



鉄の歴史

現代によみがえるたたら製鉄

永田和宏 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
Kazuhiro Nagata

Revival of Tataru Iron- and Steelmaking Today

1 はじめに

たたら製鉄は日本古来から行われてきた製鉄技術である。粘土で築いた炉高1.2mの箱形の低炉で、原料に砂鉄を約10トン用い、約10トンの木炭を燃料として、約2.5トンの銑鉄と鋼を直接製造することができる。送風動力に鞆(ふいご)を使用し3昼夜、砂鉄と木炭を30分ごとに炉に装荷し、炉壁が侵食されて使用できなくなるまで続けられ、これを1代(ひとよ)と呼ぶ。1代ごとに炉を造りなおさねばならない。炉の地下には湿気の防止と保温のため木炭の層や空洞、排水溝など大がかりな構造が造られている。

現在は、島根県仁多郡横田町で日本美術刀剣保存協会が、日本刀の原料としての玉鋼の需要に応えるため、冬季に年3、4代の操業が行われており、「日刀保たたら」と呼ばれている。このような簡単な構造の炉と送風装置で溶融銑鉄と鋼を造り分けていた。

日本刀の原料として玉鋼が使われるのは、加工性、鍛接性に優れ、錆び難く、刀剣にしたときその肌が美術的に優れているためである。法隆寺を解体修理した宮大工の西岡常一は、1000年の昔に造られた白鳳時代の釘を見て、曲がりさえ直せば再度使用可能であると述べている¹⁾。また、江戸城の石垣に打ち込まれていた鉄のくさびは表面がいわゆる黒錆びに覆われているが中まで錆びが進行していない。保存状態にもよるが現代の同組成の鋼と比べ錆び難いと言われている²⁾。

たたら製鉄で造られる鋼や銑鉄はシリコンなどの不純物濃度が低く、その製造温度も1350℃程度で、現代製鉄法に比べ200℃近く低い。かつ装荷した砂鉄が鋼になる反応も30～40分で終了している。いわば「低温製鉄」である。たたら製鉄法の技術史的・冶金学的考察は館³⁾が詳細に行っている。本報告では、現在も操業されている「日刀保たたら」の研究⁴⁻⁶⁾と、小型たたらによる実験研究結果⁷⁾から、

たたら製鉄の特徴を明らかにし、そこに含まれる原理から新しい製鉄法を考察する。熱力学の原理は過去も現在も同じだからである。

2 たたら製鉄の由来

我が国に製鉄技術が伝えられたのは6世紀後半である。中国では石炭で銑鉄を製造する技術が発展していた時期である。それ以前には鉄糞(かなくそ)と呼ばれるスラグが発掘されているが、鍛冶工程のものであり製鉄工程のものではない。鉄製品が出土したのは弥生時代の遺跡であり、古墳時代になるとさらに多くの鉄製品が発掘されたが、これらは朝鮮からの渡来品と考えられている⁸⁾。

発掘された製鉄炉の形状には、半地下式豎形シャフト炉と長方形箱型炉の2種類がある。前者は静岡以東の東国地方に多く、後者は中国・九州地方に多く見られ、伝えられた由来も、発展の系譜も異なっている。いずれの技術も日本列島を西から東へと伝播している。最初に伝えられたのは箱形炉で、朝鮮半島の伽耶が滅亡し、技術者が渡来したことによる。半地下式豎形シャフト炉は百済の滅亡により8世紀に技術者がもたらした。いずれも砂鉄を原料とし、木炭を燃料としていた。最初、箱形炉では銑鉄が出来なかったが、8世紀に伝えられた半地下式豎形シャフト炉では銑鉄を製造していた⁹⁾。半地下式豎形シャフト炉の大きさは、9世紀の群馬県菅の沢遺跡炉で炉床幅75cm、残存高さ123cmである。岩盤を掘り込み、半地下式にして粘土で炉壁を造っていた。炉底から約30cmの炉背壁から穴の径が1cm程度の羽口が1本取り付けられ、送風機で強制通風していた。また、炉底近傍に大きな通風口(直径10cm程度)が開けられている炉もあり、これは自然通風により送風能力の強化を図ったものと考えられている。

長方形箱型炉は粘土にわらを入れて補強した炉壁で造ら

れており、その大きさは、8世紀後半のキナザコ遺跡の炉では内法で長辺90cm、短辺70cm、高さ65cmである。片側の長辺壁には3個の羽口が取り付けられ、1台の送風機で強制通風していた。平安時代になると炉の大きさはあまり変化しないが、両側の長辺壁にそれぞれ2個の羽口が設けられ、4台の送風機で送風していた。また、炉底には湿気を防ぐ設備が造られていた。送風機にはピストン型の吹き(ふいご)を用いているが、「日本書紀」巻一では「踏吹き」を「多多羅」と呼んでいる。

12世紀以降になると炉が大型化し、構造も近代たたらに類似していった。古代の製鉄法では銑鉄(銑(ずく))を造っていたのか、銅塊(鉬(けら))を造っていたのかは分からないが、いくつかの製鉄遺跡では銅塊が捨てられており、また、鑄型を出土する遺跡も在ることから、そのようなところでは銑を造っていたと考えられる。中国との技術交流の可能性を考えると、かなり早い時期から銑生産があったと考えられる。ヨーロッパでも同様であるが、大きな銅塊ができるとこれを小割りすることが出来ないで捨てるしかなかったであろう。鉬は鍛冶工程で処理できる大きさで造られていたにちがいない。8世紀には鍛冶司と鑄司が朝廷の官職として位置付けられていた。平安時代後期から中世にかけては鉄を年貢として貢納する荘園や公領が多くあったことから、露天で行うたたら、いわゆる「野だたら」をさらに小規模にした程度の製鉄がここで行われていたであろう。

12世紀になると「鑄物師」が職人集団として全国的に組織され、梵鐘や燈炉、金輪、鍋、釜、鍬や鋤など鉄器物に対する広範な需要に応じ市庭での交易などを通して供給を行った。一方、鍛冶は寺社所属の建築工として、あるいは刀鍛冶としてだけでなく、諸国の国衛に所属する鍛冶が古代以来多数活動していた。14世紀になると鑄物師が諸国に分散し定着する一方、鉄器の需要の増大に伴って鉄商人が分化し、出雲や、備中、播磨など中国山地で造られた鉄を販売した。

17世紀半ばから農民層など一般的な鉄の需要が飛躍的に増大し、この需要に応じた製鉄技術の飛躍的な発展があった。送風装置の送風能力が飛躍的に大きくなった他、たたら師や鉄師と呼ばれる鉄山経営者や村下(むらげ：たたら操業の長(おさ))、炭坂などの専門職人が現れ、製鉄作業場である「山内」を形成するようになった。「野だたら」は砂鉄が採取でき、木炭が豊富に得られる場所で、簡単な炉床の上に粘土で築かれた。内法縦約1間(1.8m)、横約3尺(0.9m)、高さ約3尺(0.9m)、壁の厚さ約20cmの直方体で、両側面に設けた多数の羽口から強制送風していた。送風は踏吹きを用いていたが、16世紀半ばから吹差吹きが使

われるようになり、生産性は2倍になった。1回の操業(1吹あるいは1代(よ))は2日程度で、何代かの操業で他の場所に移動していた。踏吹きは中央で2つに仕切った皿状の窪みに長さ8尺、幅4尺のしま板を乗せ、シーソーの様に踏むことにより、吸気と排気の弁を付けた風穴から送風するものである。

1691年に天秤吹きが中国地方で発明され、生産性はさらに2倍になった。また、製鉄場は「高殿」と呼ばれる建物の中に造られた。これによって天候によらず年間を通して操業が行われるようになった。天秤吹きは踏吹きのしま板を2つの部分に分け、その支点となる部分を板の前後の両端に移し、中央の可動部分を交互に踏む、すなわち一方を踏み下げれば他方の板が自然に上がる仕掛けになっている。この近世たたら製鉄は、鉄穴流し(かんながし)と呼ばれる砂鉄の選鉱工程と、高殿たたらの製錬工程、および大鍛冶の鍛錬(脱炭)工程に分かれていた。鉄穴流しは品位1%程度の砂鉄原料を、水流を利用した比重選鉱により95%程度にまで精選する方法である。砂鉄には赤目小鉄(あこめこがね)、真砂小鉄(まさこがね)、川砂鉄、浜砂鉄がある。高殿たたらは炉の地下構造を堅固にし、浸透する水気を完全に遮断するために粉炭を付き固めた炉床の上に、縦8~12尺、幅3尺、高さ3尺5寸の炉を構築した。多数の羽口を縦両側壁下部に約5寸間隔で配置し、縦の長さに応じ2台あるいは4台のふいごから分岐して送風した。

18世紀以降、鉄の生産量は飛躍的に増加したがそのほとんどが銑で、中国地方では年間15,000トンを生産し、これを脱炭して錬鉄としていた。鉬は数%に過ぎない。銑生産には赤目小鉄やチタン成分が多い川砂鉄や浜砂鉄が用いられたが、真砂砂鉄でも銑生産が行われていた。操業は4日連続(4日押)で行われ、けらの生成を極力避けるために短い間隔で溶銑を炉外に流し出した。これを「銑押(ずくおし)」と呼んだ。スラグには砂鉄に含まれる鉄分の内60~85%がのろ(スラグ)として廃棄された。同じ銑鉄を製造する溶銑炉のスラグには数%の酸化鉄が含まれるのと比較すると、たたら炉内の酸素分圧が高い事が分かる。

大鍛冶では、まず左下場で銑(炭素濃度3~4%)を木炭中で加熱し、半熔融状態の銑に風を当てて脱炭し、卸し鉄(0.4~1.0%)とした。これを本場で歩けら(のろを含む銅の小塊、約1.0%)と共に左下と同様な製錬を行って割鉄(錬鉄、0.1%)に仕上げた。後者の工程での鉄の歩留は60~67%程度で鉄はかなり酸化した。

18世紀の中頃に大きな鉄塊を破碎する「大銅」が創案されると鉬を生産する「鉬押(けらおし)」の技術が開発された。銑押の炉と比較すると炉の幅と羽口径およびその間隔を少し大きくして温度の上昇を抑え気味にしている。この

方法によっても生産物の半分は銑鉄、半分は銅であった。
鋤押による銅の生産が増大するのは幕末になってからである。19世紀に入りたたら操業の改良がなされて3日に短縮された。これを3日押と呼んだ¹⁰⁾。

明治以降たたら製鉄は生産性に劣るため、輸入鋼に対抗できず、ついに大正12年に商業生産を終えた。明治期におけるたたら製鉄研究は侯国一¹¹⁾が詳細に行っている。その後も日本刀の原料としての需要があり断続的に生産され、第2次大戦終了までは「靖国鑑」が生産を続けていた¹²⁾。戦後しばらく途絶えていたが、昭和52年に(財)日本美術刀剣保存協会が文化庁の補助事業として島根県仁多郡横田町で高殿式たたらを復活した。これを「日刀保(にっとうほ)たたら」という。その目的は国の重要無形文化財に指定されている日本刀の製作技術を材料(和鉄)の面から保護し、たたら製鉄技術の伝承者を養成することであった。日刀保たたらの操業はそれまでのたたらとは少し異なり、3昼夜全工程を一種類の「真砂砂鉄」だけで操業し、鋳を生産している。その開発には村下安部由蔵(あべよしぞう)の功績が大きい^{4,5)}。

3 日刀保たたらの操業技術⁶⁾

従来、たたら操業技術は一家相伝であり村下から直接得た技術のノウハウともいえるべきものはほとんど記載がない。そこで永田は、「日刀保たたら」の操業と村下の操業技術について調査を行った。

3.1 日刀保たたら炉の構造

炉の地下構造は「靖國鑑」の遺構を改築したものである。Fig. 1 に示すように、深さ333cm、幅485cm、奥行き364cmの長方形の穴底に排水溝があり、下から荒砂、坊主石、砂利、木炭、粘土の層が重なり、その上に中心に本床、その両脇に小舟が配置されている。本床の上に構築された箱形炉の構造を同図に示す。炉の長さは2,700mm、高さは両端で1,200mm、中で1,100mm、幅は両端で761mm、中で873mmと中が少し低く、膨らんでいる。ほど穴(羽口)は片側20本ずつ両側に合計40本が一行に開けられた。炉底(元釜)はV字型になっており、羽口の角度は19~24°で炉底に向かって斜めに開けられる。羽口の間隔は120mmである。炉は1代目(ひとよめ、代とは操業回数を示す単位)毎に壊される。送風は4台の鞆(ピストン型電動送風機)を用い、間欠的に送られる。炉の両脇には天秤台と呼ばれる炉と同程度の高さの台があり、ここにそれぞれ送風管が来ており、「つぶり」と呼ぶ送風分配箱から「木呂」と呼ぶ送風管を通して羽口に送風される。炉の両端の炉底には溶融スラグ(ノ

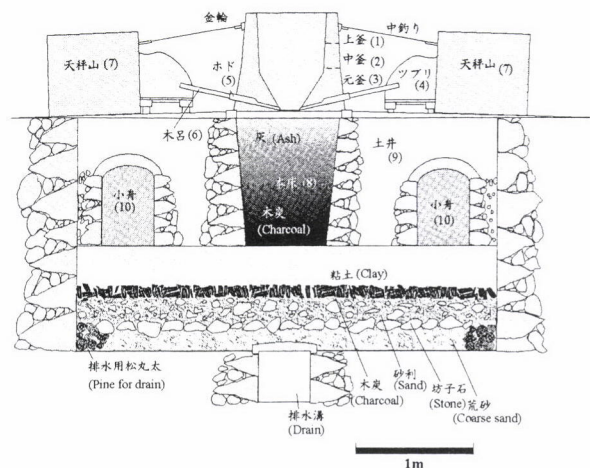


Fig.1 Construction of the underground and furnace of the Nittoho Tataru

- (1) Uwagama, (2) Nakagama, (3) Motogama,
(4) Tsuburi, (5) Hodo (tuyer), (6) Kiro (bamboo pipe),
(7) Tenbin-yama, (8) Hondoko, (9) Doi (clay),
(10) Kobune (tunnel)

口)を流出させるための直径10cm程度の穴が中心と左右に3本開けられており、通常は木炭粉を詰めて塞いである。中心の穴を「中湯池」(なかゆじ)と呼び、操業の初期に開けられる。両脇の2つの穴を「四つ目湯池」(よつめゆじ)と呼び、中湯池を粘土で閉じた後、操業中頃から使われる。なお、ホド穴の大きさや角度は操業に大きく影響するのでその開け方は秘伝とされてきた。

3.2 操業

平成10年度日刀保たたら第3代目の操業において、送風開始(平成11年2月3日)から鉤出し(平成11年2月6日)に至るまでの4日間の作業を記録し、良好な操業のあり方、炉の不調時の対応について調査した。

たたら操業の標準作業は、下灰(したはい)・築炉・砂鉄と木炭の装荷・鋳出しの順で行われ計6日間かかる。この内、製鉄操業は送風開始から鋳出しまでの約70時間である。下灰作業とは、木を燃して熾(おき)となったところを「しなえ」と呼ぶ長柄の木の棒で叩き締める操作である。炉床を固く叩き締めておくことにより炉床の損耗を少なくすることが出来る。その上に元釜、中釜、上釜を築く。

元釜、中釜を一晚木を燃して乾燥し、翌朝、上釜、木呂および「つぶり」を据え付ける。木炭を上釜の中程まで装荷し、送風を開始する。乾燥の際の火種が残っているのですぐに木炭の燃焼が始まり、徐々に炉の温度が上昇する。その間に上釜を「かなしばり」と呼ぶ鉄の帯で補強し、炉周りには前回使用した釜土を砕いた土を敷き詰め叩き締める。ほど穴に「ほど蓋」と呼ぶ木栓をし、火勢を強くして木炭を炉一杯に装荷する。この木栓は木炭の燃焼が盛んに

なり空気がホド穴から吸引されるようになると取り外される。ほど穴は羽口と木呂管の繋ぎ目に開けてある穴で、ここから羽口先端の炉内を観察すると同時に羽口の補修を行う。なお、炉壁は最初内側が膨張し外に反るので天秤台との間に「押し棒」と呼ぶ鉄パイプを入れ、反りを防止する。操業が進行すると今度は逆に内側が収縮し内に反るので「かな引張り」と呼ぶ鉄線で引張る。

操業は表村下と裏村下で炉の長手方向に対し半分ずつ担当する。また、小金町(砂鉄置き場)側の半分を「ワテ」、反対側を「マエ」と呼び、4分割した領域について木炭と砂鉄の装荷量を記録している。砂鉄は羽内谷鉱山から採取され磁力選鉱されている。木炭はならやくぬぎ等の雑炭で拳大に砕かれている。

送風開始より約1時間後に「初種」と称する砂鉄を種鋤(木製のシャベル、1杯で約4kg)で表、裏のワテ、マエにそれぞれ各1杯ずつ計4杯装荷し、木炭を「竹簍(みの)」(1杯で約15kg)で表、裏各1杯ずつ装荷する。この後約30分毎に各々約4杯の砂鉄と約2杯の木炭の装荷を繰り返す。木炭は壁際に装荷し、砂鉄も壁際から約15cm辺りに壁に沿って入れて行く。

標準操業では、送風開始より約20時間までを「籠り」(こもり)、以後16時間までを「上り」(のほり)、以後28時間30分を「下り」(くだり)に区分し、この間の砂鉄と木炭の装荷量および送風量には標準的な値がある⁴⁾。

村下は多年の経験から、炎の色は「山吹ボセ」あるいは「キワダボセ」(木の名前で黄色をしている)とも呼んで、赤みが少なく黄色の強いものを良い炎としている。これは、いわゆる還元炎を意味している。そしてこの還元炎を持続するためには、砂鉄の装荷量と送風量に気を付けている。

村下はホド穴が満月色の状態で続くことが最も良いとしている。この色は炎が山吹色をしているのと同様に砂鉄がよく炉内で還元し、炭素を十分吸収していることを示している。そのために村下はホドの管理を余念なくおこなうが、これは結果として通風状態を良く保つことに専念している。

操業が順調であると2日目のはじめの頃より、「ジ・ジ・ジ」という音が聞こえだし、これは鉬が育ってきたこと、つまり鉄が沸いて来たことを示す。そしてこのときは同時に風の吸収(炉上への吹き上がり)と排出(湯池口からの吹き出し)が良好であるときでもある。

羽口から漏斗状に上昇する空気は炉壁近傍を通り、壁際の木炭を燃焼して、壁の温度を上げると共に、砂鉄中の酸化鉄と炉壁が反応するようになり、シリカ飽和に近いファイヤライト(Fe_2SiO_4)組成のノロを生成する。この反応は解体後の炉壁を見ると、羽口上約10cm辺りで起こっている。羽口近傍に流れ落ちてきたノロは、羽口前で炭素を吸

収し固液共存状態の粒鉄を含んだまま、鉬と炉壁の間を流れ落ち、鉬に溶着してこれを成長させ、ノロは元釜の炉壁を溶解しながら炉底に溜まり、湯池から流出する。鉬はこうにして成長するので次第に厚くなり、横幅も広くなる。したがって、玉鋼(最も上質の鋼)は鉬の真中ではなくマエとワテ両側のそれぞれ中心部分に生成する。

炉を解体した後取り出される鉬は幅約90cm、長さ約2.5m、厚さは厚い所で約50cmある。これを破碎して分類する。玉鋼の1級品(炭素濃度1.0-1.5mass%)、2級品(0.5-1.2%)および3級品(0.2-1.0%)、玉鋼の小粒の目白(めじろ)、品質が劣る銅下(どうした)と卸鉄(おろしがね)、さらに鉬の下部に生成する鉬銑(けらずく)がある。銑にはこの他、鉬の下に液体で溜まる裏銑(うらずく)と、ノロと共に流出した流れ銑(ながれずく)がある。通常は玉鋼が約70%を占めている。

4 たたら製鉄実験⁷⁾

著者は、たたら製鉄原理を研究するために、小型たたら炉を作り実験を行った。Fig. 2に示すように、炉は内容積が幅23cm、奥行き34cm、高さ48cmの耐火レンガ作りで、その上に同じ断面積で高さ約80cmの鉄板製の筒が乗せてある。炉内部には粘土などの内張りは張ってない。これは製鉄反応機構を簡単にするためである。羽口は炉底から約20cmの所に1本斜め下に向かって設置してある。

点火した後、木炭を炉上部にまで装荷し、操業の初めには炉底近くにもう1本の羽口(下羽口)を設置して炉底を十

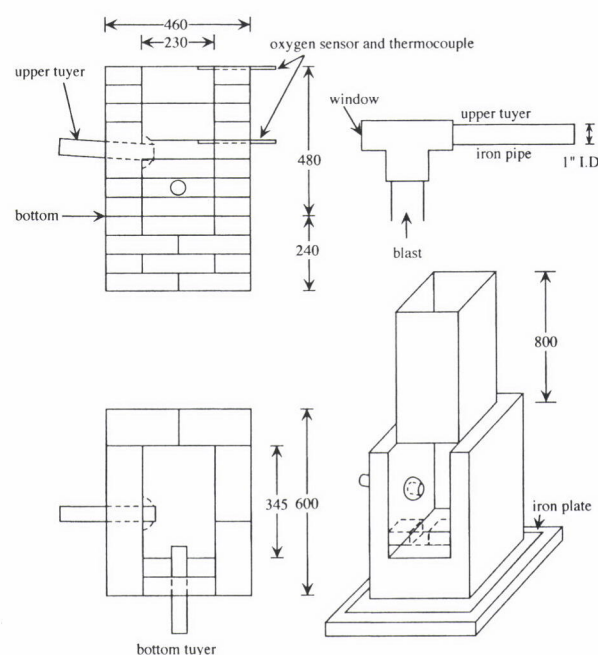


Fig. 2 Construction of a small Tatara furnace

分加熱する。そして炉底温度が約1200℃に達した後、砂鉄を約2 kg投入する。これは最初にノロを作る工程である。以後、下羽口を除去し、上部の羽口から送風しながら砂鉄と木炭を交互に装荷する。送風量は木炭の燃焼速度で調整する。10分に10cm程度の降下速度が適当である。砂鉄装荷から約4時間、砂鉄20kgと木炭約50kgから5～7 kgの鉬が造られる。

炉底温度は一時1200℃を越えるが、ノロの生成と共に降下する。羽口前の温度は炎に直接さらされるため、変動が激しいが1350℃程度になる。羽口上では1200℃程度にまで上昇している。羽口前の酸素分圧は 10^{-11} ～ 10^{-12} atmの程度であり、還元により鉄が生成する条件にあることが分かる。

砂鉄には TiO_2 や SiO_2 が数%含まれているのが特徴であり、我が国で採取される砂鉄のほとんどは TiO_2 をイルメナイト(Fe_2TiO_4)として10%程度含んでいる。この TiO_2 や SiO_2 はほとんど全てノロに含まれる。Fig. 3の SiO_2 - FeO - Fe_2O_3 系状態図には、小型たたら実験のノロの組成および昭和44年に日本鉄鋼協会が行った再現実験¹³⁾におけるノロの組成を示した。小型たたらのノロは炉の内張りに粘土を塗っていないので FeO 飽和に近い組成になっているが、日本鉄鋼協会の再現実験のノロはファイヤライト近傍の組成で、ヨーロッパのシャフト炉(レン炉)とほぼ同じ組成である。羽口の下温度は1200～1250℃でスラグは溶融しており鉄と共存する。平衡する酸素分圧は 10^{-11} ～ 10^{-12} atm程度であり、鉄は再酸化されない条件にあることが分かる。

羽口に設けた覗き窓から羽口前の状態を観察すると、還元された砂鉄が加熱した木炭上に落ち、少し輝度を増すと

同時に球状になって転がり落ちるのが分かる。これは鉄が炭素を吸収し液体を生成するので表面張力で球状になるためである。羽口下に生成する鉬はノロで覆われており、操業の途中で下羽口の跡から穴を開けて取り出すノロの中には、スラグ生成量が多い場合、直径数mm程度の球状の鉄が見られる。この粒鉄の炭素濃度は炭素を吸収する機会が炉内で不均一なためばらついているが、平均組成はケラの組成(炭素量1～1.5%)とほとんど同じである。また、鉬の上面にはこの粒鉄が溶着している。

紀元前1000～2000年に行われていたヒッタイトのボール炉のスラグは共晶点近傍で融点は1150℃と低くなっているが金属鉄とは平衡しておらず、製鉄がうまくいっていたとは言いがたい。このような場合、羽口上部で還元生成し羽口前で炭素を吸収した鋼は、スラグ中で脱炭しかつ鉄そのものも酸化して炭素濃度の低い鉄が生成する。

このように見てみるとスラグの役割は、羽口下に落下し、スラグ中に入った液相を含む鉄粒が再酸化されるのを防止し、かつ表面張力で互いに濡れて接合し大きく成長する場となっていることが分かる。鉄-炭素系の共晶温度である1154℃以上では液相が生成し、低い温度ほど生成する液相の炭素濃度が高くなる。後の鍛造工程のためには、鋼中の炭素濃度は高い程良く、したがって、なるべく低い温度で操業する方がよい。

生成した鉬や銑の特徴はシリコン濃度が非常に低く、現代の高炉法でできた銑鉄のシリコン濃度が0.2～0.4%であることと非常に異なっている。オーステナイトと液相が共存する状態では炭素の活量は約0.2であり、 CO ガス1 atmの時の平衡酸素分圧は1350℃で 1×10^{-15} atmになる。 SiO_2 が飽和しているとするシリコンの活量は 1×10^{-5} となり、シリコン濃度にして1%程度になる。羽口前の酸素分圧は 10^{-11} ～ 10^{-12} atm程度なので、ここでは炭素を吸収し溶融した粒鉄はシリカを還元しないが、炉底でノロと平衡するとシリコンが入る可能性がある。なぜシリコンが入っていないのか。この理由は、生成した粒鉄が速やかに鉬に融着し、一方、ノロは常に炉外に排出され鉬や銑と接触する時間が短いことにある。このように高炉法と比べるとたたら製鉄法はより低い温度でかつより高い酸素分圧で製錬を行っており、このことはリン濃度が低くなる原因でもある。硫黄濃度が低いのは木炭を使用しているためでもある。

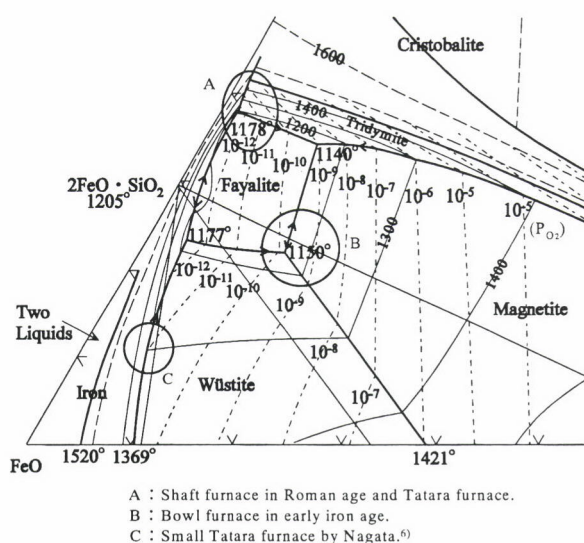


Fig. 3 Relation between oxygen partial pressure and slag compositions in SiO_2 - FeO - Fe_2O_3 system for the bowl furnace in Anatoria, the shaft furnace in Roman age, the Nittoho Tatar furnace and a small Tatar furnace by Nagata

5 低温製鉄法の試み

鉄鉱石をコークスで還元し1500℃の溶融銑鉄1 tを生産するために必要な炭素量は、理論的には約380kgである。現在の高炉では約500kg要しており、石炭に換算すると約

800kgになる。過剰な炭素120kgは、高炉内の反応を安定に持続させるために炉体の加熱などに要する熱であり、さらにCOガスとして炉頂から排出される炭素である。これを1350℃の低温で操業できるように出来たとしても炭素消費量はせいぜい20kg程度減るだけである。また、高酸素ポテンシャルにも出来ない。高炉は炉高を高くすることによって必然的に低酸素ポテンシャル操業になっているからである。一方、たたら炉内で起きている1350℃の温度で 1×10^{-12} atmの高酸素ポテンシャルという条件は低炉だからこそ成立する条件である。しかし、たたら炉そのものは燃料費が4から5で効率は現代の高炉とは比較にならない。このことは反応方法や反応容器を工夫することにより低温・高酸素ポテンシャル操業での溶融鉄の製造が可能で、かつ理論的な炭素消費量に近づける可能性を示唆している。

研究の第1歩として著者ら¹⁴⁾は、鉄鉱石と石炭を用いて溶融鉄が生成するための最低温度を研究した。また、低温製鉄によって鉄中の不純物濃度がどのように変化するかを調べた。さらに鉄鉱石中の脈石成分がどのように除去されるかを観察した。

まず炭材内装ペレットを窒素中で加熱する実験を行った。その結果、炉の温度を1350℃に設定すると約8分で鉄が生成する事が分かった。Fig. 4は炉の温度を1400℃に設定した場合の挙動であるが、ペレット中心部の温度と酸素分圧は特徴的な挙動を示している。最初の1分で揮発成分が放散し、還元が進行している間は吸熱反応のために温度上昇が遅くなる。5分半後に還元の終了が近づくにつれ酸素分圧が急上昇して約 1×10^{-14} atmに達し、C-CO (1 atm) 平衡酸素分圧より2桁以上大きくなる。そして酸素分圧が下がり始めると還元した鉄が炭素を吸収し鉄となり、鉄中炭素とCOガス (1 atm) 平衡酸素分圧に近づく。

このように、鉄鉱石粉と石炭粉の反応では1350℃で鉄を短時間に生成することが分かる。この実験でシリコン濃

度は0.4%程度となり、一方、リン濃度は1400～1500℃で0.05%、1350℃ではトレースである。硫黄濃度は1450℃では0.1%であるが1400～1350℃ではトレースとなっている。これらの結果は炭材内装ペレットでは還元終了時、炭素を吸収し溶解し始める時に酸素分圧がC-CO (1 atm) 平衡酸素分圧より2桁以上大きくなることに起因していると考えられる。

6 結言

たたら製鉄では、表面積の大きい砂鉄を木炭で還元し炭素を吸収させて銑や炭素濃度約1.5%の鋳を低炉で迅速に生成するが、その反応の特徴は、低温・高酸素ポテンシャル操業とスラグからの迅速分離であり、結果としてリンや硫黄、シリコン等の不純物濃度が低くなっている。この事は、新しい製鉄法を考える上で参考になる。鍛冶屋は「熱を掛けた鉄は脆い」と言う。銑や鋳の製造から大鍛冶における脱炭工程および鍛造工程、製品を造る火造り工程に至るまで、鍛冶屋はなるべく低い温度で作業をおこなうよう心がける。

低温で鉄を製造するという研究は始まったばかりである。その一環として我が国で従来行われてきた「たたら製鉄」の技術を研究することは重要である。

参考文献

- 1) 西岡常一：木に学べ，小学館，(1988)
- 2) 井垣謙三：ふえらむ，1 (1996)，343.
- 3) 館充：ふえらむ，1 (1996)，937.
- 4) 鈴木卓夫，永田和宏：鉄と銅，85 (1999)，715.
- 5) 鈴木卓夫，永田和宏：鉄と銅，85 (1999)，715.
- 6) 永田和宏，鈴木卓夫：鉄と銅，86 (2000)
- 7) 永田和宏：鉄と銅，84 (1998)，715.
- 8) 採鉱と冶金：講座「日本技術の社会史」第5巻，日本評論社，(1983)
- 9) 穴沢義功：鉄シンポジウム補足資料，'98国際金属歴史会議しまね，日本金属学会，松江，(1998)
- 10) 高橋一郎：ふえらむ，1 (1996)，854.
- 11) 依国一：明治時代に於ける古来の砂鉄製錬法(たたら製鉄法)，丸善，(1933)
- 12) 小塚寿吉：鉄と銅，52 (1966)，1763.
- 13) たたら製鉄の復元とその鋳について，たたら製鉄復元計画委員会報告，日本鉄鋼協会，(1971)
- 14) 小嶋理恵，福山博之，須佐匡裕，永田和宏：材料とプロセス，12 (1999)，770.

(1999年12月15日受付)

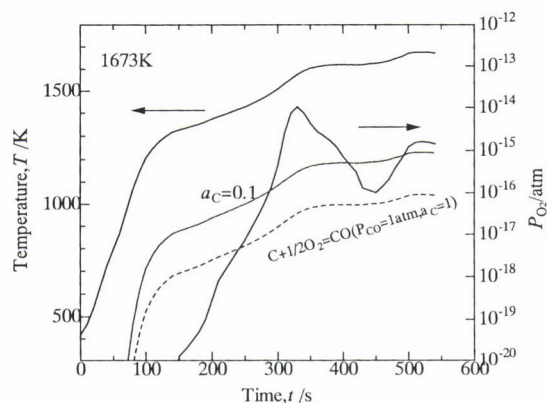


Fig. 4 Changes of Temperature and oxygen partial pressure in a carbon-iron ore composite pellet