たたら製鉄に挑戦

慶應義塾高等学校３年　スーパーサイエンスⅡ地球科学
H.M・I.R・K.M・U.S・K.T・K.S・T.M・T.T・T.K・M.Y・S.J・H.M・A.T・W.M・I.Y・K.T・K.K・S.D・A.R・H.T

概要

授業内で「たたら製鉄」に挑戦した。レンガと粘土で組み立てた炉を構築し、湘南海岸の砂鉄を使用した。１回目の操業では鉄の含有量が３割程度のものしかできなかったが、改良して臨んだ2回目では鉄の含有量を7割にまで高めることができた。完全な鉄を得るには届かなかったが、炉の構造や材料を改良することで、鉄と呼べるものをつくり出す可能性は感じた。

序論

スーパーサイエンスⅡ地球科学の後期の授業で、たたら製鉄に取り組んだ。たたら製鉄とは日本に古くから伝わる製鉄の方法で、明治になって近代製鉄にとって代わられるまで日本の主要な製鉄方法であった。近代製鉄にはない有利な特徴もあるということで、たたら製鉄について調べ、実際に行ってみることにした。

たたら製鉄の歴史と特徴

たたら製鉄の元祖となる加工技術が確立されたのは６世紀ごろである。中央アジアから中国・朝鮮を経由して伝わったとされるたたら製鉄は、古代には原料として鉄鉱石を使用していたが、やがて砂鉄を使用するようになり、砂鉄を産する山陰地方や中国山地で主に行われるようになった。室町時代後半には刀としての需要が増え、たたらの生産性向上が求められたが、この頃から新しく「足ふみふいご」が使われるようになり、大量生産が可能になった。たたら製鉄は「天秤ふいご」などの技術が発明された江戸時代に最盛期を迎えるが、明治に入ると欧米からの近代製鉄技術導入により次第に衰退し、やがて消滅した。現在は、技術伝承と日本刀用玉鋼の提供の目的で日刀保たたらが建設され、1977 年より操業を続けている。

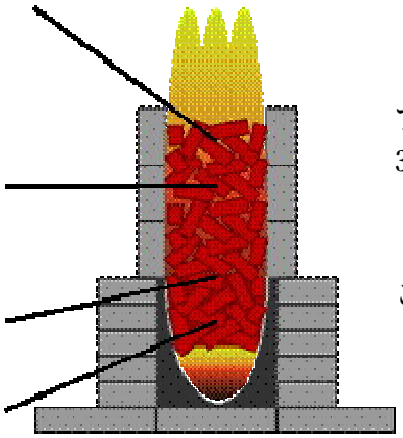
たたら製鉄と近代製鉄の大きな違いは、製鉄のしくみと生成鉄の性質にあるといえる。近代製鉄では鉄鉱石（一般に赤鉄鉱：Fe_2O_3）を高炉内でコークスを用いて還元する。このため非常に高い温度で反応が進むことになり、炭素などの不純物がある程度混じった銑鉄ができる。このため、これを転炉で精錬し、不純物を除去する過程が必要になる。

これに対し、たたら製鉄では一般に砂鉄（磁鉄鉱：Fe_3O_4）を木炭を用いて還元する。木炭ではあまり高温にならず、効率は悪いものの、純度の高い鋼が直接できる。鋼とは炭素を 0.6%程度しか含まない高純度の鉄で、硬さと粘り強さを兼ね備え、刀剣の刃先に用いられたりする。ただしたたら製鉄では、炉を毎回構築する必要がある。これは炉の材料である粘土が融けてノロというガラス状溶融物（スラグ）となり、炉壁が徐々に薄くなっていくこと、最終的には炉を壊して生成物を取り出すこと、が理由である。

たたら製鉄内の化学反応

炭が不完全燃焼すると一酸化炭素が生じる。

$2C + O_2 \rightarrow 2CO$



この一酸化炭素が酸化鉄を還元させる。

砂鉄は四酸化三鉄（Fe_3O_4）と表わせ、これが一酸化炭素と反応すると 2 価の酸化鉄（FeO）となる。この反応が進行する温度は 300～800℃である。

$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$

さらに高温の場所では、2 価の酸化鉄が単体鉄に還元される。この反応は 1000℃未満で進行する。

$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$

950℃以上の高温では、炭素が直接酸化鉄を還元する。

$FeO + C \rightarrow Fe + CO$

生じた鉄は炉底に溜まるノロ（溶融ケイ酸塩・スラグ）に埋没し、再度酸化されることを免れる。このノロは砂鉄と一緒に投入する砂や石灰粉が溶融したものであるが、炉をつくる粘土やレンガも融けてノロとなる。こうしてノロに包まれた鉄が生産される。

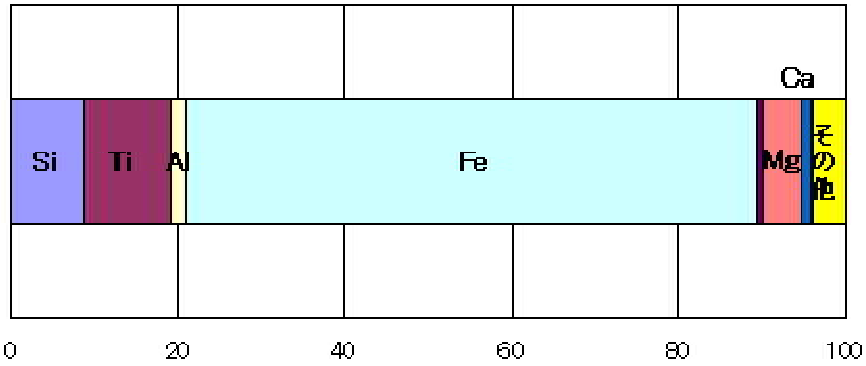
砂鉄の採取

材料となる砂鉄は、湘南・稲村ヶ崎海岸の砂中から磁石で拾い集めた。10 月 13 日（木）運動会の代休であったが、6 人が稲村ヶ崎に集まって、約 40kg の砂鉄を集めた。

江ノ島をバックに砂鉄集め

この砂鉄を慶應義塾大学理工学部応用化学研究科にて、XRF 成分分析を行ったところ、その元素成分は以下のようになった（質量%）。

砂鉄の元素成分

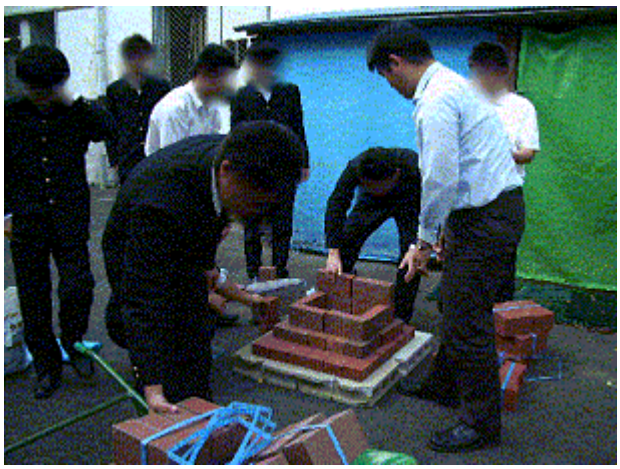


XRF をはじめ、特性 X 線の検出による元素分析の方法では、原子番号 11（Na）より軽い元素は検出できないらしい。つまり酸素の量はわからない。

酸素があるものとして推測すると、砂鉄の成分としては、大部分が酸化鉄（ほぼ磁鉄鉱 Fe_3O_4）であるが、Ti を幾分含む（チタン鉄鉱 Fe_2TiO_4 との固溶体）。また Si と Al と Mg は輝石 $(Mg\cdot Fe)SiO_3$ と斜長石 $CaAl_2Si_2O_8$ と置き換えられる。つまり輝石や斜長石の砂粒が僅かに混じった、含チタン磁鉄鉱の砂鉄ということになる。

１回目のたたら操業

10 月 20 日（木）放課後、翌日に行うたたらの炉を構築した。赤レンガを組み立て、モルタルでレンガ同士を固定しながら作業を進めた。送風口となる鉄パイプをモルタルで固定し、反対側にはレンガ1つ分となるノロ出し口を開け粘土でふさいでおいた。炉底からレンガ5段分を炉心、それより上はレンガを縦積みして煙突とした。煙突を設置する前に炉内に粘土を貼り付けた。これを一晩乾燥させた。

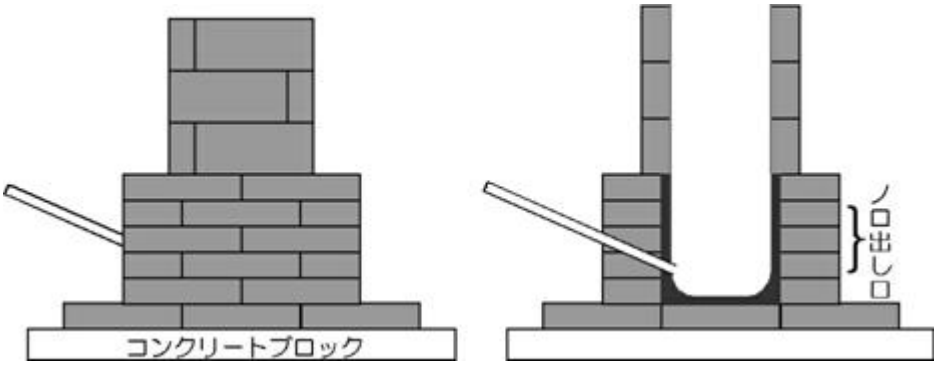


レンガ積み

粘土の貼り付け

送風機を取り付ける

完成した炉



たたら炉の構造

10 月 21 日午後 1 時よりたたら製鉄の操業を開始した。まだ粘土が完全に乾ききっていなかったので、炉内で新聞紙を燃やして強制的に水分を飛ばした。その後、炭を入れて火を付け、炉内の温度を十分に高め、約 1 時間後から砂鉄の投入を開始した。

砂鉄と同時にケイ砂と石灰粉も投入した。これはノロの成分となる。特にカルシウムが含まれることでノロが軟らかくなり、鉄が埋没しやすくなるのである。

たたら操業の様子

途中、レンガとレンガの隙間から水が染み出したり、それが湯気となって噴き出した。これはモルタルに含まれていた水が出てきたものと考えられる。またレンガの一部が割れてそこから炎が噴き出したりもした。炉心をつくっているレンガは、場所によっては触っても熱くないところもあった。

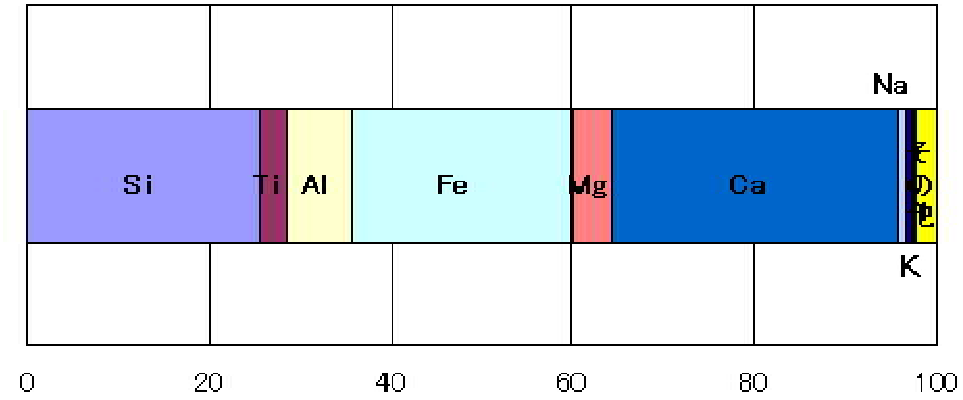
砂鉄を投入し始めてから 1 時間後、ノロ出しにかかった。炉の横のノロ出し穴に詰めていた粘土を抜き、ノロを出そうとしたがノロは出なかった。1 時間半後、もう一度穴を開いてみたがやはり出なかった。

砂鉄を投入し始めてから 2 時間後の 16 時半、炎が小さくなってきた。炭の燃えかすで通気が詰まったのかと思い、上の炭をどかしてみたが、炎はどんどん小さくなっていくので、原因究明のため炭が燃えて下方に降りるごとに煙突のレンガを 1 段ずつ外し、炉を徐々に解体していった。最後に炉心のレンガを外すと、中に真っ赤になったガラス状の塊があった。これが生成物（ケラ）かと思い、水を張ったバケツに入れて急冷させた。

炉の中にあったもの

これを教室に持ち帰って磁石などで調べてみたが、あまり磁石にもつかず、鉄ではないようだった。とりあえずかけらを採取して、先述した慶應大学の XRF 分析装置で分析を行った。成分を以下に示す。

生成物の元素成分



グラフからもわかるように、鉄の含有率（質量%）は 3 割に満たない。その代わり、カルシウムとケイ素が多く、これを合計すると 6 割近くになる。どうやら生成物は、ガラス状のものというより「鉄を多く含んだガラス」そのものだった。

１回目のたたら操業の反省と改良

第１回目のたたら製鉄では鉄を得ることはできなかった。非常に残念だったが、次回こそうまくいってほしいと思い、反省点と次回に向けての改良点を探した。

反省点

＊ 粘土やモルタルの乾燥が十分でなかった。そのため、熱が水の蒸発に使われてしまい、内部を高温に保つことができなかった。またレンガが熱で割れてしまい、炎が外に漏れていたことも、熱が逃げていたことと同じである。

＊　炉心につまったガラスが膨大すぎて、風がうまく回らなかった。

＊　煙突が低かった。そのため、還元される場所が狭く、うまく鉄ができなかった。

改良点

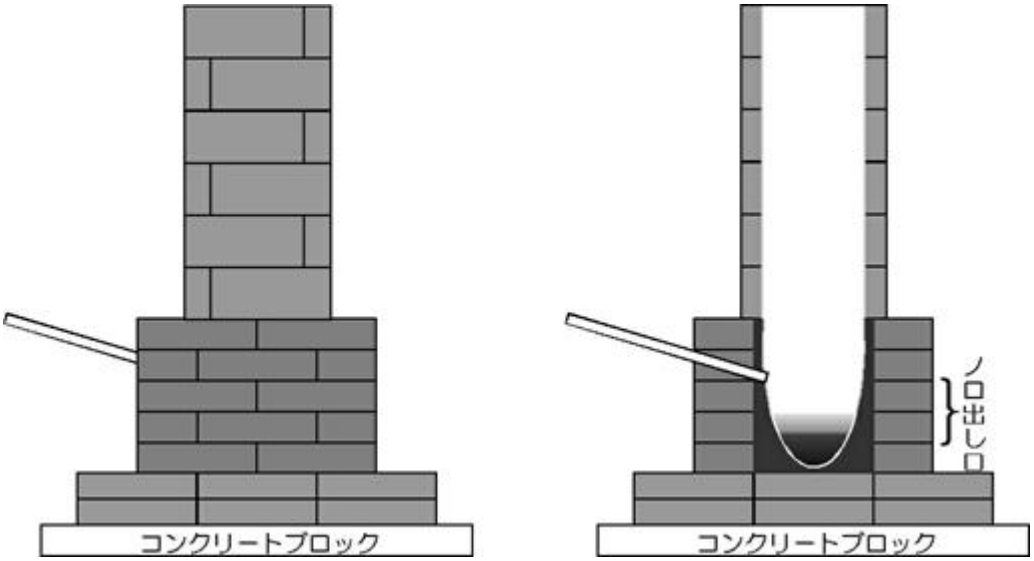
＊　粘土やモルタルの乾燥に十分な時間を費やすため、操業の４～５日前に炉の構築を行う。また、粘土の層を厚くしてひび割れを防ぐ。また操業中にひび割れや隙間ができてしまうかもしれないので、それをふさぐための粘土を確保しておく。

＊　炉心には耐火レンガを用いる。１回目に使ったレンガ（赤レンガ）は煙突部に用い、前回より煙突の高さを高くする。こうすることで、炉心をより高温にするとともに、砂鉄が還元される場所を拡大する。

＊　送風口の位置をやや上に移動し、生成物の上端に風が当たってより高温になるようにする。ノロ出し口もやや上にする。

＊　炭を改良する。バーベキュー用の炭（楢炭）を、刀鍛冶専用の炭（赤松炭）にする。

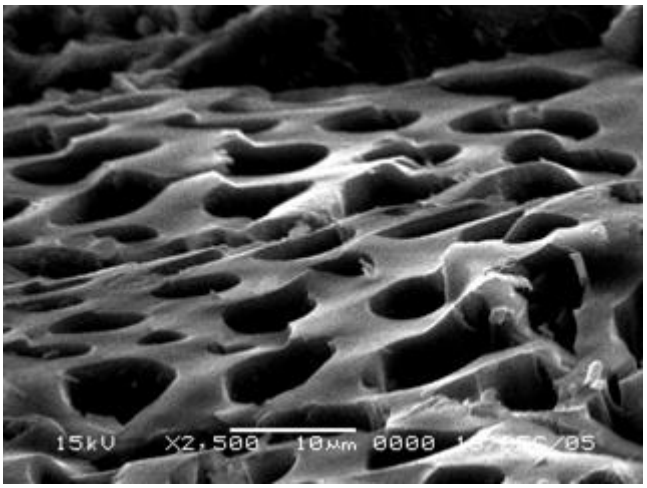
＊　石灰の投入量を減らす。スラグが出やすいようにと砂鉄に加えていた砂もなくし、ほとんど砂鉄と炭だけを投入することにする。

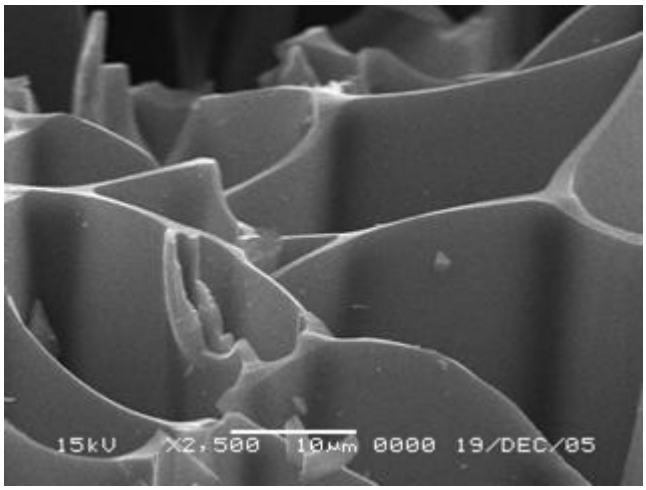


２回目のたたら炉の構造（炉心には耐火レンガ使用）

耐火レンガを購入してもらい、炉心部分に使った。これにより、余った赤レンガを煙突に使うことができた。

炭は刀鍛冶用の赤松炭を用意してもらった。物質材料研究機構のインターネット電子顕微鏡の担当者に新旧２種類の炭を郵送し、電子顕微鏡を用いて２つの炭を観察した。赤松の炭は壁が薄くて内部の空間が広く、非常に燃えやすそうな構造をしていた。短時間で燃えて高温になる「たたら製鉄」にはピッタリの炭といえる。





バーベキュー用の楢炭（左）と刀鍛冶用の赤松炭（右）の電子顕微鏡写真

2 回目のたたら操業

12 月 5 日（月）、たたら炉の構築を行った。耐火レンガとモルタルを慎重に積み上げ、前回使った赤レンガも使って、前回より 1.5 倍も大きな炉をつくった。美術科から前回よりたくさんの粘土をもらい、炉内に貼る粘土を厚めにした。これを 4 日後まで十分に乾燥させた。

12 月 9 日。13 時より 2 回目のたたら操業を開始する。今度は粘土もモルタルも十分乾いていたため、早速作業に入った。前回余った炭を炉に入れて点火し、炉内の温度を上げていった。赤松の炭は直径が 10㎝ 以上もある太いものだったので、のこぎりで 3㎝ 角に切った。この作業をみんなで行った。

14 時までは炭だけを投入し、それからは砂鉄も投入した。砂鉄の投入間隔を正確にするため、炭が燃えてレンガ 1 段分下がる時間を読んだ。するとだいたい 10 分くらいだった。そこで炭の投入間隔の間に砂鉄を 500g ずつ投入するようにした。

量りながら砂鉄を投入

これがノロ？

炎が闇に揺れる

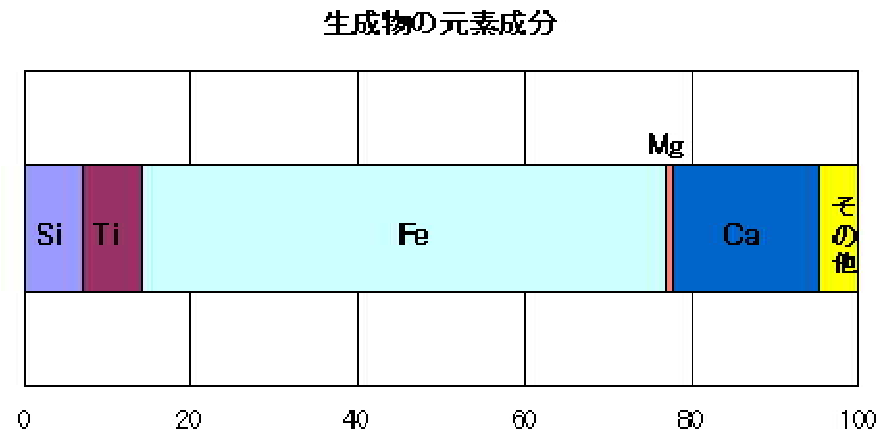
今度は隙間から湯気や炎が噴き出すことは前回より少なかったが、それでも気付くとすぐに粘土で補修した。砂鉄を投入して１時間後、ノロ出しを行うが出てこなかった。１時間半後、今度は少しだが黒いどろっとしたものが出てきた。これがノロと思われる。

16 時半ごろ、20kg の砂鉄がなくなった。終了過程に入った。30 分くらい炭だけを投入し、その炭が降りていくにつれて、上から順に煙突のレンガを外していった。煙突を外し終えると、やはり炉内に大きな塊があった。これをバケツの水で冷やして持ち帰った。冷やすと黒い塊となり、ところどころに鈍く光るような部分があった。

レンガを取り外す

炉心の赤い塊

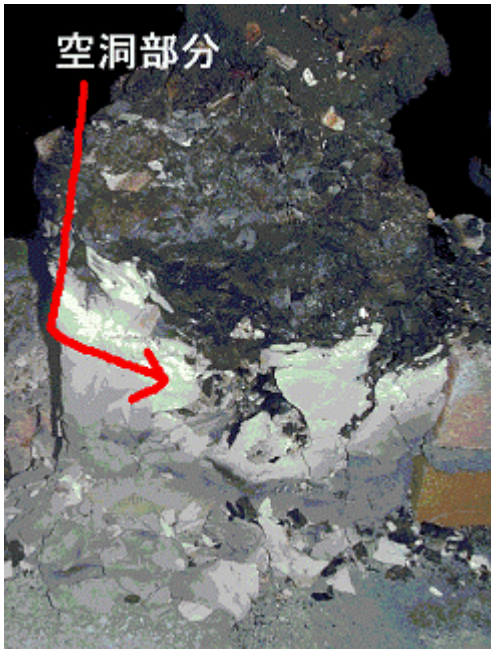
生成物には光沢の強い部分があり、磁石に強くくっつく部分も多い。鉄がかなりの精度でできていると思われた。そこでこの生成物を成分分析してみた。今回の生成物の（酸素を除いた）成分比は、鉄が 7 割を占め、カルシウムとケイ素は合わせても 2 割程度と、前回より格段に鉄の含有量が増した。しかし、残念ながらこれではまだ「鉄」とは呼べないものであった。



2回目のたたら操業の反省と感想

2回目のたたら操業でも鉄をつくることができなかったが、鉄の含有量は前回に比べてかなり高くなった。1回目の反省は活かされたと思われる。ただしまだ鉄にならなかったので、原因を探りたい。

今回、炉を解体してわかったことは、黒い生成物の下に空洞ができていたことである。下の写真で矢印の部分は送風管が通っていた場所で、白いものは炉内に貼り付けた粘土である。炉の底にノロが溜まらず、引っかかる形で送風管の上に残ったのではないだろうか。



犯人？と思われる炉底の空洞

3年生の授業ではここまでだったが、とても有意義で楽しい体験だった。発表会に出演して発表したのもいい思い出である。2度目でも鉄ができなかったことが唯一心残りであり、3月頃に3度目のチャレンジを行いたいと思う。そのときは、今度こそ鉄、それも鋼をつくりたい。