

# 小型たたら炉による鋼製錬機構

永田 和宏\*

Steelmaking Mechanisms for a Modified Tatara Furnace

Kazuhiro NAGATA

**Synopsis** : Tatara was used to be a traditional process to produce solid steel, so called "Kera", and/or liquid pig iron, so called "Zuku", from iron sand and charcoal using the box type furnace with blowing cold air intermittently. A modified Tatara furnace has been examined on the production mechanisms of "Kera". Temperatures and oxygen partial pressures in the furnace were measured by means of thermocouples and oxygen sensors with solid electrolyte of zirconia. Iron sand and a piece of "Kera" produced in the bottom of furnace were sampled and analyzed chemically or by an electron probe micro analyser. Iron sand is reduced above tuyere and absorbs carbon on fired charcoals in front of the tuyere at about 1350°C. Many small balls of liquid steel with different carbon content were found in molten slag pool of FeO-saturated silica, so-called "Noro", and cohere each other to grow into a bloom. The characteristics of Tatara steelmaking process are low temperature for carbon absorption of steel at about 1350°C, high oxygen potential in the molten slag of FeO-saturated silica and hypo-eutectic carbon content in steel.

**Key words**: reaction mechanisms; steelmaking; iron sand; charcoal; bloom; Tatara.

## 1. 緒言

我が国古来の製鉄法であるタタラ吹き（たたら製鉄と呼ぶ）は、砂鉄と木炭を原料とし、直接、高炭素鋼（ケラ）あるいは銑鉄（ズク）を製造する方法である。そのケラは鉄-炭素合金で不純物が少ないことを特徴としている。特にシリコン濃度が非常に低い。タタラ製鉄は大正末期にその経済性を失い商業的生産は終わったが、一時第2次大戦まで靖国たたらとして復活したことがある。ケラは、日本の伝統技術である折り返し鍛錬に耐える日本刀の原料として不可欠の材料であるが、現在では島根県仁多郡横田町島上で、昭和53年より日本美術刀剣保存協会が毎年冬に4回操業しているだけである。著者は岐阜県関市在住の刀匠大野兼正氏の研究を参考に昭和54年以来実験を積み重ね、4年の試行錯誤を経て、昭和59年より小型たたら炉の操業方法を確立した<sup>1)</sup>。本報告ではこれまでの操業記録を基にしたたたら吹きによる鋼製錬機構を考察する。

たたら製鉄では羽口の上で直接還元が起こり、羽口下部の炉底に平均炭素濃度1.5%程度の固体のケラが直接生成し成長する。昭和初期までのたたら製鉄の研究は俄国<sup>2)</sup>が行っており、その後もいくつかの研究がなされてきた<sup>3)</sup>。俵はその当時たたら製鉄に従事していた人達の話として次のように述べている。「砂鉄は約20分間の後に炉内を300mm下り、40分間を経て羽口の上部に厚さ100mm位の層に堆積し、半ば還元せられたる粒すなわち俗に粟ボウソウの棚を造り、次の20分間を経て底に下ると称せら

る。籠り時期より上り時期において与えられたる砂鉄の一部はその鉄分還元せられ進んで炉内において炭素を十分吸収し銑鉄となり得べし。しかれども他の一部はその鉄分還元せらるるも、十分炭素を吸収し得ざるものあるべく炉底に固着しいわゆるケラを造るべし。」さらに局所的に均質な炭素量のケラが生成することについて、「炉内の温度上昇し過剰なる木炭の存在する時も、各砂鉄粒の還元せらるる程度は等しからず、その内多量の炭素を吸収せしもの先ず溶銑鉄の小粒となりて羽口以下に滴下す。その温度低下すると同時に、すでに堆積せるケラ塊に接触し巧にこれを核となし、その一部は結晶して固体に変わり、残余はそのまま更に滴下し炉底に溜まるべし。」と述べ、鉄-炭素二元系状態図を用いて、ケラの生成がオーステナイト固溶体と液相の固液共存領域で起きることを指摘している。この製鉄原理は明らかに直接製鉄法や間接製鉄法とは異なっている。直接製鉄法は天然ガスにより鉄鉱石を還元して海綿鉄を造り、それを電気炉で溶解し鋼とする。間接製鉄法は溶銑炉で炭素飽和の銑鉄を造り、それを転炉で脱炭して鋼とする。

俵のケラ生成反応機構には不明な点がいくつかある。①粟ボウソウの棚とはどんなものか、②スラグの役割は何か、③還元した砂鉄が吸炭する場所はどこか、④ケラと滴下した銑鉄粒との反応はどのように行われるのか等である。本研究は、ケラの生成および成長の機構を小型たたら炉を用いて熱力学的に解明するものである。

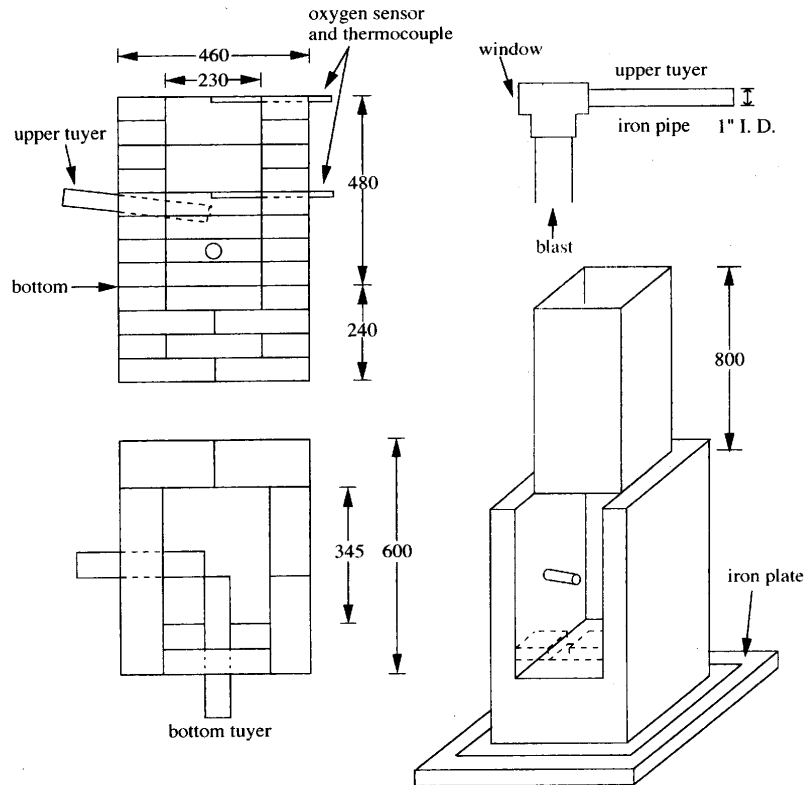


Fig. 1. Construction of a small Tataru furnace.

## 2. 実験

### 2.1 炉の構造

Fig. 1に炉の構造を示す。地面に鉄板を敷き、その上に建築用のブロックで土台を築く。その上にレンガで炉を築く。レンガはロウ石やマグネシアなど熱伝導度の小さい物で耐熱度が1300°C程度あれば十分である。長さや幅が2:1になっているレンガ(230×114×65 mm)が積み易い。炉内はレンガ1×1.5枚の広さで、高さはレンガ8枚分である。炉底から4枚目の位置に羽口(横羽口)を1本設置し、また操業の初めに炉底を加熱するための羽口(底羽口)を1本設置した。羽口には内径2.54 cm (1 inch)の鉄管を用いた。横羽口の角度はレンガの厚さと幅により決まる程度の約20度で、炉内には壁から約4 cm突き出させて、その周りに1400°C程度に耐える粘土で保護した。底羽口は炉の手前正面のレンガ2枚目の位置に水平に設置した。横羽口には、Fig. 1に示すように塩化ビニール製のT型管を用いて内部観察用の窓を設置した。窓には緑色の色ガラスを用いた。

炉の内壁や底部は粘土で内張りせずそのままにした。これは炉内反応を単純にするためである。炉底には木炭の粉や破片をレンガ1枚分の厚さに敷き詰め、中央を少し窪ませた。手前正面にレンガを積み、その上に厚さ1 mmの鉄板製のシャフト(断面はレンガ3×1.5枚の広さの煙突で、高さ80 cm程度)を乗せた。

送風機は吸い込み型掃除機の空気の吹き出し口を利用

し、送風量はスライダックで電圧を調整して制御した。送風量は木炭の燃焼速度で調整し、木炭が10分間に約10 cm降下するようにした。

### 2.2 温度と酸素分圧測定

温度の測定は炉底中心部、羽口の反対側の壁、およびレンガとシャフト部との境(横羽口上約25 cm)の3カ所である。酸素分圧の測定は羽口を除く2カ所で、いずれもレンガの壁から約5 cm中に入った位置にセンサーを設置した。酸素分圧測定用のセンサーは、マグネシア安定化ジルコニア( $ZrO_2-9mol\%MgO$ )の一端閉管を固体電解質に用いた酸素濃淡電池で、一端閉管の外径と内径はそれぞれ8 mmと6 mmである。測定極は直径0.5 mmの白金線を管の先端の外側に2回巻いたもので、砂鉄との反応を避けるためにアルミナ管で覆い、その先端にわずかに露出するようにした。管の内部は参照極とし、NiとNiOの混合粉末を充填した。温度は測定極側に設置したR型熱電対で測定し、その白金線を電池の電極として共用した。炉底温度はR型熱電対で測定し、アルミナ管で保護した。

### 2.3 操業方法

砂鉄20 kgと木炭を約50 kg使用した。砂鉄は島根県斐伊川産山砂鉄、日野川産川砂鉄、ニュージーランド産海砂鉄および犬吠埼飯岡町海岸で採取した砂鉄を用いた。Table 1にそれらの分析値を示す。犬吠埼飯岡町海岸で採取した砂鉄以外は磁力選鉱されている。木炭は岩手産松炭を用いた。

こぶし小程度の大きさに切った木炭を炉に挿入して点火

し、底羽口から送風を開始した。木炭の燃焼速度は10分間に10cm下がる程度に送風量を調節した。これは木炭約2kg/10分に相当する。木炭をシャフト部上部まで一杯に入れ、炉底温度が1000°C程度になるまで加熱した。その後、砂鉄を1kgずつ2回10分おきに木炭と交互に挿入した。炉底にノロが生成し始めると炉底温度が下がり始めるので、そこで送風を横羽口に切り替え、底羽口を撤去し跡をモルタルで塞いだ。以後、約10分おきに砂鉄1~1.5kgを木炭と交互に挿入した。砂鉄20kgを挿入し終わったら、そ

の後は砂鉄と木炭の挿入を止め、そのまま燃焼を続けた。シャフト部下まで木炭が燃焼したらシャフトを外し、送風を少し弱めた。同時にイネ科の草を乗せた〔火伏せ〕と言われている。木炭の燃焼に従って徐々に炉手前のレンガを外し、羽口が見える位置まで木炭が燃焼してきたところで送風を止めた。そのまま放置し、炉内から沸騰音が聞こえなくなったらケラとノロの塊を取り出し、水中に投入して冷却した。冷却後、ケラ塊に付着しているノロをハンマーで除去した。作業時間は火入れから取り出しまで約5時間であった。砂鉄の種類によっては生成するノロが多くなったので、途中で底羽口の跡に穴を開けノロ出しを行った。採取したノロおよび生成したケラは化学分析とEPMA (Electron Probe Micro analyser)を用いて成分分析を行った。

Table 1. Chemical compositions of iron sands (mass%).

Samples	T-Fe	FeO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	S
Hino River	64.0	24.0	2.1	4.8	1.22	0.34	0.6	0.02
Hii River (mountain)	58.1	23.4	6.7	7.9	1.59	0.76	0.48	0.02
Newzealand coast	55.8	23.0	7.0	4.2	3.28	2.97	2.06	0.02
Iioka coast	35.6	16.1	11.1	24.9	2.74	9.18	2.45	0.05

### 3. 結果

#### 3.1 炉内温度と酸素分圧

Fig. 2とFig. 3に斐伊川産砂鉄を用いた場合の炉内温度と

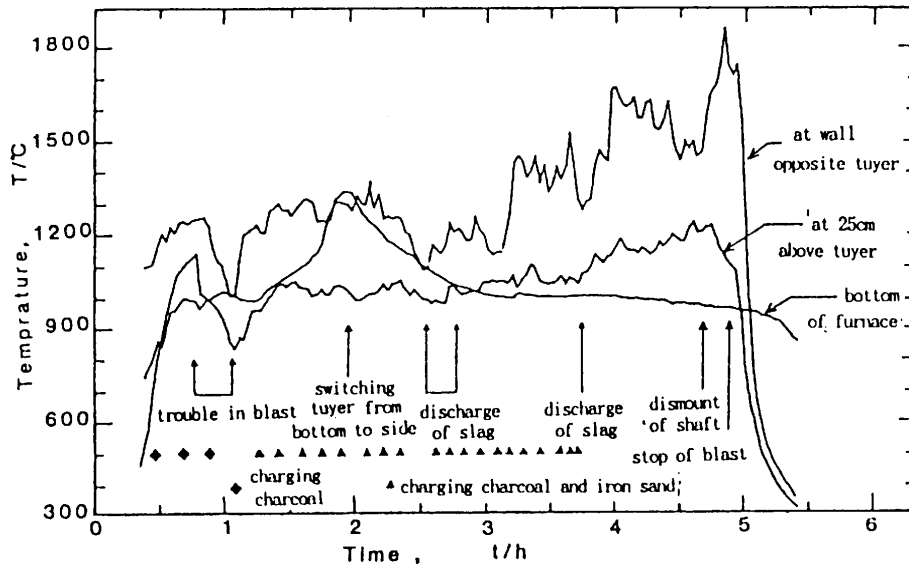


Fig. 2. Temperature changes in the small Tataru furnace during operation.

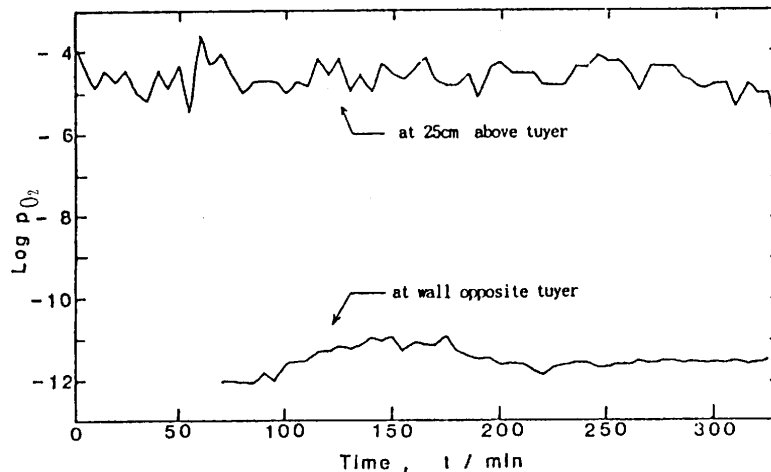


Fig. 3. Oxygen partial pressure changes in the small Tataru furnace during operation.

Table 2. Chemical compositions of small steel balls suspended in molten slag poured out from a Tataru furnace during operation. (Using Iioka coast iron sand for the Tataru furnace at the Higasi No.1 elementary school)

No.	Chemical composition (mass%)				Diameter of particle (mm)	Analysis area and observations
	C	Si	P	S		
11-1	2.38	0.0004	0.174	0.0207	1.5	surface:cementite center:parlite
11-2	1.11	0.0008	0.173	0.0084		
12	2.55	0.0054	0.493	0.0790	5.0	cementite, graphite Phosphurized iron
13	0.77	0.0129	0.090	0.0091	2.0	containing slag
14	0.87	0.0032	0.086	0.0081	8.0	martensite
bloom (Kera)	1.28	0.0165	0.032	0.0049	about 100	

酸素分圧の操業時間に対する変化を示した。炉底温度は一時1300°Cまで上昇しているがノロの生成により次第に低下した。羽口上部25 cmの所の温度は1100から1200°C程度であり、酸素分圧は $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$  atmであった。羽口前の温度は1300°Cから砂鉄挿入終了後には1500°Cを越えた。これは木炭の燃焼に従って量が減少するために通気抵抗が減少し、送風量が増加するためである。酸素分圧は $1 \times 10^{-11}$ から $1 \times 10^{-12}$  atmを示した。

### 3・2 羽口からの炉内観察

羽口の窓から観察すると、還元したと考えられる多数の砂鉄が燃焼する木炭の上に個々に落下あるいは炭と共に落下し、一瞬発光して丸い小粒になり、粒同士が互いに結合してより大きい粒になって、炉下部に転がり落ちていた。一方、ノロは木炭の間を粘性の高い液体状態で下っていた。

### 3・3 ノロ出しと粒鉄

日野川産川砂鉄は珪砂約5%、チタン約2%で、ノロ出しは容易に行えた。これはノロがFeO-SiO<sub>2</sub>系共晶組成と考えられ、共晶温度1180°C程度で溶けるからである。しかし、ニュージーランド産海砂鉄は十分に磁選してあり、珪砂が少なくチタンが約7%あるので、共晶温度が上昇する。実際、このままでは溶融したノロが生成しなかった。そこで珪砂を最初に砂鉄とともに1 kgずつ2 kg挿入するか、あるいは全体に混合して送風量を少し多めにし、温度を高め調整した。この場合、最初に珪砂を2 kg挿入するとノロの生成量は少なく、ノロ出し操作を行っても出ない場合があった。しかしその分ケラの収率は良くなった。珪砂を全体に混合するとノロの生成量は多くなるが、ケラの収率は低下した。

犬吠埼の砂鉄は珪砂成分が多く、大量のノロが流れ出た。そしてそのノロの中に直径1~5 mmの球状の粒鉄が多く分散していた。Table 2には保谷市東第一小学校で行った実験操業の際採取された粒鉄の組成を示した。

### 3・4 生成したケラ

砂鉄20 kgから得られたケラの重量は島根県斐伊川産山

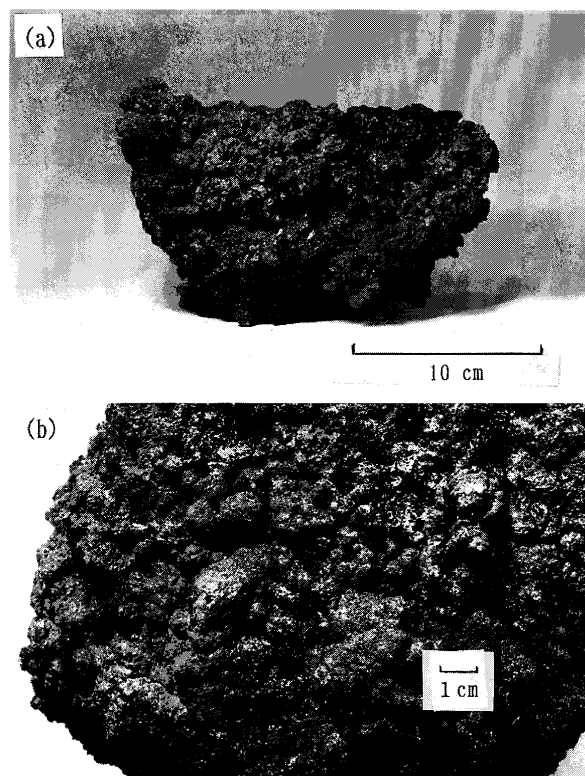


Fig. 4. (a) A steel bloom, "Kera", produced from the iron sand of Hii river. (b) Many small particles of steel cohered on the upper surface of "Kera".

砂鉄から約5 kg、日野川産川砂鉄から約4.5 kg、ニュージーランド産海砂鉄から約8 kgおよび犬吠埼の砂鉄からは約2 kgであった。ケラは羽口の下、炉底中央部に生成し、ノロで覆われていた。ケラの側面や下部は木炭を噛み込んでいる部分もあった。Fig. 4(a)に示すようにケラはお椀型である。また、Fig. 4(b)に示すように上面には多くの粒鉄が溶着していた。ノロの出が悪い場合でもケラは生成していた。その場合、ケラの下部に多くのノロが存在していた。一般にケラの中は非常に緻密であり、所々に一酸化炭素ガスが発生したと思われる1~5 mm程度の空洞がある。ただし、ノロが炉内に多く溜まり、ケラがノロの中に浮かぶような状態になる場合は、ケラのまとまりが悪くなった。

ケラの組成は一般に、羽口の近くやノロで覆われている部分は炭素濃度が低く、木炭を噛み込んでいる部分は炭素濃度が高かった。しかし、内部はほぼ均質であった。Table 3には内部のケラの組成を示した。ケラの組織はセメントタイトとパーライトが混在している。表にはパーライトとセメントタイトがそれぞれ多い部分を区別して分析した。表中の田無小学校で実施した実験操業では炭素濃度が小さくなっている。この場合、ノロ出しが十分でなく、ノロの中にケラの小塊が分散して生成し、まとまりが悪かった。出来たケラの炭素濃度も低く、ノロとの反応で脱炭が進行したと考えられる。表には比較として日本美術刀剣保存協

Table 3. Chemical composition of the blooms of Kera.

Place	Composition (mass%)					Place of analysis	Iron sand
	C	Si	P	S	Ti		
T. I. Tech	1.13 1.54	0.0102 0.0118	0.043 0.057	0.0006 0.0009		base cementite	Hino River
Tana El. School	0.20 0.99	0.0022 0.0118	0.038 0.098	0.0031 0.0071		base martensite	Iioka coast
Higashi I.E l. school	1.28 6.08	0.0165 0.0215	0.032 0.019	0.0049 0.0026		base cementite	Iioka coast
Yokota Shimane*	1.04 5.86	0.0308 0.0035	0.037 0.008	0.0008 0.0038		base cementite	Hii River
Hachioji	1.65	0.0005	0.037	0.0138	0.001		Hii Ri.
Yokota*	2.09	0.0000	0.025	0.0110	0.003	Tama-Hagane	Hii Ri.
Yasukuni*	2.15	0.0041	0.022	0.0075	0.003	Tama-Hagane	Hii Ri.

\*:Analysis of Tama-hagane (Steel of best quality) produced in big Tataru furnaces.

会（日刀保）実施のたたらケラと、昭和16年頃行われていた靖国たたらケラの平均組成を示した。

### 4. 考察

#### 4.1 ノロの役割

砂鉄からケラを作るためには溶融したノロの生成が必要かつ不可欠である。横羽口だけで初めから操業すると炉底温度が十分上がらないので溶融したノロができない。この場合、生成した粒鉄は吹き込まれた空気中で酸化されてしまう。溶融したノロ中の酸素の透過速度は非常に小さいので、ノロは生成したケラを包んで酸化を防止していることが予想される。したがって最初に炉底の温度を十分高くし、溶融したノロを生成させておくことが重要である。特に小型のたたら炉は熱の散逸が大きく炉底温度が低下し易いので注意しなければならない。また、湿気があると温度が上がらないことが多いので、炉は事前に乾燥しておく方がよい。湿気を防ぐ目的で本実験では地面にトタン板とブロックを敷き、その上に炉を作っている。炉内を粘土で内張りせず、レンガのままにしてあるのは乾燥の手間を省くためでもある。本実験で明らかのように粘土を張らなくても砂鉄だけでノロを生成することができる。また、ノロの生成量が多くない時やノロの粘性が高い場合は、ノロ出しを行っても流出しないことがあるが、ケラの生成には影響しない。砂鉄に酸化チタンやイルメナイト(FeO·TiO<sub>2</sub>)を多く含む場合、ノロの出が悪くなるので、送風量を多くし木炭の燃焼速度を上げて炉内温度を上昇させる。しかし、この場合ケラに含まれる炭素濃度は低くなる傾向がある。

#### 4.2 ケラの生成機構

炉上部のシャフト部で砂鉄は余熱され木炭と共に降下する。Fig. 5に示す酸素分圧と温度で表した鉄-酸素系状態図で明らかのように、羽口上部25cmの部分の温度と酸素分圧は鉄を還元する状態にない。一方、羽口前ではちょうどウスタイトとの平衡近傍のγ鉄の領域にある。したがって、羽口上部10数cmの所から羽口にかけて還元領域があ

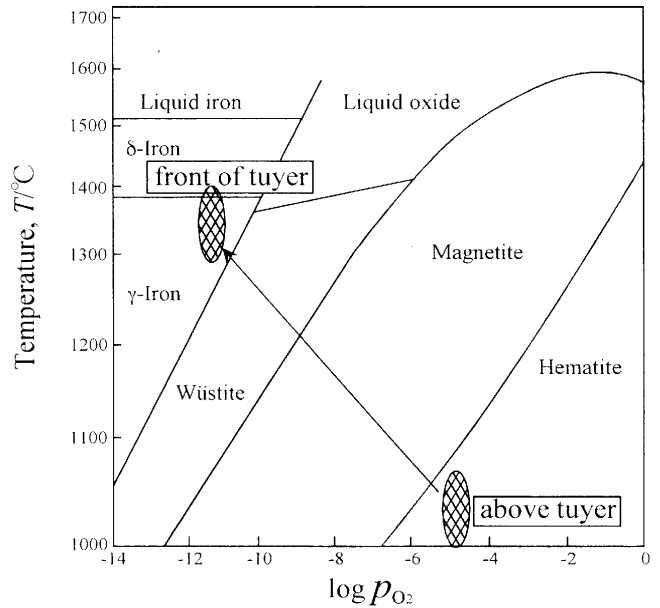


Fig. 5. Condition of temperature and oxygen partial pressure for the reduction of iron sand in Tataru furnace.

Table 4. Chemical composition of slag (mass%).

iron sand	T. Fe	M. Fe	FeO	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	S
Hino river	67.4	1.12	75.8	2.4	5.1	1.63	0.50	0.92	0.03

ると考えられる。Table 2に示すノロの中に分散している粒鉄の炭素濃度は、0.77~2.38%とばらついている。このことは羽口前で粒鉄が炭素を吸収する時間にばらつきがあることを示している。しかしケラの平均組成はオーステナイトと液相の固液共存領域にある。一部液体を生成した鉄は表面張力で球状になり転がり落ちて、溶融状態のノロの上に落ちる。そして、ノロの中を沈降し互いに付着しながら炉底で成長しケラとなる。このとき、表面張力のために鉄と濡れ性の悪いノロは排除されるので緻密なケラができる。このようにノロは生成した粒鉄の再酸化を防止すると共にケラの成長を助ける。

#### 4.3 ケラ中の低い不純物濃度

Table 4に示すノロの組成はFeO飽和の酸化鉄-シリカ融体に近く、76%程度のFeOを含んでいる。この組成の平衡酸素分圧は1×10<sup>-11</sup> atmであり、鋼中の炭素は酸化される傾向にある。したがってノロの生成量が多く、十分ノロ出しが行われない場合には、粒鉄のノロ中の滞留時間が長くなりケラの炭素濃度が低くなる。一方、炉内温度を上げると、オーステナイトと液相との固液共存領域が低炭素濃度側へ縮小し、かつ羽口前の吸炭領域での還元鉄粒の滞留時間が短くなるため、結果としてケラの炭素濃度も低くなる。このように、ケラの炭素濃度を高くするためにはなるべく低い温度で操業し、かつノロの粘性を下げてノロを常に排出する事が重要である。しかし、溶融したノロを作るため

にはあまり温度を低くすることはできない。昭和44年に行われた日本鉄鋼協会の「たたら」再現実験<sup>4)</sup>のノロはファイヤライト近傍の組成でシリカ飽和に近いが平衡する酸素分圧は $1 \times 10^{-12}$  atmである。

このようにノロ中の酸素分圧が高い事は、ノロ中のシリカが還元され難いことを示している。また、羽口の窓からの観察では、羽口上部で生成したノロと還元され降下しながら木炭上で吸炭する砂鉄はそれぞれ別々に流れ落ちており、この状態ではノロは吸炭した砂鉄と接触する機会は少ない。したがって、ケラ中のシリコン濃度は非常に低くなる。リンは木炭の表皮下に多く含まれており、また硫黄も木炭に存在する。これらはケラに吸収されるが、現代製鋼法による銑鉄の場合の10分の1程度である。リン濃度が低い事は木炭上で鉄が炭素を吸収する温度が低いことによる。また、硫黄濃度が低い事はコークスと比較して木炭中の硫黄含有量が低いことによる。

#### 4.4 ズク生産との関係

高橋一郎<sup>5)</sup>によると江戸時代以来の永代タタラではズク(銑鉄)を生産していた。その炭素濃度は共晶点以下の3%程度である。また、シリコン濃度が非常に低いことが特徴である。また、幕末に反射炉で銑鉄を溶解し大砲を鑄造した際、たたら銑では大砲が破裂してしまうので、輸入による高炉銑を使ったという。これはたたら銑にはシリコンがほとんど入っていないので白銑になるためである。本研究結果から考えるとたたら炉を比較的低い温度で操業し、酸素分圧の比較的高いノロを用いて、オーステナイトと液相の固液共存領域で半熔融状態のズクを作れば、シリカの還元は起こり難いので、高炭素で低シリコン濃度のズクになる。さらに炉底温度を共晶温度以上に保てば木炭床からさらに炭素を吸炭してズクを生成することができる。たたら製鉄では比較的低い温度での操業を可能にするため、ズク生産の場合には還元性の良いと言われている「赤目」砂鉄を用い、一方、ケラを生産する場合には「真砂」砂鉄を使うと言われている。しかし、実際には「真砂」を用いてズクが造られていた<sup>6)</sup>。

#### 4.5 木炭高炉とたたら炉の比較

H. Tylecote 著の“History of Metallurgy”<sup>7)</sup>によれば、中世の西洋で低炭素濃度の可鍛鉄(ルッペと呼ばれる8kg程度の固体鉄塊)を製造していたシャフト炉の高さは約1.2mでどれもだいたい同じである。この高さはたたら炉にも共通する。一方、木炭高炉は約3m以上で銑鉄を製造している。この高さの違いは次のように考えられる。中世の西洋では塊鉄鉱石を使用していたので、低いシャフト炉では還元した鉄が十分炭素を吸収する時間はなかったと考えられる。

そこで木炭高炉では送風能力の増強により炉内温度が上昇し炉高が高くなることによって、燃焼し加熱している木炭と還元された鉄が接触する時間が長くなり、その結果吸炭時間が増大し、かつ炉内の酸素分圧が低くなって炭素飽和に近い銑鉄になる。一方、たたら吹きでは細かい砂鉄を用いたため、還元と炭素の吸収は短時間で進行する。したがって、炉高を上げる必要がなく、炉を横に広げることで生産性を上げた。そのため、送風圧は必要とせず人力による「天秤ふいご」で十分であった。この事は結果として温度の上昇を押さえ、羽口前での吸炭領域を狭くし、吸炭時間を短くして鋼中の炭素濃度を低くした。また酸素ポテンシャルの高いノロを生成してシリコンやりんなど不純物の還元を抑制し、ケラやズクへの吸収を防止していた。この製鉄原理は、現代の直接製鉄法や間接製鉄法と明らかに異なっている。

## 5. 結言

本研究に用いた“たたら炉”は小型で内部に土を塗ってなく、送風方法も連続送風で古来から行われてきた“たたら炉”とはいくつかの点で異なっている。しかし生成したケラの成分および状態はよく似ており、木炭を用いて砂鉄を還元していること、および炉の高さが1.2m程度であることが重要であることが分かる。この構造の結果、羽口上部で還元が起こり、羽口前では1350°C程度の低い温度で吸炭が起こる。一部液体となった粒鉄が酸素ポテンシャルの高い熔融スラグ(ノロ)上に落下し、その中で粒子同士が互いに合体し、成長してケラになる。この製錬反応機構は古来からのたたら炉でも同じであろう。

本研究を遂行するに当たり、操業に中心となって協力いただいた御手洗容子氏(旧姓山邊, 現科学技術庁金属材料研究所)、山本隆一氏(保谷市東第一小学校)、朝吹美恵子氏、分析にご協力いただいた坂田邦一氏(工学院大学専門学校)、(株)新日本製鐵、レンガを供給していただいた(株)川崎製鉄と(株)日本鋼管に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 沢田 滋: バウンダリー, 3 (1987), 9, 40.
- 2) 俵 国一: 古来の砂鉄精錬法, 丸善, (1993).
- 3) 清水欣吾: まてりあ, 33 (1994), 1453.
- 4) たたら製鉄復元委員会委員会報告, たたら製鉄の復元とそのけらについて, 日本鉄鋼協会, (1971).
- 5) 高橋一郎: ふえらむ, 1, (1990), 854.
- 6) 永田和宏: Inorganic Materials, 4 (1997), Nov., 575.
- 7) R.F. Tylecote: A History of Metallurgy, 2nd ed., The Inst. Mater., (1992).