

© 1986 ISIJ

高炉内近似条件下における焼結鉱の還元挙動 論文

岡本 晃*・内藤 誠章*²・斧 勝也*²
林 洋一*・井上 義弘*³

Reduction Behavior of Sinter under Blast Furnace Conditions

Akira OKAMOTO, Masaaki NAITŌ, Katsuya ONO,

Yooichi HAYASHI and Yoshihiro INOUE

Synopsis :

The authors developed a blast furnace inner-reaction simulator(BIS) which can simulate the behavior of reducing, softening, and melting of iron bearing materials in a blast furnace. BIS is an advanced equipment of the BORIS furnace developed by IRSID. The reduction behavior of sinter under the blast furnace conditions was investigated by BIS on two typical temperature profiles often found in the blast furnace, i.e. profile A having a considerably long thermal reserve zone of 1 000°C and profile B having two stage thermal reserve zones of 600°C and 1 000°C.

The reduction degradation behavior, reduction behavior, the change of the pore structure in the reduction process, and the effect of the temperature profile on them were clarified.

The feature of reduction behavior in the blast furnace is that the reduction degree is at a low value of 30% at the end of the thermal reserve zone of 1 000°C and that the reduction rapidly proceeds in the high temperature range below the thermal reserve zone. This reduction behavior indicates that the reducibility in the high temperature range is important as the reduction property of sinter.

1. 緒 言

高炉内における装入原料の還元挙動の把握は高炉操業上ならびに装入原料の品質改善上重要な課題である。装入原料の高炉内挙動の調査は炉内採取試料調査¹⁾、垂直ゾンデによる温度、ガス組成分布測定²⁾および解体調査³⁾などの実炉測定、高炉近似条件下での還元実験⁴⁾ならびに高炉数式モデル計算⁵⁾などによつて行われている。

実炉内還元挙動を把握するには炉高方向における装入原料の性状変化に加えて、温度、ガスの組成および流量を一貫して測定できることが理想的であるが、實際上このような測定は、解体調査を含めて困難であり、実炉測定値は必然的に断片的にならざるをえない。

一方軟化溶融挙動のシミュレート実験として、荷重軟化試験装置による高炉近似条件下での還元実験⁴⁾が行われているが、これは還元挙動のシミュレートよりも、むしろ高温性状の評価を主な目的としている。モデル計算結果⁵⁾はかなり高炉内還元挙動を説明できていると思うが、あくまで既存の知識を基にした計算結果であるので

実測値による検証が必要である。

このように高炉内還元挙動はかなり明らかになりつつあるが、それぞれの方法には限界があり、なお未解明の部分も多い。このため高炉内還元挙動の解明をさらに進めるためには、高炉内条件を再現し、炉内反応をシミュレートできる実験装置の開発が必要と考えられる。

著者らは IRSID で開発された Boris 炉⁶⁾の原理を応用し、高炉の炉高方向に沿つて還元、軟化、溶融などの反応を総合的にシミュレートできる実験装置、高炉内反応シミュレーターを開発した。本報ではこの実験装置の機能を記述するとともに、これを用いて焼結鉱の高炉内条件下での還元挙動を調査した結果を報告する。

2. 高炉内反応シミュレーターの機能

2.1 設備概要

高炉内反応シミュレーター(以下 BIS と略称)の概略図を Fig. 1 に示す。BIS は上部炉と下部炉より構成されており、上部炉は Boris 炉と同じ構造であり、高炉の塊状帯を、下部炉は塊状帯下端から融着、滴下帯まで

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 10 月 17 日受付 (Received Oct. 17, 1985)

* 新日本製鉄(株)製鉄研究センター (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)製鉄研究センター 工博 (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahata-higashi-ku Kitakyushu 805)

*³ 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

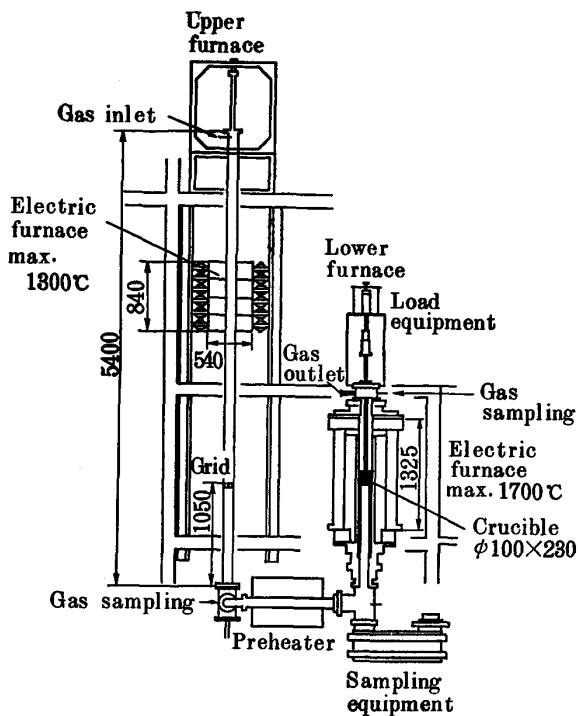


Fig. 1. Schema of BIS (Blast furnace inner reaction simulator).

をシミュレートする。上部炉は長さ 5.4 m, 内径 100 mm のステンレス製の反応管とこれに沿って上下可動で、かつ 4 ゾーンに分割され、各ゾーンごとに独立に温度制御が可能な電気炉から成っている。電気炉長さは 840 mm であり、Boris 炉のそれにほぼ等しい。

下部炉は荷重軟化試験装置に相当する炉であり、高さ 230 mm, 内径 100 mm の黒鉛製試料をつぼと最高 1700 °C まで昇温可能な電気炉、0~2 kgf/cm² の範囲で任意に設定できる荷重装置および滴下物採取装置から成っている。上部炉を通過した還元ガスは下部炉に導入される。

還元ガスは任意の組成にあらかじめ調整したポンプより供給され、流量は 0~200 NI/min の範囲で制御可能である。BIS は加圧下での実験も可能であり、上部炉と下部炉とも最大 5 kg/cm² G の圧力をかけることができる。ガス分析は上部炉と下部炉の出口において高速ガスクロマトグラフによつて行われ、CO, CO₂, H₂, N₂ の 4 成分が 1.5 min 周期で分析される。

2.2 高炉内反応シミュレーターの原理

BIS の原理と実験方法の説明図を Fig. 2 に示す。BIS 上部炉は電気炉の降下により高炉における装入物の降下を模擬する。上部電気炉のスタート位置は A の位置である。反応管内に試料（鉄鉱石類のみあるいは鉄鉱石類とコークス）を充填したのち、まず N₂ を流しながら

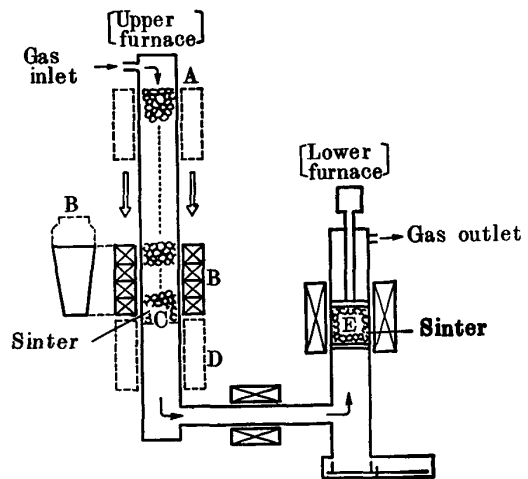


Fig. 2. Illustration for experimental procedure of BIS.

電気炉に高炉の塊状帯に相当する温度分布、つまり電気炉上端が塊状帯下端、電気炉下端が炉頂部の温度となるような分布を与える。この後還元ガスに切り替えるとともに電気炉を一定速度で降下させ、実験を開始する。

電気炉を位置 A から B へ降下させるのは反応管内の還元状況を定常状態にするためである。上部炉単独の実験の場合には電気炉が位置 B に到達した時に実験を終了する。C 点は炉頂に相当するので反応管内試料の採取により、炉頂から塊状帯下端までに相当する試料を得ることができる。

塊状帯下端温度よりさらに高温までの実験を行う時には上部電気炉は位置 B からさらに D まで降下させる。C 点の試料は電気炉位置 B においては炉頂部に、位置 D においては塊状帯下端にあることとなる。下部炉試料 E の温度は C 点の温度と同一となるよう制御されており、下部炉内に導入されるガス組成も同一である。したがって下部炉試料 E は上部電気炉が位置 B から D へ降下する間に C 点の試料と同様に炉頂部から塊状帯下端までの還元履歴を受けたことになる。その後は下部炉に設定した任意の昇温速度で軟化、熔融、滴下まで実験を進める。このように下部炉からみると上部炉は高炉の炉内状況に応じた還元ガスの発生器といえる。

以上のように BIS は高炉の炉頂から熔融滴下までの炉内反応のシミュレーターであり、荷重軟化試験装置と比較すると、温度分布を与えるという点では同じであるが、塊状帯下端までの還元ガス組成が反応の結果として決まるという特徴を有する。

2.3 実験条件と方法について

2.3.1 実験条件

(1) 温度分布の設定

上部電気炉は4ゾーンに分割されており、各ゾーンの温度を適当に設定することで温度分布を作成する。各ゾーンの設定温度は非連続であるが、反応管内の温度分布は連続分布となる。

(2) 還元ガス

還元ガス量は高炉の燃料比に相当する因子である。ガス組成は塊状帯入口つまり間接還元帯入口ガス組成とし、ガス流量は高炉の鉄 t 当たりの還元ガス (CO + H₂) 量と等しくなるように決めた。

(3) 上部炉降下速度

上部電気炉降下速度は高炉の出鉄比に相当する因子であり、鉄鉱石類の塊状帯通過時間を高炉のそれと等しくなるように決めた。

2.3.2 上部炉定常状態への到達時間

上部炉反応管内の鉄鉱石類は実験開始時には未還元の状態であるので、管内還元状況が定常状態に達するまでには、ある時間電気炉を降下させる必要がある。定常状態への到達は上部炉出口ガス組成の変化と実験後の反応管内還元率分布とから判定できる。実験初期は管内の還元量が多いため出口ガス中の CO₂ 濃度は高いが、時間経過とともに減少し、ついには高炉の炉頂ガス組成に相当するある一定値に達する。この時点をもつて管内還元状況は定常状態に到達したと判断される。また実験後の反応管内還元率分布は初期つまり反応管上部の還元率は低い、下部へ向つて増加し、ある一定値に達する。この点からも定常状態到達の判断ができる。

定常状態に到達するまでの時間に対する操作要因の影響を、還元ガス量、降下速度、炉内圧力および温度分布について調べた。この結果定常状態への到達は操作要因にかかわらず、ほぼ電気炉の降下距離によつて決まり、その距離は電気炉長さにほぼ等しい約 1 m であることがわかった。

2.3.3 上部炉におけるコークス装入の影響

高炉塊状帯のシミュレートという本来の目的からすれば当然鉄鉱石類とコークスの層状装入とすべきであるが、上部炉の温度領域を 1000°C までとしたためソーシヨノロス反応は無視できると考えられた。焼結鉄とコークスの層状装入と焼結鉄単独装入時の反応管内還元率分布およびガス組成分布の比較によると、両者にはほとんど差が見られず、鉄鉱石類の単独装入でも実験目的

Table 1. Experimental conditions of BIS.

Reduction gas	CO (%)	41
	H ₂ (%)	4
	N ₂ (%)	55
	Flow rate (l/min)	66
Inner pressure (ata.)		1
Upper furnace	Temperature profile	A, B
	Descending speed (mm/h)	250
	Charging height (mm)	2 000~2 700
	Sample size (mm)	15~20
Lower furnace	Temperature profile under 1000°C	A, B
	Heating rate over 1000°C (°C/min)	10
	Loading weight (kg/cm ²)	1
	Loading temperature (°C)	over 800
	Sample size (mm)	15~20
	Sample thickness (mm)	70

が達せられることがわかった。

3. 実 験

BIS を用いて燃料比 480 kg/t、出鉄比約 2 t/d/m³ に相当する条件で実験し、焼結鉄の還元挙動などを調べた。実験条件は Table 1 に示すが、このうち温度分布については実炉の垂直ゾンデデータ^{8)~10)}を参考にし、高炉の代表的な温度分布としてつぎの A, B 2 種類のパターンを選んだ。A パターンは炉頂から 1000°C まで急速に昇温し、1000°C において比較的長い熱保存帯を有する分布であり、B パターンは 600°C の低温熱保存帯と 1000°C の高温熱保存帯の 2 段の熱保存帯を有する分布である。A, B パターンとも 1000°C 以上の昇温速度は同様に垂直ゾンデデータを参考とし、10°C/min とした。また導入する還元ガスの組成は CO 41, H₂ 4, N₂ 55%, 焼結鉄粒度は 15~20 mm とした。ガス流量は A, B パターンで差があると考えられるが、高炉内の温度分布と熱流比の関係が明確ではないため、ここでは同一とした。

なお塊状帯の還元挙動、還元粉化挙動および気孔構造の変化の調査は上部炉単独実験後の反応管内の試料を調査することによつて行つた。試料の採取は実験終了後直ちに N₂ 冷却し、その後反応管を縦方向に切断して行つた。実験に供した焼結鉄は塩基度 1.7 の実機焼結鉄であり、その化学分析値と物性値は Table 2 に示す。

4. 実験結果と考察

4.1 還元粉化挙動

上部炉内の還元粉化率分布を温度分布とともに Fig.

Table 2. Chemical composition and physical properties of sinter sample (%).

T. Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO/SiO ₂	SI	RDI	JIS-RI
57.1	5.69	5.56	9.56	1.98	1.27	1.72	92.3	36.4	67.3

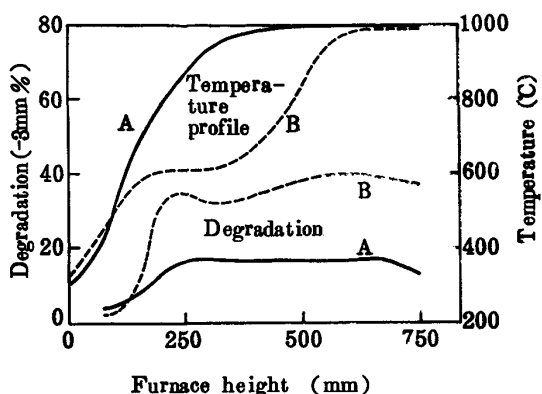


Fig. 3. Effect of temperature profile on degradation of sinter sample taken from BIS.

3に示す。粉化率は還元後試料をRDI法と同条件でタンブラーにかけた後の $-3\text{mm}\%$ を示す。温度パターンAとBでは粉化挙動に著しい差がみられ、低温部分の長いBの方が粉化率は大きい。また粉化終了時の温度はAが 800°C 、Bが 600°C であり、この時の還元率は後述のFig. 6に示すとおり、それぞれ約15%と5%であった。

BIS上部炉とはほぼ同じ装置を用いた長野ら¹¹⁾¹²⁾の実験結果も同様の傾向を示しており、 600°C 付近を通過する昇温速度が大きいほど、粉化率が小さくなると同時に粉化終了時の温度、還元率とも高くなるようである。還元率が高いにもかかわらず粉化率が小さいのは還元粉化の激しい温度領域が $400\sim 600^\circ\text{C}$ に限定される¹³⁾ということに起因する。つまり昇温速度が小さい場合には、 600°C 位まで還元粉化原因であるヘマタイトからマグネタイトへの還元が終了し、したがって粉化もほぼ終了する。これに対し昇温速度の大きい場合には還元粉化領域でのヘマタイトの還元量が少ないため粉化は小さい。 600°C を越えるとヘマタイトからマグネタイトへの還元と平行してマグネタイトからウスタイトへの還元とカルシウムフェライトの還元が起こり、粉化量の増加は小さいが、還元率は急速に高くなる。

4.2 還元挙動

高炉の典型的な温度分布であるAパターンの条件下におけるBIS下部炉の還元曲線を設定温度分布、還元速度変化および下部炉入口ガス組成変化とともにFig. 4に示す。還元率は 1000°C の熱保存帯まではかなり急速に上昇し、熱保存帯到達時には25~30%となる。その後の熱保存帯においては還元率は約30%のままほとんど変化せず、熱保存帯中間部にいわゆる化学保存帯を形成する。この領域ではガス組成がほぼウスタイト-鉄平衡濃度となっており、還元はウスタイト段階で停滞している。熱保存帯の末期になるとガス中CO濃度がウ

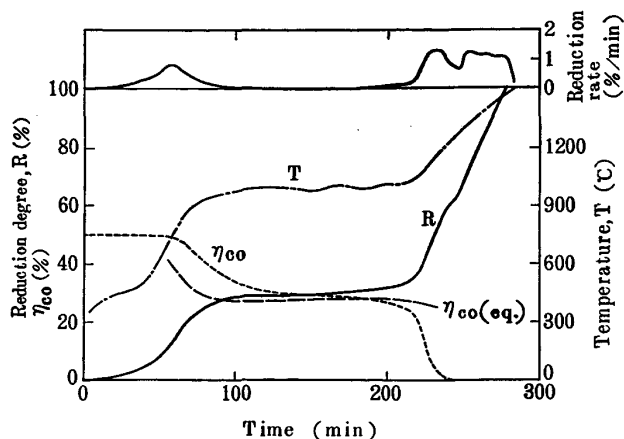


Fig. 4. Change of reduction rate, reduction degree, and η_{CO} ($\text{CO}_2/(\text{CO}+\text{CO}_2)$) for temperature profile A by BIS.

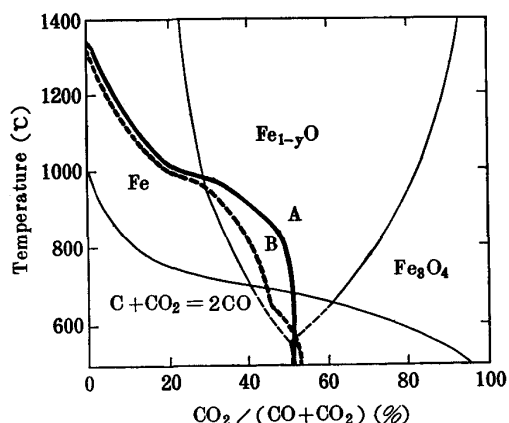


Fig. 5. Gas composition at outlet of BIS upper furnace for temperature profile A and B.

スタイト-鉄平衡濃度より高くなるので、徐々に鉄への還元が進み出し、熱保存帯終了時には還元率は35~40%となる。

熱保存帯を過ぎるとさらにCO濃度が増加し、還元は急速に進む。 1200°C 前後になると、後述の気孔量の変化を示すFig. 8からもわかるように生成した融液が気孔を閉塞し始め、焼結鉍内へのガス拡散抵抗が増大するため還元速度は低下し、 1250°C 前後で極小値を示す。これ以上の温度域では融液中のFeOがコークスあるいは黒鉛のつぼによつて直接還元され、再び還元速度は上昇する。

温度パターンA、Bのもとでの、上部炉出口ガス中の η_{CO} ($\text{CO}_2/(\text{CO}+\text{CO}_2)$)の温度変化をFe-O-C系平衡状態図上に示したFig. 5によると、 1000°C 以下の η_{CO} はBパターンの場合ほぼウスタイト-鉄平衡線上に位置するが、Aパターンの η_{CO} はややウスタイト側に入つたところに位置する。つまり 1000°C までの昇温速度の大きいAパターンでは、Bパターンと比べてより

高温側で還元が進む傾向にある。Fig. 5 に示す BIS 内の温度と η_{CO} の関係は垂直ゾンデによる高炉内の測定値^{8)~10)} から求められる関係とほぼ一致する。さらに Fig. 4 の BIS 内の還元曲線も温度分布実測値から計算で求めた高炉内還元率分布⁸⁾ とほぼ一致するので BIS 内の還元挙動は高炉内のそれを十分表現しているものと考えられる。

以上の結果から高炉内還元挙動の特徴は熱保存帯末期前の還元率は約 30% と低いが、熱保存帯以降の高温域で急速に還元が進む点にあるといえる。このような還元挙動を基に考察すると高炉内試料の調査結果は以下のよう

(1) シャフト中段付近の還元率が半径方向の一部を除いておおむね 30% 以下^{14)~18)} と低いことは、この領域が熱保存帯末期以前の領域であることを示している。

(2) シャフト中段付近でも中心部の還元率は高い^{16) 18)} が、ガス流量の多い中心部はすでに熱保存帯以降の高温還元域に入っていることを示している。

(3) 融着帯近くで還元が急速に進行してい^{19)~21)} ることは、熱保存帯末期以降急速に還元が進み、融着帯に至るといふ高炉内還元の特徴を示している。

(4) シャフト部試料など還元率の比較的低い段階では焼結鉄、ペレットおよび塊鉄などの銘柄間で還元率に差が見られない^{15) 18) 22)}。このことは、熱保存帯までの還元率が低い上に還元が比較的ゆるやかに進み、かつ熱保存帯中間域に化学保存帯が存在することのために、熱保存帯末期以前には被還元性の差が現れにくいことを示している。つまり逆にいえば熱保存帯末期以前の炉内試料で被還元性の差を比較することは困難である。

高炉内のガス還元は温度とガス組成が連続して変化する条件下での複雑な還元ではあるが、熱保存帯を境として還元の特徴に明らかな差があり、高炉内のガス還元はこの 2 つに大別される。つまり 1 つは炉頂から熱保存帯中期までの η_{CO} の高い還元ガスによるウスタイトまでの還元 (以下低温還元) であり、もう 1 つは熱保存帯末期以降の高温かつ η_{CO} の低い還元ガスによるウスタイトから鉄への還元 (以下高温還元) である。

高炉の還元効率は上記還元のどちらかによつて支配される筈である。BIS 上部炉実験で求められる低温還元のみを考慮したシャフト効率温度パターン A、B でほとんど差のないこと、熱保存帯末期から直接還元域までの短時間のうちに間接還元率の約半分の還元が進行していること、および高温還元性が高温性状に大きな影響を及ぼす^{4) 23) 24)} ことなどを考慮すると、高温還元のほうがより重要であると推察される。

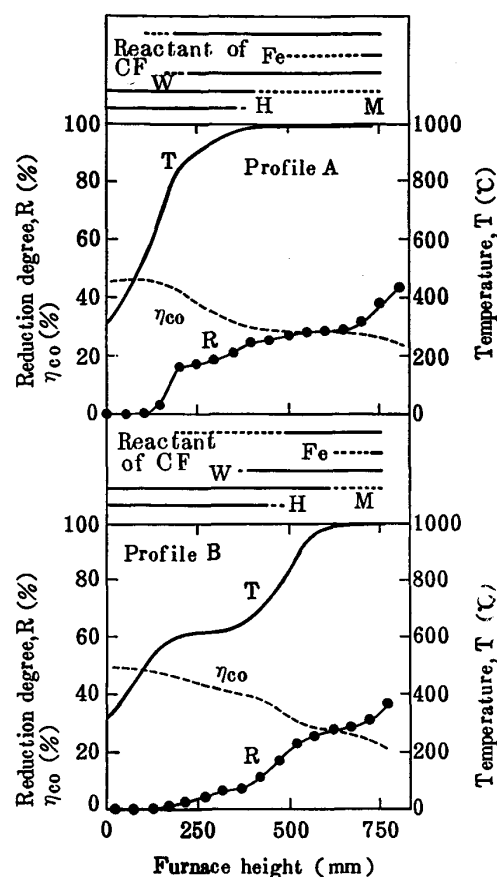


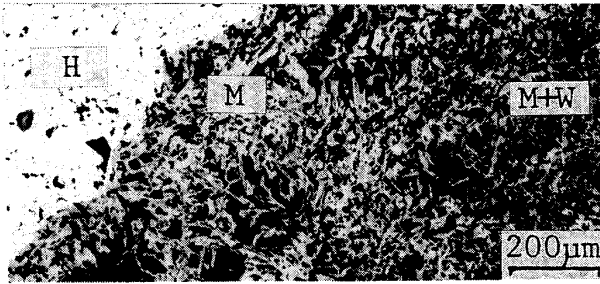
Fig. 6. Change of reduction degree, η_{CO} ($CO_2/(CO+CO_2)$), and mineral phases in BIS.

4.3 塊状帯における還元形態

温度パターン A と B における上部炉内の還元率分布を設定温度パターンおよび鉄物相変化とともに Fig. 6 に示す。鉄物相の識別は顕微鏡観察で行った。マグネタイトとウスタイトは $SnCl_2$ 飽和溶液による腐食法で識別した。A パターンの還元挙動は前節で述べた。B パターンにおいては $600^\circ C$ の低温熱保存帯末期の還元率は約 6% と低く、初期における還元速度は A パターンよりも小さいが、 $1000^\circ C$ の高温熱保存帯末期になると、還元率は 35~40% となり、A パターンのそれとほぼ等しくなる。

還元形態は温度分布によつて違いがみられる。A パターンの場合、 $800^\circ C$ から $1000^\circ C$ の熱保存帯到達までの温度域において、Photo. 1 に示すように、ヘマタイト、マグネタイトおよびウスタイトの共存する部分があり、並列的な反応の形態をとる。

これに対し、B パターンの場合には $600^\circ C$ の低温熱保存帯末期まではヘマタイトからマグネタイトへの還元、 $600^\circ C$ から $1000^\circ C$ の高温熱保存帯初期まではマグネタイトからウスタイトへの還元、高温熱保存帯末期



H : Hematite M : Magnetite
W : Wustite Etched by SnCl₂

Photo. 1. Three phase coexistent microstructure in sinter sample taken from BIS under temperature profile A.

以降はウスタイトから鉄への還元が主として進行しており、逐次反応に近い還元形態をとる。ただ元鉄へマタイトあるいは粗大な骸晶状へマタイトは 600°C 以上でも残存が認められる。

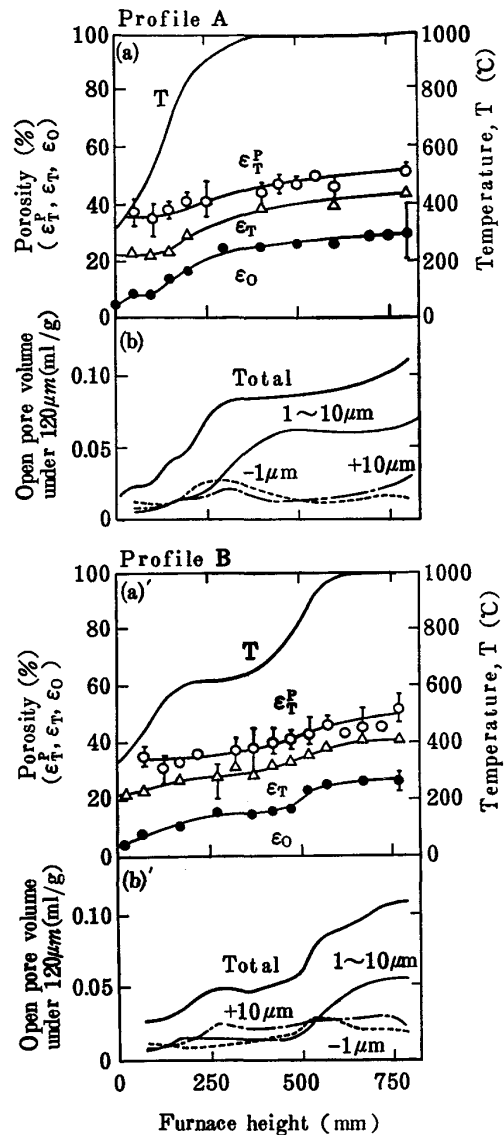
カルシウムフェライトの還元はかなり高温にならないと始まらない。800°C 以下での還元はわずかしき見られず、実質上の還元開始温度は 800°C である。この温度は微粒の合成カルシウムフェライトについての CO 30, N₂ 70% のガスによる還元実験結果²⁵⁾よりも高温側へずれているが、この差は還元方法と還元ガス組成の違いに起因すると考えられる。

4.4 気孔構造変化

還元過程における気孔構造変化は、ペレットについてはかなり調べられている²⁶⁾。しかしそのほとんどは定温還元での測定であり、高炉内条件下での気孔構造変化、特に焼結鉄のそれについての報告は見当たらない。

BIS 上部炉内の焼結鉄の気孔率変化を温度パターン A と B について Fig. 7(a), (a') に示す。ここで ϵ_T^P はプラスチック法²⁷⁾による数 mm 以下の開気孔を含む全気孔率を、 ϵ_T は JIS M 8716 で定められた水銀法による数 100 μm 以下の開気孔を含む全気孔率を、 ϵ_0 は水銀ポロシメーターによる 120 μm 以下の開気孔率を示す。還元前にはそれぞれ $\epsilon_T^P=33.4$, $\epsilon_T=22.5$, $\epsilon_0=5.0\%$ であつた。還元の進行とともに上記気孔率は徐々に増加してゆくが、 $\epsilon_T^P-\epsilon_0$ あるいは $\epsilon_T-\epsilon_0$ は温度パターン A, B ともほとんど変化しない。つまり 120 μm 以下の ϵ_0 のみが増加し、120 μm 以上の気孔はほとんど変化しない。したがって還元過程における気孔構造変化は 120 μm 以下の気孔構造の調査によつておおむね明らかにできる。

水銀ポロシメーターによつて測定した 120 μm 以下の上部炉内の気孔率変化を -1, 1~10, +10 μm に区分して Fig. 7(b), (b') に示す。B パターンのほうが A パ



Porosity ϵ_T^P : Plasticine method
 ϵ_T : JIS M 8716 ϵ_0 : Mercury porosimeter

Fig. 7. Change of porosity and open pore volume of sinter sample taken from BIS.

ターンよりも還元形態が逐次的であるため、還元の進行と気孔構造変化との対応もより明確である。

B パターンの場合、550°C 付近から 600°C の低温熱保存帯中期まで、つまりへマタイトからマグネタイトへの還元時における気孔の増加は 120 μm 以下の全域にわたる。組織観察によると、この間の生成気孔はマグネタイト粒子内の微細気孔と組織各部にみられるき裂であり、増加した気孔のうち 1 μm 以下はマグネタイトの微細気孔に、1 μm 以上はき裂にほぼ対応する。次いで低温熱保存帯から高温熱保存帯への昇温時、つまりマグネタイトからウスタイトへの還元時には -1 μm と 1~10 μm の気孔、特に 1~10 μm の気孔の増加が著しい。その後、-1 μm の気孔が減少し、1~10 μm の気孔が増

加する傾向にあることから、ウスタイトへの還元時に生成する $-10\ \mu\text{m}$ の気孔は還元の前進とともに気孔径が増大すると考えられる。

Aパターンの場合には還元の前進が並列的に起こるので、上記したBパターンでの気孔構造変化が 550°C 付近から熱保存帯初期までにオーバーラップした形で進行する。A、Bパターンにおける気孔構造の差異を高温熱保存帯初期の時点で比較すると、気孔の絶対量は両者であり差はないが、大きなき裂に対応する $10\ \mu\text{m}$ 以上の気孔と $1\ \mu\text{m}$ 以下の微細気孔はBパターンのほうが多く、 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ の気孔はAパターンのほうが多い。

このようなA、Bパターンの気孔構造の差異はヘマタイトから還元されるマグネタイトの構造が、ほぼ 700°C を境として異なることに起因する。温度 600°C では Photo. 2 (a) に示すように微細気孔を持つマグネタイトが生成するとともに、組織各部にき裂の生成がみられるのに対し、 800°C では Photo. 2 (b) に示すように微

細気孔のほとんどないマグネタイトの生成がみられ、SWANN ら²⁸⁾の観察と同様であった。前節で述べたようにBパターンにおけるマグネタイトへの還元は 600°C まででほぼ終了するのに対し、Aパターンでは 700°C 以上でもマグネタイトへの還元が起るためA、Bパターンにおける気孔構造の差異が生じるわけである。 700°C 以上におけるマグネタイトへの還元時に生成する気孔の大きさは組織観察および Fig. 7 (b) から $1\sim 10\ \mu\text{m}$ であると推察される。

次に 1000°C 以上の還元、つまりウスタイトから鉄への還元時の $120\ \mu\text{m}$ 以下の気孔量変化を Fig. 8 に示す。鉄への還元に伴い $1\sim 10\ \mu\text{m}$ の気孔が急速に増加する。気孔量は 1150°C 付近まで増加したのち、これ以上の温度では逆に急激に減少する。減少速度は $1\sim 10\ \mu\text{m}$ の気孔のほうが $10\ \mu\text{m}$ 以上の気孔よりも大きく、小さい気孔ほど減少しやすい。これは融液生成による気孔閉塞状況を示すものであり、4.2 節で述べた高温領域でのガス還元速度の低下はこの気孔閉塞によるものである。

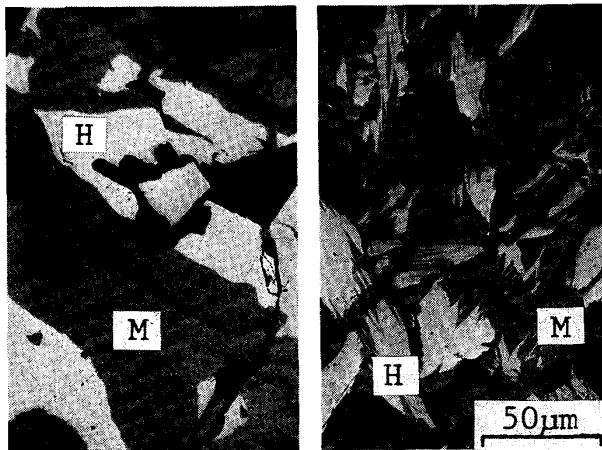
5. 結 言

高炉内の還元反応および軟化溶融挙動の総合的なシミュレーターとして開発した実験装置、高炉内反応シミュレーターの設備および機能について概説した。またこの実験装置を用いて高炉内条件下における焼結鉄の還元粉化挙動、還元挙動および気孔構造変化を高炉内の代表的な2つの温度分布、つまり 1000°C に比較的長い熱保存帯を有するAパターンと、 600°C と 1000°C に2段の熱保存帯を有するBパターンについて調査した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 還元粉化量は温度分布によつて大きな差がある。 600°C 付近の昇温速度が小さく、この温度域まででヘマタイトからマグネタイトへの還元がほぼ終了するBパターンの粉化量は、 600°C 付近の昇温速度の大きいAパターンより著しく大きい。

(2) 高炉塊状帯条件下における還元は、Aパターンの場合熱保存帯温度までかなり急速に進むが、熱保存帯中間部においては還元がほとんど進まず、化学保存帯を形成する。一方BパターンではAパターンと比べて還元の進行は遅いが、徐々に還元率の差は縮まり、高温熱保存帯末期ではほぼ等しくなる。この間の還元形態にはAパターンは並列的な反応、Bパターンは逐次的な反応という差異がある。

(3) 高炉内条件下での還元挙動には、 1000°C の熱保存帯末期直前の還元率は約 30% と低いが、熱保存帯



(a) 600°C profile B (b) 800°C profile A

H: Hematite M: Magnetite

Photo. 2, Microstructure of reduced magnetite in sinter sample taken from BIS.

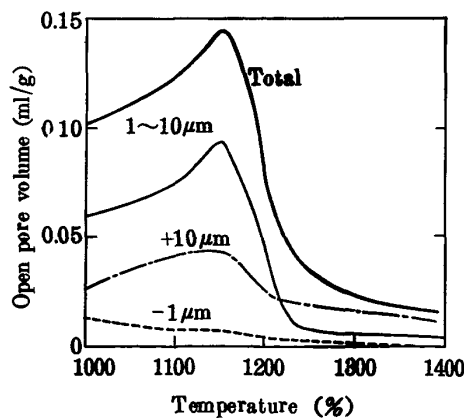


Fig. 8. Change of open pore volume of sinter sample taken from BIS at high temperature.

以降の高温域で還元が急速に進むという特徴がある。このような還元挙動は高炉内試料の調査結果とよく符合するとともに、焼結鉄の還元性状として高温域での被還元性が重要であることを示す。

(4) 高炉内条件下での還元過程において、気孔量は還元の前進とともに増大してゆくが、1150°C 付近に至ると融液生成による気孔閉塞のために急激に減少する。生成気孔には反応によつて生成する気孔とき裂とがあるが、反応気孔は各還元段階で、き裂はヘマタイトの低温還元時に生成する。

文 献

- 1) 例えば九島行正, 内藤文雄, 有野俊介, 佐藤勝彦, 金森 健: 鉄と鋼, 69 (1983), A1
- 2) 例えば板谷 宏, 福武 剛, 岡部依児, 長井 保: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 472
- 3) 例えば下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 547
- 4) 例えば山岡洋次郎, 堀田裕久, 梶川脩二: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1850
- 5) 例えば桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 787
波田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1898
- 6) B. BONNIVARD and A. RIST: Rev. Métall., 59 (1962), p. 401
- 7) R. JON, C. OFFROY, L. RENITE, A. RIST, M. SCHNEIDER and J. M. STEILER: Rev. Métall., 73 (1976), p. 503
- 8) 梶川脩二, 山本亮二, 中島龍一, 岸本純幸, 福島勤: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2361
- 9) 徳永正昭, 久保 進, 寺田進一, 矢動丸成行, 川岡浩二, 岩尾範人: 鉄と鋼, 69 (1983), S868
- 10) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 磯山 正, 今井 徹, 原 義明, 須沢昭和: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1578
- 11) 長野誠規, 谷中秀臣, 山岡洋次郎: 鉄と鋼, 70 (1984), S87
- 12) 長野誠規, 谷中秀臣: 鉄と鋼, 71 (1985), S47
- 13) 例えば渡辺正次郎, 大竹康元, 道祖田盾力: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 349
- 14) 中沢孝夫, 佐々木稔: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 112
- 15) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1606
- 16) 成田貴一, 出口幹郎, 森 利治, 笹原茂樹, 前川昌大, 山本吉弘, 佐藤健一, 横江寛治: 鉄と鋼, 66 (1980), S35
- 17) 菅原欣一, 稲垣憲利, 野宮好堯, 持田順二: 鉄と鋼, 67 (1981), S52
- 18) 山口英俊, 森 利治, 金山宏志, 前川昌大, 吉田康夫, 上原輝久: 鉄と鋼, 70 (1984), S96
- 19) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 559
- 20) 成田貴一, 佐藤 忠, 前川昌大, 富貴原璋, 金山宏志, 笹原茂樹: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1975
- 21) 江崎 幹, 小島吉夫, 稲角忠弘, 高崎 誠, 春名淳介, 野島健嗣: 鉄と鋼, 67 (1981), S719
- 22) 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1860
- 23) 森 克己, 日高良一, 川合保治: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1287
- 24) 国分春生, 佐々木晃, 田口整司, 槌谷暢男: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2338
- 25) 神坂栄治, 相馬英明, 高田 司: 鉄と鋼, 69 (1983), S741
- 26) 例えば H. SCHENCK, A. MAJDIE and U. PUTZIER: Stahl Eisen, 87 (1967), p. 1065
- 27) 佐藤勝彦, 鈴木 悟, 沢村靖昌, 斧 勝也: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2215
- 28) P. R. SWANN and N. J. TIGHE: Metall. Trans. 8B (1977), p. 479