

特別講演

□第169回春季講演大会西山賞受賞記念特別講演
(平成27年3月18日)

たたら^{けら}の原理からマイクロ波製鉄へ

The Principle of Tatara Developed to Innovative Ironmaking
Heated by Microwave

永田和宏
Kazuhiro Nagata

東京工業大学
名誉教授



*脚注に略歴

1 はじめに

昭和54年に学生と岐阜県関市の刀匠孫六氏を訪問した。彼は、鍛冶炉で燃焼する木炭に砂鉄を入れ、数時間でひと塊の鋳^{けら}（銅塊）を造って見せてくれた。私は、鉄冶金学を研究してきたが、銅^{けら}があまりにも簡単に出来る事に驚いた。早速、大学でやってみたが4年間失敗続きで全く出来なかった。昭和58年夏に孫六氏の紹介で大野兼正刀匠を訪問し、たたら操業を見学した。そこで、炉の高さと炉下部の加熱が重要であると理解した。その後は全ての操業に成功し大きな鋳^{けら}を造る事ができている。

平成5年に新日本製鉄（株）の古崎宣氏の誘いで、島根県仁多郡横田町（現奥出雲町）で毎冬3代（回）操業している日本美術刀剣保存協会主催の「日刀保たたら」を見学した。箱型の炉に間欠的に吹込まれる風の音が響き黄色の炎が立ち上がっている。静寂な高殿と呼ぶ作業場で、砂鉄を約30分毎に2人の村下^{むらげ}（作業長）が炉に装荷^{すみたき}し炭^{すみ}炭^{たき}が木炭を入れる。この作業を3日3晩続け、最後に炉を解体して、大きな鋳塊を取り出した。10トンの砂鉄と12トンの木炭から1代で2.5トンの鋳塊を製造した。

製鉄技術は我が国へは6世紀後半に朝鮮半島から伝わった。当初は鉄鉱石を用いていたが、奈良時代末期9世紀頃砂鉄吹き^{すく}のたたら製鉄に発展し、江戸中期にその技術は完成した。たたら製鉄法で製造される鋳^{すく}（鋳鉄）や鋳は錆^{さび}難く、鍛接が容易で、高温加工性に優れる等現代の鉄には見られない性質を持つ事が知られている。特にその一部である玉鋼と呼ばれる高炭素鋼は日本刀の材料に用いられ、鋼の表面に様々な

模様を表出させる事ができる。私は、たたら製鉄と和鉄の優れた性質を現代の科学で解明する研究を始めた¹⁾。「たたらを現代に」が私の目標となった。

2 粉体製錬の魅力

砂鉄は大きさが0.1mm程度の微粉の難還元性の磁鉄鉱である。高橋²⁾は鉄山師であった絲原家の古文書から江戸後期のたたら製鉄では銑が主な製品である事を明らかにしている。同じ重さの粉体と塊では、粉体の方が表面積が大きくなる。鉄鉱石の還元は表面で起こる反応なので、微粉体の方が早く反応が進行する事になる。実際、たたら製鉄では砂鉄は30～40分で銑鉄になる。一方、塊状の原料を使う現代の溶鉄炉では6～8時間かかっている。製鉄のエネルギー伝達は木炭やコークスを燃焼させて得られる高温ガスを用いているので、粉体は飛散し通気性を阻害する。しかし、たたら製鉄では砂鉄の飛散を防止して高温を得、さらに熱効率を向上させるための様々な工夫がなされている。

3 たたら製鉄の独特な工夫

3.1 ソフトブローと中心送風による砂鉄の飛散防止

たたら炉は粘土で作られた箱型の炉で、長さ約3m、幅約1m、高さ約1.2mの大きさである。炉の長辺壁下部に片側19～20本、両側で38～40本の羽口が設置されている。送風は明治の終わり頃まで両長辺壁の脇に置いた2台の天秤轆を用いて番子と呼ぶ労働者がたたら歌を歌いながら調子を合わせて

* 昭和50年東工大で工学博士取得、51年ベネズエラ国立科学研究所主任研究員、53年東工大工学部金属工学科技官、助手、59年助教授、61年MIT客員助教授、平成4年東工大工学部教授、10年大学院理工学研究科教授、21年東京芸術大学大学院美術研究科教授、26年同大学定年退職。

人力で送風した。重労働で1時間毎に交代したので「代り番子」と言う言葉ができた。人力で送風出来たのは、炉高が低く圧損が少ないためである。送風量は、それぞれのたたら炉で異なるが、明治31年に俵³⁾が記録した^{あたいだにたたら}價谷^{あたいだにたたら}鑪では炉上面の平均速度は0.3~0.4m/sである。砂鉄の粒度は、60~80メッシュが最も多く、飛散する粒度は風速0.5m/sで90メッシュ(0.14mm)以上である。飛散しない程度のぎりぎりの送風量でかつ脈動なので吹き飛んだ細かい砂鉄は風が弱まる時に降下した。

砂鉄は両長辺壁に沿って炉壁から15~20cm辺りに装荷され、その上に木炭を壁際から入れた。したがって、炉の中心部では長辺壁に沿って木炭の層が窪んでいる。図1に示すように、吹込まれた空気は羽口前で木炭を燃焼し、発生した高温の還元ガスは圧損の少ない炉の中心部を吹き上がる。吹き上がるガスはその両脇に装荷された砂鉄に直接当たらないので飛散しない。

俵³⁾の^{と なみ た ら}礪波^{と なみ た ら}鑪の記録から計算すると、砂鉄の飛散量は1.69%である。一方、昭和44年に日本鉄鋼協会が主催したたたら製鉄の復元実験⁴⁾では、電動送風機による連続風が使われ、鉄の不明分を砂鉄の飛散として計算すると、11.6%もの砂鉄が飛散した事になる。

3.2 高温を得る方法

砂鉄が飛ばない程度の弱い送風で、砂鉄の還元と熔融に必要な1400℃程度の高温をどのように得たであろうか。これにはたたら炉独特の工夫がなされている。

図1に示すように、羽口のホド孔(空気送風管)は先端を細くしてある。外側は約6cm径であるが、空気の出口は3mm径程度である。したがって、空気は高速で木炭に当たるので燃焼が促進され高温を得る事ができる。実験では20m/sの速度で吹いて木炭を燃すと1350℃の温度が得られる。これは、我

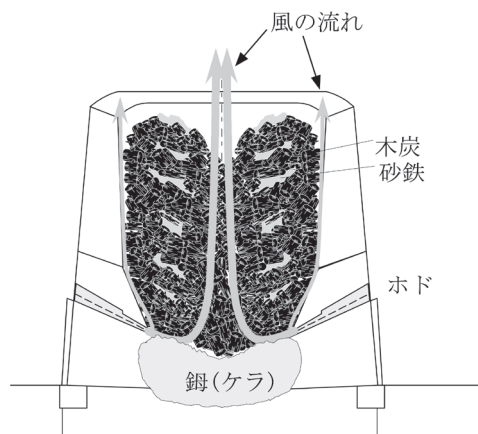


図1 たたら炉内の風の流れ（中心送風と脈動風による砂鉄飛散防止と熱効率の向上）

国に昔から伝わる火吹き竹の原理である。火吹き竹は竹の節に開けた小さな穴を通して吹くので空気抵抗が大きく力が必要。一方、傾斜を付けて穴を次第に細くすると空気抵抗はほとんど無くなる。

高温の還元ガスは炉の中心を吹き抜けるが、脈動風なので風が弱まった時に両脇に広がり砂鉄を加熱すると同時に還元を促進する。16世紀のヨーロッパの木炭高炉は連続風を用いている。2台の蛇腹の送風機に水車動力で一気に空気を吸い込んだ後、重しにより一定の速度で空気を炉に送った。これを2台用い半周期ずらして動かすと一定の風量で空気を送る事が出来る。この連続風による炉高7m程度の木炭高炉の燃料比、1トンの鉄鉄を作るための木炭の重量は約5トンである。一方、18世紀の脈動風によるたたら製鉄では2.8トンである。

4 和鉄はなぜ錆びないか

1980年に解体修理された法隆寺から白鳳時代の和釘が発見された。1000年以上経過しているがほとんど錆びていない。修理を行った棟梁の西岡常一は、曲りさえ直せばまた使えると評価した⁵⁾。古墳から発掘された刀剣等は、表面は赤錆びで覆われているが、中心部には鉄が残っているものが多い。この場合、鉄と赤錆びの間に緻密な結晶構造のマグネタイト層が形成されており錆の進行が抑制されている。井垣⁶⁾は、和釘のマグネタイト不働態被膜の腐食電流が現代鉄よりも小さい事を報告している。一方、現代の鉄には酸素がほとんど含まれていないので水滴中に溶解している酸素で腐食して孔食となり、斑点状の赤錆が発生して広がり層状の錆が形成される。

古主らは⁷⁾、鎌倉時代から江戸時代に作られた和釘の成分分析を、微小領域分析装置(EPMA)を用いて介在物を含まない鉄地部分で行い、炭素濃度が約0.1mass%の軟鉄中の酸素濃度が約0.2mass%もあり溶解度の100倍もの過飽和状態にある事を明らかにした。鉄-酸素系状態図で明らかのように、この様に過飽和酸素を含む鉄は570℃以下の温度では α -鉄とマグネタイトに分離する。それ以上、1360℃以下の温度では、 α あるいは γ 鉄とFeOに分離する。したがって、800℃近傍の温度で鍛造すると鉄地中に微細なFeO介在物が生成されると同時に、表面はFeO層で覆われる。これを空气中で冷却するとFeO介在物やFeO層はそのまま過冷されるが、表面近傍の過飽和酸素の鉄から約1 μ mの厚さのマグネタイト層が生成する。FeO層は湿気等によりさらに赤錆びに酸化が進むが、マグネタイト層は安定で錆の進行を抑制する。表面を研いで鉄地を顕した場合でも、過飽和酸素が瞬時にマグネタイト層いわゆる「黒錆」を生成する。

5 和鉄中の過飽和酸素

この大きな過飽和酸素濃度の生成は、たたら製鉄の工程に脱炭工程が無い事に由来する。

現代の鉄鋼生産では転炉で純酸素を銑鉄に吹付けて脱炭し、炭素やシリコン、リン等の燃焼熱で昇温して数十分で溶鋼が得られる。これは、1857年にベッセマーが発明した転炉法から始まっている。この方法では、脱炭が進行すると同時に溶鋼に酸素が溶解し、凝固時に溶解度の低い酸素が鉄から液体側に移行しCOガスが発生して気泡が出来る。ベッセマーは脱炭剤としてシュピーゲル・アイゼン（高炭素鉄マンガング合金）を溶鋼に溶解し、酸素をMnOとして除去する事でこの問題を解決した。現在、脱炭工程に用いているアルミニウムは酸素との親和力が他の脱炭剤と較べて非常に強いので、酸素濃度は数ppmに下がっている。

たたら製鉄炉内では、FeOは還元するが脈石は還元しない程度の弱還元雰囲気になっており、脈石はノロ（ファイヤライト組成のスラグ）に溶解する。したがって、表1に示すように、不純物濃度は非常に低い。砂鉄は還元されて鉄粒になり、木炭と接触して炭素を吸収し一部あるいは全部が溶解する。鉄粒の表面は液体で覆われ互いに凝集しながら炉内を降下する。羽口前は木炭の燃焼で1350～1400℃になっており、ここで鉄粒は明るく光り炉下部に落ちて行く。この光は鉄粒の表面が空気中の酸素で酸化されFeOで覆われ反応熱で発熱して温度が上がる。放射率が溶鉄が0.3に対しFeOが0.9という違いもある。

炉下部には溶融したノロ溜めが出来ており、そこに鉄粒が落ち込み互いに凝集し、また空気吹込みによる再酸化を防止している。炭素濃度が高い鉄粒は約3.5mass%の溶融銑となり炉床に溜り、低い鉄粒は温度の低下に伴ってオーステナイトを晶出し炭素濃度1.0～1.5mass%の鉬塊を形成する。玉鋼中の酸素濃度は約0.2mass%である。

たたら炉から流出した銑鉄は拳大の大きさに砕き、「大鍛冶場」で脱炭した。大鍛冶工程は「左下」と「本場」の2工程からなっている³⁾。左下では、羽口前に銑鉄をトンネル状に積み、小炭で覆って燃焼させ外から加熱して溶解すると同時に吹込む空気で脱炭した。銑鉄は炉床に溜り、平均炭素濃度

0.7mass%の「下げ鉄」にした。この工程は炭素の燃焼熱により1350～1400℃の温度に加熱され、溶解する銑鉄の表面を覆うFeOスラグとの反応で脱炭が進行する⁸⁾。したがって、鉄の歩留まりは100%に近い。1日に約300kgの銑鉄を1回約2時間程度で脱炭した。

次の本場では下げ鉄塊を10等分し、鉬塊の品質の悪い部分を加えて1回に約30kgを左下と同様に積んで脱炭を行い、平均炭素濃度約0.1mass%にした。この工程では羽口前で鋼表面に空気を吹き付け、鉄を酸化させてその反応熱で表面温度を鉄の融点直下の約1530℃に上げて溶解し、流れ落ちる溶鋼の脱炭を行った。そして炉から発生する「沸き花」と呼ばれる火花の形状と発生状態から炭素濃度を判断し、鉄の鉤で向きを変え直に凝固させた。脱炭した鋼塊を炉から取り出し、直に大工が4人掛けの向う槌で鍛造し板にした。これを4等分し長さ約60cm、幅約10cm、厚さ約2cmの軟鉄の鋼板にした。これを「包丁鉄」あるいは「割鉄」と呼んだ。歩留まりは60～70%であった。これらの鉬塊や包丁鉄の炭素濃度は不均質である。

「小鍛冶」と呼ばれた職人は、この包丁鉄から和釘や民生品を製造した。小鍛冶は、炭素濃度の不均質な鋼材を、「折返し鍛錬」と呼ぶ方法である程度均質にして使用した。明治10年に開催された第1回内国勸業博覧会の出品解説⁹⁾によると道具類は数回折返し鍛錬を行っている。釘屋奈都子ら^{10, 11)}によると、室町から江戸初期に作られた鎧の金属片である小札や鎖帷子に使われた鋼線は2～3回折返し鍛錬が行われている。江戸期の日本刀の製作技術を記した水心子正秀の著「剣工秘伝志」¹²⁾では20回程度の折返し鍛錬がなされている。この折返し鍛錬は、鍛接と鍛造が基本技術である。

鍛接は鋼どうしを重ね合わせ、藁灰と泥水を塗して火窯で加熱する。加熱の初期では、炎は紫色で木炭から発生する一酸化炭素ガスの燃焼の色を示す。10から20分後に炎は黄色を呈する。これはナトリウムの炎色反応によるもので、溶融したノロの生成が原因である。30分から40分後には、炎の色は橙色になり、直後に炎の中に細かい白い火花である沸き花が出始める。この段階では、鉄片の表面が急速に酸化して脱炭すると同時に鉄が酸化し発熱して表面が溶解する。溶融FeOが鋼の表面を覆っており、空気中の酸素はイオン化してO²⁻としてFeO中に入り、ホールが高速で移動して鋼の表面近傍の酸素イオンと反応し鉄を酸化する。溶融FeOで覆われた鋼の溶融表面では一酸化炭素ガス気泡が発生し、気泡が生成する時に強い力が鋼の表面を掃くので、鉄粉が気泡に補足される。これが空気中に放出され、酸化発熱して沸き花になる。梃子棒ごと鋼片を火窯から取出し、金床上で大槌で押さえるように数回打つ。これで鋼片は互いに鍛接している。また、打たなくても鍛接していることもある。沸き花は鉄が溶

表1 明治期のたたら製鉄による銑と鉬の組成 (mass%)

組成(mass%)	C	Si	Mn	P	S	Ti
銑 (價谷)	3.63	Trace	Trace	0.10	0.003	Trace
鉬 * (砺波)	1.32	0.04	Trace	0.014	0.006	Trace

*:Best quality in the bloom.

注：文献3) より作成

解した印である¹³⁾。

この様に、たたら製鉄、大鍛冶及び鍛冶では全ての工程で鉄を急速に酸化させ、発生する反応熱で鉄粒や鋼材の表面温度を局部的に上げて溶解し、直に凝固させる操作を行っている。鉄-酸素系状態図では、1528℃で酸素濃度0.16mass%に共晶点があり、溶鉄は溶融FeOと平衡する。図2に示すように、溶解炭素が増すとFeOと平衡する溶鉄中の酸素濃度はさらに増大する。鋼材表面の溶解と急速凝固を繰り返す事により、鋼材には約0.2mass%の酸素が過飽和に溶け込む。

6 製鉄エネルギー源の転換

筆者は、たたら製鉄の研究を通じて、表面積の大きい粉鉄鉱石を用いた鉄鋼製錬法の開発に興味を持った。高速で酸化鉄粉の熱炭素還元反応を起こさせると、この反応は吸熱反応なので反応速度はエネルギー供給律速になる。高温ガスでは前述のように通気性の確保が困難になる。(株)神戸製鋼所が開発したITm3は¹⁴⁾、鉄鉱石粉と石炭を混合して団子状にした炭材内装ペレットを、反射炉を用いて輻射熱で加熱し15分で銑鉄ナゲットを製造する方法である。しかし、輻射熱は波長が2μm程度の電磁波であり影になる部分は熱伝導でしか加熱されないの加熱効率は悪い。この他、アーク炉は輻射熱で加熱するので固体の酸化鉄から固体の還元鉄ができる固体固体間反応に対しては効率が悪い。高周波加熱は波長が非常に長い電磁波を用いるが、エネルギー密度が小さく金属表面の自由電子しか励起する事が出来ない。したがって、アーク炉や高周波炉は金属の溶解に使われている。

そこで、これらの中間の波長領域にあるマイクロ波に注目した。マイクロ波は300MHzから300GHzの範囲にある電磁波で、電子レンジ等工業用に使用できるのは2.45GHzである。

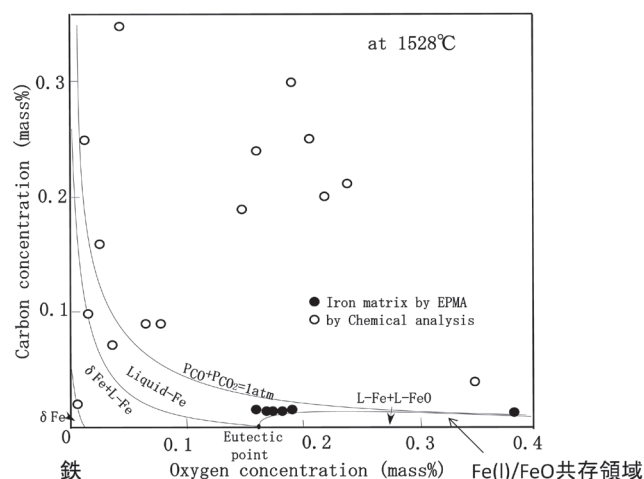


図2 Fe-O-C状態図と和釘の組成(黒丸はEPMA分析、白丸は化学分析で介在物を含む)

米国では915MHzも工業的に使われている。電磁波は電場と磁場からなり、物質中の原子の最外殻電子がこれらの場で励起されエネルギーを生じる。物質は分極と磁気モーメントに起因する磁気現象でエネルギーを生じ、原子振動による熱に変換される。物質の電磁氣的性質を表す物性値は分極率と透磁率である。これらは波長の関数であり、マグネタイトは2.45GHz近傍で最大値を示す。グラファイトは波長が短くなると減衰するが、2.45GHzで大きく発熱をする。ここで重要な事は、原料自身が発熱することである。波長が12cmと長いので粉体の隙間を通して深く浸透する。したがって、断熱性の良い炉を設計すれば熱効率を上げる事が出来る。

製鉄でヘマタイト鉱石中の酸素を除去し炭素濃度3mass%の銑鉄にするために必要なマスバランス上の炭素は銑鉄1トン当たり215kgである。原料の加熱と還元反応に必要なエネルギーをマイクロ波で発生させると、製鉄からの炭酸ガスの発生量は大きく削減できる。

マイクロ波発生装置は現在、マグネトロン、クライストロン及びジャイロトロンの方式があり最大1MWである。いずれも熱電子を高電圧で加速する、いわゆる真空管と同じ原理で効率は50%程度である。近年、GaN半導体を用いた高速スイッチング素子が開発され、2GHzで500Wの効率80%のマイクロ波発生素子が開発された。これを多数並べ位相を調整して放射方向を制御するフェーズドアレイ方式を用いると、マイクロ波を狭い領域に集中させる事が出来る。

7 たたらの原理を現代に

電気炉を用い窒素雰囲気中で炭材内装ペレットを急速加熱すると、ペレット表面近傍の酸素分圧はたたら製鉄と同じFe/FeO平衡酸素分圧に近い値となりリン等の不純物濃度の低い銑鉄が得られる¹⁵⁾。

磁鉄鉱粉末にグラファイトを12mass%を混合し、10gを出力1kWの家庭用電子レンジで空気中で加熱すると15~20分で銑鉄が生成する。さらにマイクロ波炉を用いて3kWで20gの炭材内装ペレットを窒素ガス中で加熱すると、5分で1370℃に到達し銑鉄になり溶け落ちた。マイクロ波の出力を上げ加熱速度を早くすると銑鉄中のSi、P、硫黄等の不純物濃度は減少し炭素濃度は増加した¹⁶⁾。これは系内の酸素分圧が大きくなると同時に、マイクロ波の吸収が還元鉄と炭材の接点で起こり局部的に温度が上がる事による。

マイクロ波炉は金属製のチャンバー内で反射を繰り返して均一な場を作る方式が一般的である。これでは原料近傍のマイクロ波しか吸収しないので利用効率は低い。そこで、図3に示すように、8本のヘリカル型アンテナを用いた出力20kWマイクロ波集中型加熱炉を開発した。この炉を用いて、

連続製鉄炉を構築し、加熱開始から6時間で約10kgの銑鉄を製造した。反応炉を構築する耐火物は約1000℃以上になると電子伝導性が現れ、マイクロ波を吸収して電磁誘導で急速に発熱し溶解するいわゆるサーマル・ランナウェイが起る。これが起るとマイクロ波は原料に届かなくなる。反応炉の外側を冷却し、1000℃以下にする断熱構造が重要である。この方法で電力の利用効率は20%であった¹⁷⁾。さらに規模を拡大するため、30kWクライストロン4台を用いた120kW炉を開発した。42kW出力で日産換算で銑鉄240kgを達成した。効率は40%であった。マイクロ波炉で製造した銑鉄の成分を表2に示す。特に燐濃度が低い事が分かる。

8 マイクロ波の非熱効果

ニッケルの炭素熱還元反応をマイクロ波加熱で行うと反応の活性化エネルギーは通常の電気炉加熱の場合と較べると小さくなる。この様な効果は、セラミックスの焼結や溶液を用いた化学反応で多数の事例が報告されている¹⁸⁾。マイクロ波照射による反応の活性化エネルギーの低下や迅速かつ選択的な反応現象等はマイクロ波効果あるいは非熱効果と呼ばれている。筆者は、マイクロ波が微結晶体表面でイオンの熱振動に近いフォノンを生成し、これが力学的に反応を促進し見

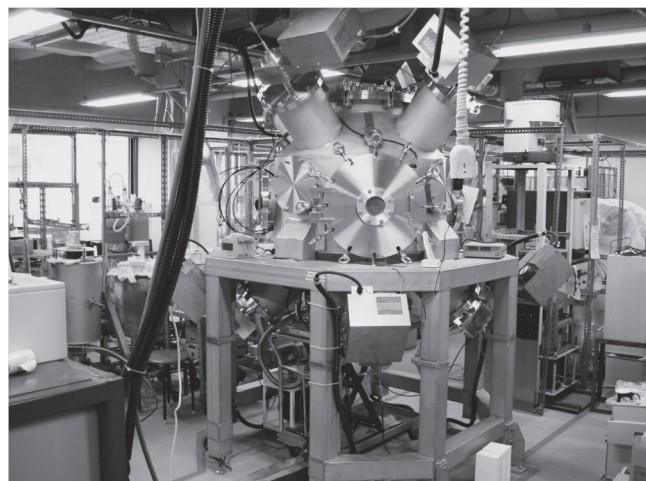


図3 20kW2.45GHzマイクロ波ビーム集中型加熱炉

表2 マイクロ波製鉄で製造した銑鉄と高炉銑の組成 (mass%)

組成	C	S	P	Si
マイクロ波a-4	2.234	0.0912	0.0064	0.1839
マイクロ波a-5	2.847	0.1598	0.0039	0.0843
A社BF	-	0.027～0.029	0.106～0.111	0.49～0.80
B社BF	-	0.038～0.040	0.107～0.109	0.48～0.65
C社BF	-	0.033～0.043	0.078～0.081	0.63～0.72

掛けの反応の活性化エネルギーを小さくしていると考えている。この理論的考察は佐藤¹⁹⁾の解析を参照されたい。

9 たたらで理科教育

筆者が考案した「永田式たたら炉」を用いて、小学生から高校生までの子ども達とたたら製鉄操作を楽しんでいる²⁰⁾(図4参照)。8月から12月までかけ、砂鉄採取から炭焼き、たたら操作、鋸からペーパーナイフ作りまで、原料の調達から作品作りまでを体験させる。その工程で砂鉄が磁石に付く状態、炉の熱さ、鉄塊の重さと木炭の軽さ、あるいは物質が互いに作用しあい様々に変化する様子をつぶさに観察し、五感で感じ取る。これにより自然現象に興味を持ち、その中に現れる現象を科学的に考えるきっかけにしてくれる事を期待している。

10 おわりに

マイクロ波を用いた粉体鉱石の高速高純度製錬法は、製鉄の他、高純度シリコンの製造やイルメナイトからの酸化チタンの製造等に成功しており、マグネシウムなど他の製錬にも応用が可能である。マイクロ波の非熱効果は非常に興味深い現象であるが、まだ十分研究が進んでいない。たたら製鉄では過飽和酸素鋼の性質も不明な所が多い。これからの研究に期待したい。たたら製鉄は世界で唯一の粉鉄鉱石利用の製鉄・製鋼法であり、たたら技術の世界遺産に推薦したいと願っている。



図4 たたらで理科教育(子どもたちが炉内を覗いている)

参考文献

- 1) 永田和宏：たたら製鉄の技術論 (1) ～ (36), 補遺 (1) ～ (5), 金属, 75 (2005) 7～81 (2011) 5.
- 2) 高橋一郎：ふえらむ, 1 (1996), 854.
- 3) 俵國一：古来の砂鉄製錬法, 丸善, 昭和8年, 復刻版, 館充監修, 慶友社, (2007)
- 4) たたら製鉄復元計画委員会：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, 昭和45年.
- 5) 西岡常一：木に学べ, 小学館, (1988)
- 6) 井垣謙三：古文化財之科学, 28 (1984), 18.
- 7) Y.Furunushi and K.Nagata : ISIJ Int., 54 (2014), 1074.
- 8) K.Nagata and T.Watanabe : ISIJ Int., 54 (2014), 1059.
- 9) 星野欣也, 平野一雄：東京農業大学一般教育学術集報, 16 (1986) Feb., 9.
- 10) 釘屋奈都子, 永田和宏, 北田正弘, 桐野文良：日本金属学会誌, 77 (2013) 8, 918.
- 11) 釘屋奈都子, 永田和宏：日本金属学会誌, 78 (2014) 4, 149.
- 12) 成瀬関次：古伝鍛刀術, 二見書房, 昭和18年.
- 13) 永田和宏, 渡邊玄, 釘屋奈都子：鉄と鋼, 97 (2011), 637.
- 14) 根上卓也：金属, 79 (2009) 55, 145
- 15) K.Nagata, R.Kojima, T.Murakami, M.Susa and H.Fukuyama : ISIJ Int., 41 (2001) 11, 1316.
- 16) 永田和宏：マイクロ波化学プロセス技術Ⅱ, 第6章, シーエムシー出版, (2013), 239.
- 17) K.Hara, M.Hayashi, M.Sato and K.Nagata : ISIJ Int., 52 (2012) 12, 2149.
- 18) 最新マイクロ波エネルギーと応用技術, 産業技術サービスセンター, (2014)
- 19) 佐藤元泰：最新マイクロ波エネルギーと応用技術, 産業技術サービスセンター, (2014), 376.
- 20) NPO ものづくり教育たたらホームページ : <http://www.tatara.or.jp>

(2015年4月1日受付)