくねばい性質を持っている。</p>
セメンタイト	<p>FeとC(6.69%)の金属間化合物です。炭化物とも呼ばれ<math>Fe_3C</math>で表わす。</p> <p>金属光沢を有し、硬くてもろく、常温では強磁性体だが、213℃(A0変態:キュリー点)で磁性を失う。顕微鏡的には層状、球状、網状、針状を呈し、特に球状をしたものを球状セメンタイトと呼んでいる。耐摩耗性が要求される工具や軸受けなどではなくてはならない組織の一つである。</p> <p>通常は腐食され難く、白色を呈しているが、ピクリン酸ソーダのアルカリ溶液で煮沸すると黒色になる。また、<math>Fe_3C</math>は比較的不安定な化合物で、900℃程度の温度で、長時間加熱すると黒鉛(グラファイト)に分解する。硬さは1200HV程度。</p>
パーライト	<p>0.77%Cの鋼がA1変態点で生じた共析晶。</p> <p>微細なフェライトとセメンタイト<math>Fe_3C</math>が層状に混合した組織で、一見パール(真珠貝)のような色合いを示すことから、パーライトと呼んでいる。機械的性質は2相の中間で粘り強い。</p> <p>パーライトはオーステナイト状態の鋼を、ゆっくり冷やした時に得られる組織で、冷却速度の相違によって層間隔が異なるため、3つに分類している。</p> <p>普通パーライト(粗パーライト)は100倍程度で層状が認められ、一般的に観察されるもの。</p> <p>中パーライトは1000倍位で認められず、2000倍で層間隔がわかる程度。</p> <p>微細パーライトは焼入れ冷却途中で、S曲線の鼻にかかり、生じたもので、2000倍でも層状が認めがたい組織。硬さは240HV程度。</p>
マルテンサイト	<p>1891年ドイツのマルテンスによって発見された組織で、Cを固溶した<math>\alpha</math>-固溶体のこと。</p> <p>安定したオーステナイトを急冷したときに得られる組織で結晶構造は、体心正方晶及び体心立方晶とがある。組織的には麻の葉状又は針状を呈する。</p> <p>鋼の熱処理の中で最も硬くもろい組織で、強磁性を示す。</p> <p>このマルテンサイトを100~200℃で焼戻しを行うと、<math>Fe_3C</math>が析出し、若干粘り強くなるが腐食されやすくなる。この状態のマルテンサイトを焼入れの場合と区別し、焼戻マルテンサイトと呼んでいる。硬さは0.2%Cで500HV、0.8%Cで850HV程度。</p>

鉄と炭素の合金は鉄 Fe 中の炭素 C 含有量によって3つの金属形態をとる。

- ① 炭素含有量0.0218%以下                      純鉄(フェライト)
- ② 炭素含有量0.3~2.0%以下                      鋼
- ③ 炭素含有量2.14%以上                      鋳鉄

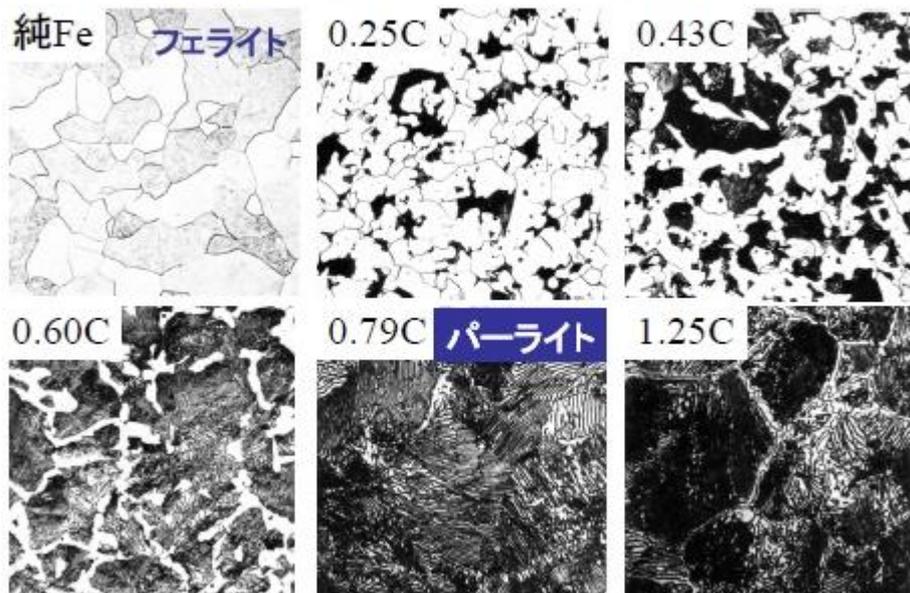
**<炭素鋼の種類と用途>**

C%	0.01	0.08	0.12	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1.0
種別	特別極軟鋼	極軟鋼	軟鋼	半軟鋼	半硬鋼	硬鋼			
引張強さ [MPa]	298~380		380~450	450~530	530~620	620~700	700以上		
伸び [%]	50~25		22	18	18	14	8		
性質	非常に軟らかい室温加工も容易		加工が容易,かなりの強さがある	軟鋼より強い	強さと硬さを相当有し,耐摩耗性がある		強く,硬く耐摩耗性がある		
用途	亜鉛メッキ板(トタン),ブリキ,ドラム缶,管材,電信線,自動車などの外板用		鉄骨,鉄筋,リベット,ボルトナット,鋼管,船体車両用板,棒,形鋼	船体,建築橋,ボイラー用圧延板,ボルトナット,鍛造品	軸歯,車,レール,ばね,ボルトナット		工具,軸,ピアノ線,クラッチ,PC鋼棒*,ボルトナット,耐摩耗性部品		
	構造用強度材として使えない		鉄鋼の3/4を含める		熱処理(焼入れ,焼戻し)ができる				

\* steel bar for prestressed concrete.

**<炭素鋼の標準組織>**

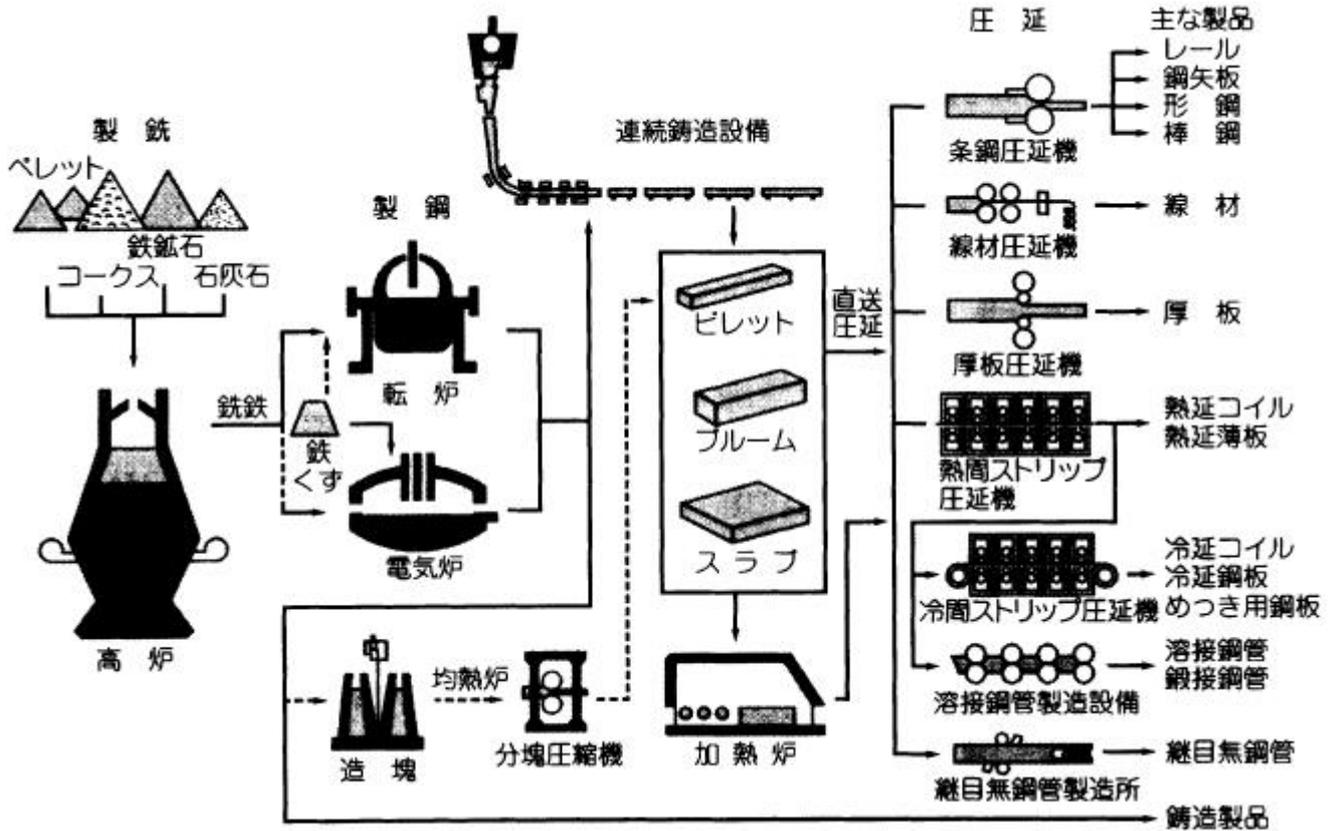
Fe-C合金の標準組織 (光学顕微鏡写真)



(追補4)

最後に製鉄から製鋼を経て、素形材が出来上がるまでのプロセスと、さらに身の回りの製品を紹介して締めくくりにします。

**<鉄鋼製品の製造工程>**



**<身の回りの製品例>**

**炭素鋼(鉄鋼)の主な用途**

**純鉄の主な用途**



電磁材料(コイルの鉄心)

軟磁性体(純鉄)のコアに銅線のコイルを巻いたものです。



鉄橋



レール



スチール缶



モンキーレンチ



カッターの刃



ドライバー・ペンチ



くぎ



ねじ・ナット・ボルト

**鋳鉄の主な用途**



マンホールのふた



排気マニホールド



鉄瓶

シリンダーブロック、旋盤のベッドなどにも使われている。

(追補5完)