

還元途上における酸化鉄の凝集に及ぼす 酸素ポテンシャルの影響

山下 智司*・藤原 大介*²・雀部 実*

Effect of Oxygen Potential on Cohesion of Pulverized Iron Oxide
under a Reducing Atmosphere

Satoshi YAMASHITA, Daisuke FUJIWARA and Minoru SASABE

Synopsis : The effect of the oxygen potential on cohesion was examined by using the pulverized ore of iron sand, hematite ore, and magnetite ore. The sample was kept under atmosphere by which the oxygen potential and the temperature were kept constant during the fixed time, and the state of cohesion was examined. The temperature was an interval of 50°C of 1173~1423K, and the holding time was done in 15 min until 60 min.

It has been understood to cohere easily in the oxygen potential in the stability area of the wustite in each pulverized ore. Order of the tendency of cohesion was as follows, iron sand > hematite ore > magnetite ore. SiO_2 and TiO_2 of the mineral composition in iron sand are greatly related to cohesion. The surface of the ore particle melted, and the fusion of the ore particle each other was confirmed.

Key words : Tata steelmaking, reducing atmosphere, cohesion, iron sand, iron ore

1. 緒言

近年、たたら製鉄の製鉄方法に関心が持たれている。たたら製鉄における技術の水準や発展の推移については多くの研究者により研究されており、例えば、たたら製鉄遺跡付近で出土される鉄滓の化学組成と鉱物組成は、製錬の諸過程に密接に関係しているため、この鉄滓の鉱物相を観察して組織上の特徴に基づいて分類し、たたら製鉄製錬技術の発展過程を推理している¹⁾。また遺されている鉄滓によりたたら製鉄炉内反応の解析を試み、鉄滓によるたたら製鉄技法の解析法の考察がなされている²⁾。しかし、たたら製鉄炉内での砂鉄の還元機構、鋳(けら)や銑(ずく)の生成機構については、諸説があり、まだ、そのメカニズムの確定的な結果は得られていない。

清永³⁾は金属学的観点からみたたたら製鉄を概説している。その中で鋳成長は砂鉄が鋳上で半還元され、半熔融状態となって焼結し、それがさらに還元されて鋳を成長させるとしている。そしてその際1670K以上の高温の保持と、80%以上のCOガスによる還元が効率的に行われることが望ましいともしている。また TiO_2 の影響については砂鉄の融点を下げ、流動性を増し、還元性はやや低下するとしている。永田^{4,5)}は小型実験たたら炉を用いて鋳の生成および成長機構を調べ、1623K程度の低い温度で吸炭が起これ、鋳の組成はオーステナイトと液相の固液共存領域にあり、一部液体となった粒鉄が酸素ポテンシャルの

高い熔融スラグ上に落ちる。その中を沈降して互いに合体しながら炉底で鋳となり、温度低下に伴って固相を晶出し鋳塊が成長すると報告している。

本研究は、たたら製鉄法の生成物である鋳の生成機構を解明する基礎データを得るために、まず、たたら製鉄炉内で鋳が生成するメカニズムは、次のどれの可能性が大きいかを探ることを目的とした。

- ① 炉内を降下した粉鉱石は表面だけが熔融してスポンジ状に融着する。これが還元されて鋳になる。
- ② 粉鉱石が還元前に集まって熔融酸化物集合体を作る。この熔融酸化物集合体が固体炭素と反応して固体鉄を作る。熔融還元反応時に生じた還元ガスがスポンジ状の還元鉄を作る原因となる。
- ③ 粉鉱石が固体のまま還元されて鉄粉を生成し、この鉄粉が集まってスポンジ状の鉄塊を作る。

以上の仮説①~③のいずれかが妥当であるのかを検討するために、砂鉄試料を使用して酸素ポテンシャルを一定に制御し、還元時間を変化させながら砂鉄試料の凝集の程度を調べ、還元途上における酸素ポテンシャルが粉鉱石の凝集にどのように影響を及ぼすかについて検討した。

2. 実験方法

試料をアルミナ製タンマン管に挿入し、これを酸素分圧と温度を一定に保った雰囲気下に所定時間保ち、その凝集

平成16年6月28日受付 平成16年9月21日受理 (Received on June 28, 2004, Accepted on Sep 21, 2004)

* 千葉工業大学 (Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma Narashino 275-8588)

* 2 千葉工業大学大学院生 (Graduate Student of Chiba Institute of Technology)

状態を調べた。

試料の主成分の含有量を Table 1 に示す。砂鉄は2種類を用い、いずれも TiO₂ を約 8mass% 含んでいる。これらの SiO₂ 濃度は異なるが T Fe/TiO₂ の値はほぼ等しい。砂鉄-1 はニュージーランド・タハロア産である。比較のためにマグネタイト系およびヘマタイト系粉鉱石も用いた。SiO₂ 濃度はヘマタイト鉱石の方がマグネタイト鉱石より若干大きい。これらの3種類の試料は篩目 150~180 μm の間に入るように篩別し、実験に供した。

実験装置の概略を Fig 1 に示す。装置は雰囲気制御系と凝集実験炉の二つから構成されている。試料約 3g をアルミナ製タンマン管に入れ、ムライト製ガス吹込みランスの先端が試料の直上にくるようにタンマン管とガス吹込みランスを組み合わせ、試料が噴出しないように線速度 0.4 cm/s の N₂ ガスを試料層に直接吹き付けながら、N₂ 雰囲気下で所定温度に保持された反応管内の所定の位置にゆっくりと挿入した。試料が所定温度に到達保持後、2台のマスフロー・コントローラーで別々に流量をコントロールされ、系外に流されていた所定比の CO-CO₂ 混合ガスを三方コックにより吹込みランス側に切り替え凝集実験を開始した。所定時間保持後、電気炉の電源を切って三方コックを切り替え N₂ ガスを吹込みランスから直接試料層に吹き付けるとほぼ同時に反応管内上部から流量 300 mL/min の N₂ ガスを導入した。室温まで冷却したタンマン管を篩目 180 μm の篩の上で逆さにして試料全量を取り出して篩い分け、篩上試料と篩下試料のそれぞれの質量を測定した。本研究では篩目 180 μm の篩上に残った試料を凝集物とみなし、実験後 180 μm の篩上に残った重量を全重量（篩上試料+篩下試料）で割ったものを凝集率として評価した。

凝集率を求めた試料全部を JIS M8212 および M8213 に準じて全鉄及び2価鉄の分析に供し、試料の還元率を求めた。

雰囲気酸素ポテンシャルは全圧 1013 hPa の CO と CO₂ の混合ガスで決め、酸素ポテンシャルはマグネタイト、ウスタイトの安定領域を取り上げた。保持時間は 15, 30, 60 min とし、途中の試料をサンプリングするという方法は取らなかった。

3. 実験結果および考察

3.1 砂鉄試料

砂鉄試料の凝集結果の一例として、Fig. 2 に保持時間 60 min における実験結果を Fe-C-O 系還元平衡図上に示す。

砂鉄試料-1 は 1173~1323K では、ほとんど凝集しない。これは保持時間を 120, 240 min と延長しても同じであった。1373K において凝集し、 $P_{CO}/(P_{CO}+P_{CO_2})=0.06$ で凝集率は 40%、 $P_{CO}/(P_{CO}+P_{CO_2})=0.16$ で 55%、 $P_{CO}/(P_{CO}+P_{CO_2})=0.37$ で 70% と $P_{CO}/(P_{CO}+P_{CO_2})$ が大きくなると共に凝

Table 1. Chemical composition of the sample (mass%)

Sample	T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂
Iron Sand-1	58.1	28.6	51.3	7.8	3.7
Iron Sand-2	56.4	28.4	49.0	7.2	10.3
Hematite ore	58.0	1.1	81.6	0.11	8.1
Magnetite ore	64.0	7.6	83.0	0.02	3.1

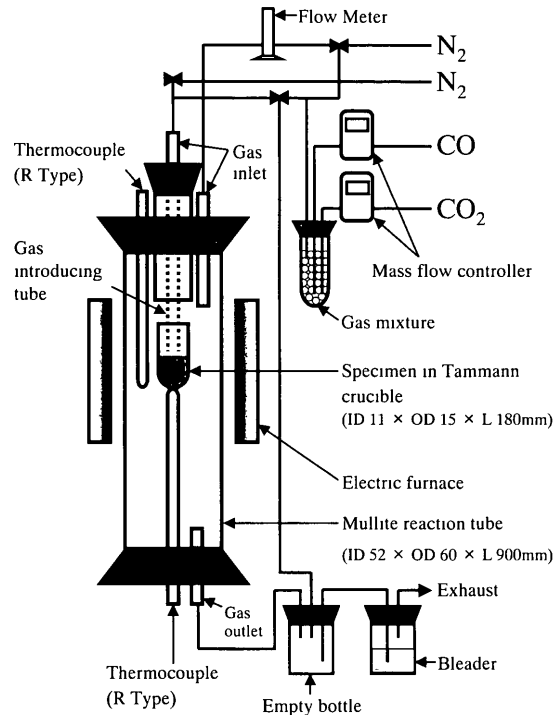


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental apparatus.

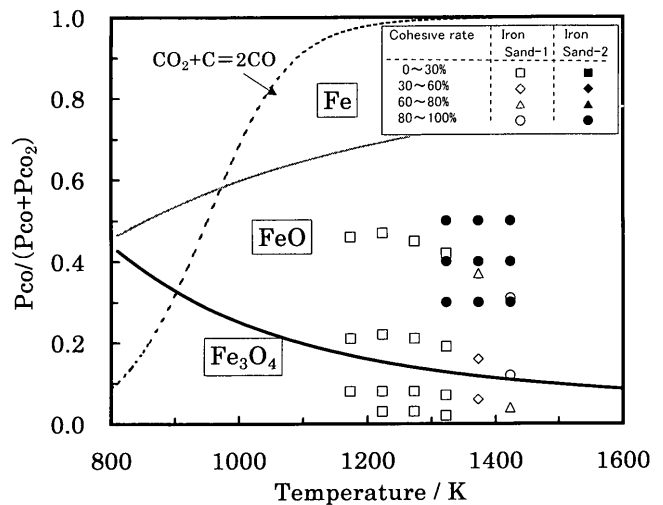


Fig. 2 Effect of atmosphere on cohesive rate of iron sand after reduction time, 60 min

集率は大きくなって行く。さらに 1423K では $P_{CO}/(P_{CO}+P_{CO_2})=0.12$ 以上で、砂鉄はほとんど凝集した。これらの結果より $Fe_3O_4+CO \rightarrow 3FeO+CO_2$ の平衡反応を境に酸素ポテ

ンシャルの低い側で砂鉄の凝集率は大きくなり、雰囲気がFeOの安定領域となると凝集し易いことがわかった。

一方、砂鉄-2は、砂鉄-1ではほとんど凝集しなかった1323Kにおいても、そのほとんどが凝集した。SiO₂を多く含む砂鉄-2の方が凝集し易く、凝集開始温度が低下することがわかった。

3.2 ヘマタイト系およびマグネタイト系粉鉱石試料

ヘマタイト系およびマグネタイト系粉鉱石試料における保持時間60分における実験結果をFe-C-O系還元平衡図上でFig. 3に示す。ヘマタイト系およびマグネタイト系粉鉱石試料においても砂鉄試料同様にFe₃O₄+CO→3FeO+CO₂の平衡反応を境に凝集は増加し、還元雰囲気FeOの安定領域になると凝集し易いことがわかった。

ヘマタイト系粉鉱石は前節の砂鉄試料の結果に比べ1273Kにおいても凝集率は10~20%と小さいが、凝集する。また温度の上昇に伴い凝集率は増加し、1423Kにおいて凝集率は80~90%と大きい。還元雰囲気がFeOの安定領域において凝集率を見ると、ヘマタイト系粉鉱石試料は凝集し易く、凝集率としては小さいが、低い還元温度でも凝集はする。ここでは、ヘマタイト系粉鉱石試料中にSiO₂が約9%含まれ、TiO₂が含まれていないことに注目しておく。

マグネタイト系粉鉱石はより低温で、ヘマタイト系粉鉱石や砂鉄試料に比べ凝集率は大きく、低温においても凝集しやすいといえるが、温度が上昇しても、その温度上昇に伴う凝集率の増加の割合が小さい。またP_{CO}/(P_{CO}+P_{CO₂})を大きくしても、それほど凝集率は大きくなり、全ての実験において凝集率は80%以上にはならなかった。

これまで各試料について個別に各還元雰囲気、温度における凝集率の変化について述べてきたが、これら3つの試料を併せて次に比較検討を行った。

3.3 実験に供した試料の総合的評価

3.3.1 凝集率および還元率に及ぼす保持時間の影響

各還元雰囲気において、いずれの試料も温度上昇に伴い凝集速度は大きくなり、その傾向は同じであった。そこで1373Kの結果を代表させ砂鉄、ヘマタイト系、マグネタイト系粉鉱石をFeOの安定領域のP_{CO}/(P_{CO}+P_{CO₂})=0.37で行った保持時間の違いによる凝集率および還元率の変化をFig. 4に示す。図中実線は凝集率、破線は還元率の変化を示す。●印で示す砂鉄-1では、凝集率は30分までは時間経過と共に大きく増加し62%となるが、それ以上に保持時間を延長してもほとんど増加せず、60分において約70%であった。一方、初期の還元速度は凝集速度より大きく15分で45%となるが、それ以上保持時間を延長しても還元率はそれほど増加せず、60分において約60%であった。それに対してSiO₂の多い○印で示す砂鉄-2は15分ではほとんど凝集する。しかし、還元率は15分で10%、60分においても20%と小さい。両者を比べると、SiO₂の少ない砂鉄-1では凝集率は小さいが、還元率は大きく、それに

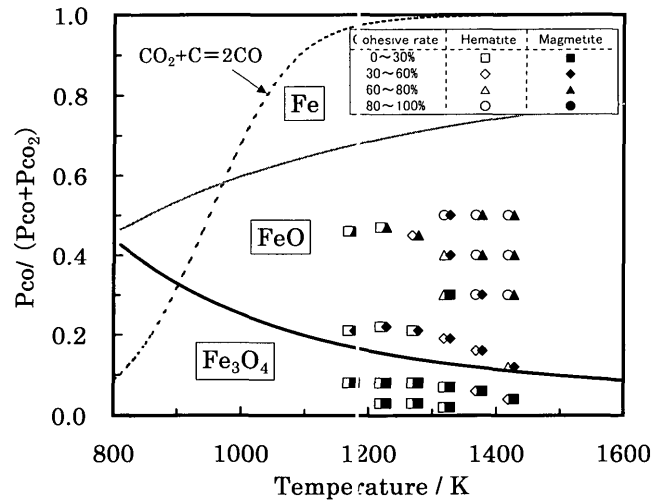


Fig. 3 Effect of atmosphere on cohesive rate of hematite ore and magnetite ore after reduction time, 60 min

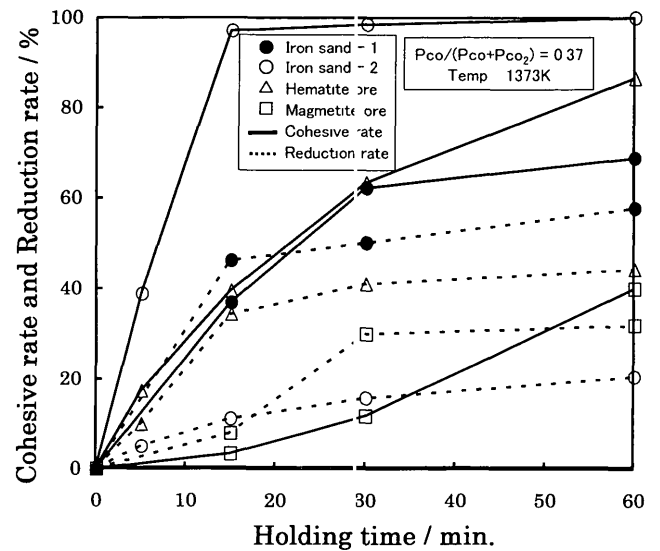


Fig. 4 Effect of holding time on reduction rate and cohesive rate at 1373K

対してSiO₂の多い砂鉄-2はその逆の傾向を示すことがわかった。この結果から還元が進行しても凝集率が大きくなるとは限らないこと、また含有するSiO₂量が凝集速度に大きく影響を及ぼすこともわかった。

△印で示すヘマタイト系粉鉱石の凝集率は時間の経過に伴い大きくなり、砂鉄-1とほぼ同じ凝集速度を示し、30分で65%となる。しかし、それ以降の時間経過と共に砂鉄-1の凝集曲線は停滞するのに対して、ヘマタイト系粉鉱石は増加して60分で85%となった。一方、還元率は15分までは急激に大きくなり15分で約40%、それ以上保持時間を延長しても還元率はあまり増加せず、60分で58%である。

□印で示すマグネタイト系粉鉱石は、30分までの凝集速度は小さく、30分において0%であるが、30分以降の凝集速度はヘマタイト系粉鉱石とほぼ同じ速度で大きくな

り、60分において40%となった。初期の還元速度は砂鉄-1と同様に凝集速度より大きいと30分以降は停滞し、60分でも還元率は30%にすぎない。

以上より還元雰囲気FeOの安定領域にある1373Kの結果をまとめると、 SiO_2 濃度の高い砂鉄-2は還元時間15分以内でほとんど凝集するが、その還元率は20%程度にすぎない。一方砂鉄-1は砂鉄-2より還元速度は大きいと、凝集速度は小さく30分以降は停滞する。それに対してヘマタイト系は、還元率が一定となっても凝集は停滞すること無く、増加する。マグネタイト系粉鉱石は、還元初期の凝集速度は小さいが、30分以上になるとヘマタイト系粉鉱石と同様の凝集速度となる。しかし還元率は30%と小さい。

ヘマタイト系とマグネタイト系粉鉱石を比べると、ヘマタイト系粉鉱石は凝集速度が大きく、還元速度が大きい。これはヘマタイトがマグネタイトよりも還元速度が大きいとする従来の見解と一致する⁹⁾。その他に、後記する鉱粒のモルフォロジーも凝集速度に大きく関係している。

以上から凝集の生じる条件を整理すると、ウスタイトが安定で存在できる酸素ポテンシャル条件におかれたときに

凝集は生じやすい。凝集のし易さの順序は砂鉄-2>ヘマタイト、砂鉄-1>マグネタイトであった。特に砂鉄試料は、試料中の SiO_2 濃度の高い方が凝集しやすいが、しかし還元はしにくいことがわかった。

3.3 2 還元前後の試料のX線解析結果

次に、X線回折を行った結果について述べる。 SiO_2 の多い砂鉄試料-2の実験前におけるX線回折結果をFig. 5に示す。 TiO_2 を約8%含むにもかかわらず、 Fe_2TiO_4 [Ulvospinel]、 FeTiO_3 [Ilmenite]、 FeTi_2O_5 [Pseudobrookite]などFeとTiの複合酸化物はなく、また TiO_2 も同定されなかった。これらは、非晶質であるか或いは固溶されているものと思われる。同定されたのは Fe_3O_4 と SiO_2 である。1323K、 $P_{\text{CO}}/(P_{\text{CO}}+P_{\text{CO}_2})=0.5$ 、保持時間60min後の凝集試料のX線回折結果をFig. 6に示す。 Fe_3O_4 、 FeO 、 Fe_2SiO_4 、 SiO_2 が同定された。ここではFeとSiの複合酸化物である Fe_2SiO_4 が同定されたことに注目しておく。

ヘマタイト系粉鉱石、マグネタイト系粉鉱石について得られた還元前後のX線解析結果を砂鉄試料の結果と一緒にTable 2に示す。還元条件は砂鉄試料と同じである。

ヘマタイト系粉鉱石の実験前のX線解析結果では Fe_2O_3 、

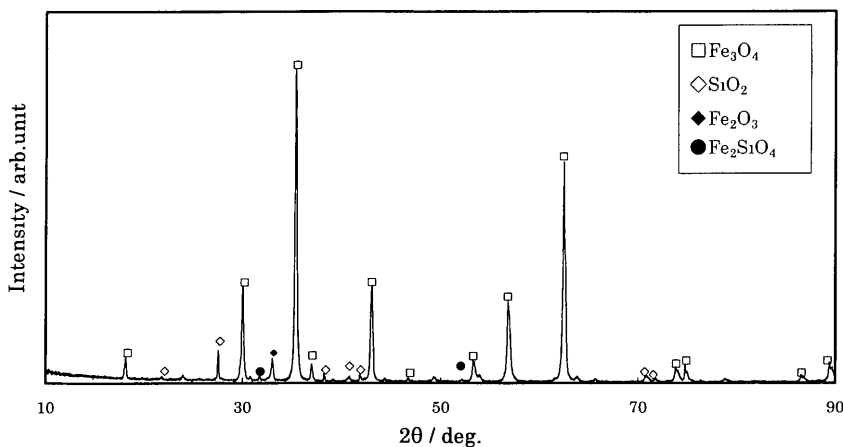


Fig. 5. X-ray diffraction pattern of iron sand-2 before reduction

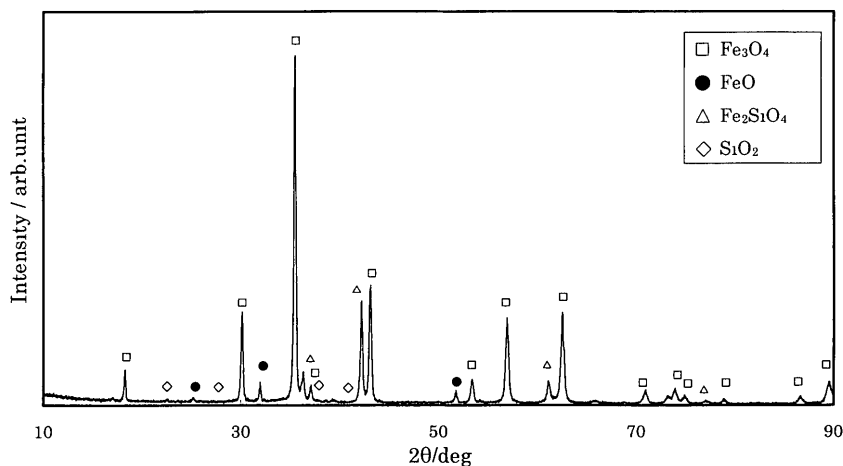


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of iron sand-2 after reduction

SiO₂が同定された。還元後の凝集試料はFe₃O₄とFe₂SiO₄が同定された。マグネタイト系粉鉱石試料の実験前のX線解析ではFe₂O₃, Fe₃O₄, SiO₂が同定され、一部同定できない回折ピークも見られた。本試料は酸化鉄としてFe₃O₄単独ではなくFe₂O₃が含まれているものであった。還元後の凝集試料はFe₃O₄, Fe₂SiO₄, SiO₂, FeOが同定された。

構成鉱物組成とX線解析の結果を整理すると、試料間の構成鉱物の違いは、Table 1より砂鉄とヘマタイト、マグネタイト系粉鉱石ではTiO₂ (約8%)があるかないかであり、また砂鉄-1と砂鉄-2を比べると砂鉄-2はSiO₂が多い。またヘマタイト系粉鉱石とマグネタイト系粉鉱石を比べると、SiO₂含有率はヘマタイト系粉鉱石の方が多い。

還元後の試料の構成鉱物相は、砂鉄ではFe₃O₄, Fe₂SiO₄が、ヘマタイト系はFe₃O₄とFe₂SiO₄が、マグネタイト系はFe₃O₄, Fe₂SiO₄, SiO₂, FeOが同定された。いずれもFe₂SiO₄が同定されている。

3.3.3 還元前後の試料のモルフォロジー

次に、凝集実験前の粉鉱石のSEM像をFig 7に示す。砂鉄-1, 砂鉄-2共にほとんど同じ形態であったので、Fig. 7には砂鉄-2のSEM像を代表させ砂鉄として示した。砂鉄やマグネタイトの鉱粒の表面はかなり平滑であるのに対し、ヘマタイト系粉鉱石は鉱粒表面に細かい鉱粒が多数付着した状態で存在している。

凝集実験の結果では、砂鉄はマグネタイト鉱石と同じ平滑面を有するにもかかわらず、凝集速度が大きい、これについてはTiO₂の存在の有無と、含有するSiO₂とその濃度の違いを考える必要がある。

SiO₂の少ない砂鉄-1の還元速度の方が砂鉄-2に比べ大き

い。これについては、McAdams¹⁾がTiO₂ 0.8~8.2%の4種類の砂鉄を1373KにおけるCO-CC₂ガスによる還元性を検討した結果、マグネタイトからウスタイトへの還元に対しては、TiO₂あるいはTiO₂+SiO₂の量の少ないほど還元性は良好であるが、ウスタイトから鉄への還元に対しては、これらの量はほとんど影響を与えないと報告しており、本研究結果はこれと同様の結果を示していると考えられる。

一方、ヘマタイト粉鉱石は凝集速度と還元速度がマグネタイト粉鉱石に比べ大きくなった。これについては一般的にヘマタイトがマグネタイトよりも還元速度が大きいことは知られているが、還元に際して、先のヘマタイト粉鉱石のSEM像に見られた鉱粒表面に付着している細かい粒子が先ず還元されるために、ヘマタイト粉鉱石は凝集速度と還元速度がマグネタイト粉鉱石に比べ大きくなったことも加わるものと考えられる。その他、特に凝集に対しては、先の砂鉄-1, 2の違いから、SiO₂濃度の影響が大きかったことを考えると、ここでも鉱物組成SiO₂濃度も関係しているものと思われる。

1423KにおいてP_{CO}/(P_{CO}+P_{CO2})=0.37の雰囲気中で60分保持後の砂鉄-2のSEM像をFig. 8に、ヘマタイト系粉鉱石のSEM像をFig. 9に示す。このときの凝集率はいずれの試料もほぼ100%であった。砂鉄、ヘマタイト系粉鉱石共に鉱粒表面が明らかに溶融しており、さらに鉱粒同士の接触部が融着していることがはっきりとわかる。

Table 1において砂鉄-1と2ではSiO₂濃度に差がある。またヘマタイト系粉鉱石ではSiO₂を約8%含んでいる。実験後のX線解析結果ではいずれもFe₂SiO₄が同定されている。還元に伴い鉄酸化物が還元されFeOとなり、これがSiO₂と反応してファイアライトを形成し、それが凝集速度の増大や凝集開始温度を低下させる要因となるのではないかとと思われる。

実験結果において、特にSiO₂の多い砂鉄-2の凝集は15分で終了して、その還元率は20%と低い。これは砂鉄試料は早い段階で還元されて生成されたFeO, Fe₂SiO₄や、TiO₂が関与して融点が低くなり、試料表面が溶けて鉱粒同士が凝集、融着して、気相還元が進行しなくなるものと考えられる。

Table 2. Results of X-ray analysis of the sample before and after reduction.

Sample	Before reduction	After reduction
Iron sand-2	Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ SiO ₄	Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe ₂ SiO ₄
Hematite ore	Fe ₂ O ₃ , SiO ₂	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ SiO ₄
Magnetite ore	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ SiO ₄ , SiO ₂ , FeO

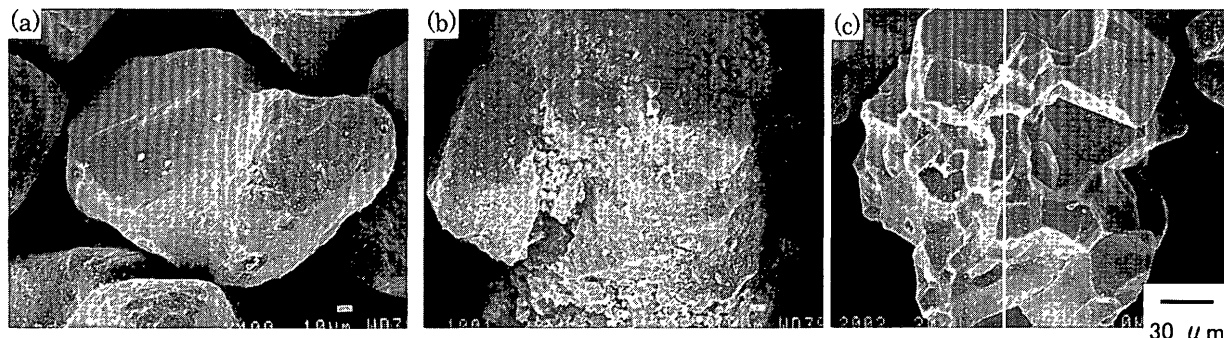


Fig. 7 SEM images of sample before reduction: (a) Iron sand, (b) hematite ore, (c) magnetite ore.

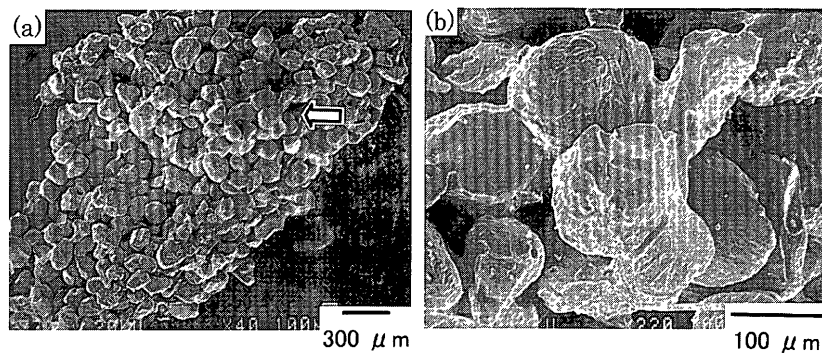


Fig. 8. (a) SEM image of iron sand after reduction (b) Magnified micrograph of Fig 8 (a) in allow area

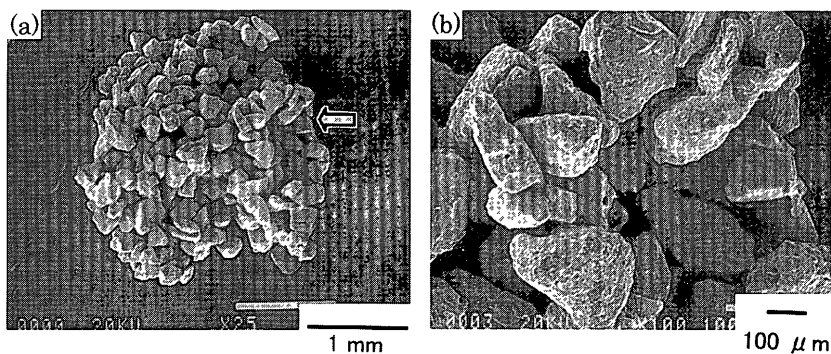


Fig. 9 (a) SEM image of hematite ore after reduction. (b) Magnified micrograph of Fig 9 (a) in allow area.

3.3.4 平衡状態図からの情報

平衡状態図から得られる情報を整理し、Table 3に示す。還元の際に伴い試料表面にウスタイトが生成される。その場合の融点を考えるとFeO-Fe₂O₃系の共晶点はFe₂O₃=9mass%で1644Kであり⁸⁾、本実験温度より高い。次にウスタイトとSiO₂が共存するとどのようになるかを考えると、FeO-SiO₂系状態図においてSiO₂=5mass%付近の液相線温度は=1623Kであり⁸⁾、先より若干低下する程度である。しかし還元後にはFe₂SiO₄が確認されている。Fe₂SiO₄の融点は1481Kであり、同じ状態図よりFeO-Fe₂SiO₄の共晶温度は1448Kとかなり低くなる⁸⁾。一方、砂鉄にはTiO₂が含まれるのでTiO₂の存在を考慮すると、FeO-TiO₂系状態図よりこの系の共晶点はTiO₂=10mass%で共晶温度は1585Kであるが⁸⁾、まだ本実験温度より高い。本研究結果ではSiO₂濃度の高い砂鉄が凝集速度は大きく、また還元後はFe₂SiO₄の存在が確認されている。そこでFe₂SiO₄とTiO₂の関係を考慮すると、著者らが投稿中のFe₂SiO₄-TiO₂擬二元系状態図ではFe₂SiO₄-TiO₂系の共晶点はTiO₂=9.5%で1407Kとかなり低くなることを見出している⁹⁾。これは本実験範囲の上限に近い値であり、先の還元後のSEM像からも明らかに鉍粒表面は溶融している。これよりTiO₂やSiO₂の存在は酸化鉄の還元途上において、鉍粒表面で融点が高い生成物を形成し、凝集や融着を引き起こすことが考えられる。

Table 3 Information obtained from equilibrium phase diagram.

Data of equilibrium phase diagram		Ref
FeO - Fe ₂ O ₃	Eutectic point, Fe ₂ O ₃ =9mass%, 1644K	8
FeO - SiO ₂	Liquidus line temperature = 1623K	8
FeO - TiO ₂	Eutectic point, TiO ₂ =10mass%, 1586K	8
Fe ₂ SiO ₄ - TiO ₂	Eutectic point, TiO ₂ =9.5mass%, 1407K	9

以上、凝集実験結果と状態図の比較から得た結論としては、砂鉄の凝集のし易さはTiO₂やSiO₂の存在が大きい。ヘマタイトとマグネタイトの相違は存在する不純物の種類あるいは含有量の差だけでなく、還元速度の比較が必要で、それには鉍粒のモルフォロジーも大きく関係している。

4. 結言

砂鉄試料と比較材にヘマタイト系およびマグネタイト系粉鉍石を用いて、還元途上の凝集に及ぼす酸素ポテンシャルの影響を調べた。得られた結果を整理すると以下になる。

いずれの粉鉍石も、ウスタイトの安定領域の酸素ポテンシャルにおいて凝集し易いことがわかった。その凝集のし

やすさの順序は次の通りであった。

砂鉄 > ヘマタイト > マグネタイト

この凝集のし易さについては、砂鉄に含まれる TiO_2 の影響が大きい。また SiO_2 の多い砂鉄の凝集速度が一番大きく、還元の進行に伴い FeO と SiO_2 により Fe_2SiO_4 が生成され、これが凝集にかなり大きく影響を及ぼすことがわかった。そして還元率が大きくなくても鉍粒表面が熔融し鉍粒同士が融着することも確認された。従って、緒言で検討課題に挙げた鉍が生成するメカニズムの仮説3つの内、本研究の結果からは仮説①が妥当のように思われる。即ち、粉鉍石が還元前に集まってスポンジ状に酸化物を作り、この酸化物全体は熔融せずに表面だけが熔融して融着する。これが還元されて鉍になるものと思われる。これには砂鉄中の鉍物組成の SiO_2 と TiO_2 が大きく関与している。

本実験データは凝集するまでの基礎データであり、たたら炉内反応で凝集後どのように浸炭現象が起こるかはわからない。今後は凝集物への浸炭現象を調べることが、鉍生成機構や、たたら炉内反応の解明に重要であると思われる。

る。

本研究の実験遂行に当たっては、当時の千葉工業大学・工学部・金属工学科の学生であった松川真吾、設楽了、高橋由里子、本間崇、戸田省吾、八柳俊之、諸君の協力があった。記して感謝の意を表す。また、使用した粉鉍石は川崎製鉄KK（当時）より提供を受け、また試料の分析についても同社天辰正義博士に多大なご協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) H Minato and M Sasaki *Tatara Kenkyu*, **14** (1968), 90
- 2) M Maruyama *Tatara Kenkyu*, **22** (1978), 482
- 3) K Kiyonaga *Materia Jpn*, **33** (1994), 1453
- 4) K Nagata *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 715
- 5) K Nagata *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 633
- 6) J O Edstrom *J Iron Steel Inst*, **175** (1953), 289
- 7) G D McAdams *Ironmaking Steelmaking*, **1** (1974), 138
- 8) Verein Deutscher Eisenhüttenleute *Slag atlas*, Verlag Stahleisen mbh Dusseldorf, (1981), 42, 46, 45
- 9) M Sasabe, S Yamashita, S Utsuno and M Tate *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 33