

## 論 文

### 塊状鉄鉱石の還元試験\*

池野輝夫\*\*・萩原友郎\*\*

#### REDUCIBILITY TEST OF IRON ORE LUMPS

*Teruo Ikego, Tomoro Hagiwara*

##### Synopsis:

The authors investigated the gaseous reducibility of several ores in order to estimate the maximum size of ore suitable for blast furnace charge.

About 1 kg of each ore, which was crushed to various size (maximum of 3 in), was treated at 900°C using 20l/min/kg of H<sub>2</sub> gas as a reducing medium. The reduction degree was based on the total weight of oxygen which combined with the iron in ore, and measured by means of the loss-in-weight method.

It was found that the reduction velocity became higher in the sequence of magnetite→hematite→limonite, and that the higher the porosity of each kind of ores the higher the reduction velocity. Curves expressing the relation between the ore size and the time required for 90% reduction showed a trend to diverge in the case of magnetite and dense hematite, while in the case of porous hematite and limonite to converge.

Further, the authors assumed the maximum size (suitable for blast furnace charge) of hematite-ore of 24% porosity to be 2" (in dia.) and took the size of the other ore which required the same time for 90% reduction as that of the above mentioned standard ore as its maximum size.

It was concluded from the results that the maximum size for magnetite was 25~30 mm except those which had very low reducibility, about 40 mm for dense hematite and about 50 mm for porous hematite. With hematite and limonite of high porosity or those which suffered cracks during heating, the size of ore became no more a dominating factor upon reducibility.

### 1. 緒 言

熔鉱炉操業において炉況を安定し、能率と銑鉄の品質を向上させるためには、装入された鉄鉱石が炉胸部で十分ガス還元される事が第一に大切である。それで鉄鉱石のガス還元性について従来から多くの研究<sup>1)</sup>がなされている。鉄鉱石のガス還元性の良否とは、換言すれば熔鉱炉ガスによる脱酸反応が鉄鉱石の表面から内部へ進む速度の大小であつて、根本的には鉄鉱石の化学的(鉄物学的)性質と Fe-O<sub>2</sub>-還元ガス間の還元平衡<sup>2)</sup>によつて左右されるから、鉄鉱石が小さいか、または粉状であれば、鉄鉱石の化学的組成および還元ガスの種類<sup>3)4)5)</sup>と温度<sup>3)6)7)8)9)</sup>が主要な要因となるが、鉄鉱石が相当な大きさを持つ場合には鉄鉱石内部での還元ガスおよび還元生成ガスの拡散<sup>5)6)8)9)</sup>および熱の浸透<sup>10)11)</sup>が関係するため、鉄鉱石の形状、大きさ<sup>12)13)14)</sup>、表面積、気孔率<sup>15)</sup>、比熱、熱の伝達性<sup>16)17)</sup>、加熱中の膨脹収縮<sup>17)18)19)</sup>、亀裂、気孔率の変化<sup>2)</sup>、通気度等の種々な物理的性質の他、還元ガスの流量および圧力<sup>21)~23)</sup>、炭素<sup>24)~29)</sup>析出等の影響が加わつて還元中の

鉄鉱石内部の組織変化<sup>30)</sup>の様子が變つてくる。

これら諸因子に関する研究は、塊鉄の還元状態を明らかにし、個々の鉄鉱石の還元性の良否を説明する事ができよう。しかし実際の熔鉱炉による製鉄作業では、このような各鉄鉱石の還元の特種性が明らかになつても、還元性を改善するために焙焼、焼結、ペレタイジング等の予備処理を行う事は、それによつて十分な利益がある場合以外には経済的に困難であり、しかもそのような条件にある鉄鉱石は少いので、通常的手段としては装入粒度を調整するのが第一の手段である。従つて上記の如き還元の本質を明らかにする基礎的研究と同時に、個々の鉄鉱石について熔鉱炉に装入しうる最大の粒度を定める試験が必要である。

以上の理由から筆者等は各種鉄鉱石の還元試験を行い、塊鉄の還元状況を調べると共に、熔鉱炉に対する最大装入粒度を定める実験を行つていたので、そのうち代表的

\* 昭和 29 年 10 月本会講演会にて一部講演

\*\* 富士製鉄株式会社室蘭製鉄所研究所

な数種の鉱石についての結果を報告する。

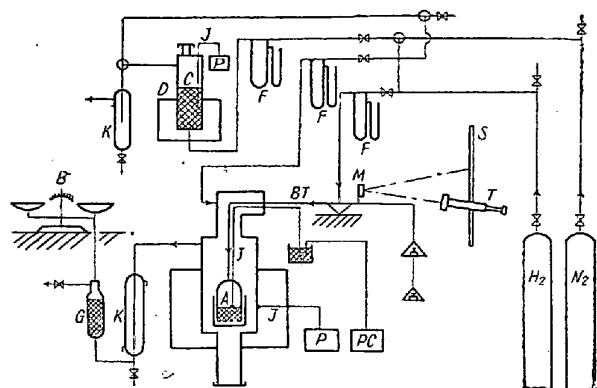
## II. 実験の方針及び方法

まず試料の大きさは、前述の如く塊鉄の還元には多くの因子の影響があるので、小粒度での結果から推定するのは危険が多く、なるべく熔鉄炉に装入するままの粒度形状で試験を行うのが望ましい。最大装入粒度は炉の容積<sup>14)</sup>他装入物粒度との関連等から限界があり、現場の状況から考えて試料の大きさは 3 in 迄、重量は 1 kg 迄実験できる如く、また形状は特に整形せず、装入鉄石中から比較的球に近いものを用いた。還元率の測定は大試料の実験が容易である重量減法により、還元ガスは、 $\text{CO} + \text{N}_2$  が理想的であるが、多量に容易に得られるのと、炭素析出の影響がなく測定に便利である点から  $\text{H}_2$  を用いた。還元温度も実験を容易にするため一定温度で比較値をとる事にした。普通還元試験は  $700 \sim 950^\circ\text{C}$  の範囲で行われるが  $900^\circ\text{C}$  を超すと、いずれの鉱石でも還元がよくなるので比較が困難になり、かつ珪酸、酸化マンガン等の還元も進んでくる。また  $800^\circ\text{C}$  以下では還元が急速に遅くなり、かつ熔鉄炉内の温度分布<sup>15)</sup>から考えると鉄石が  $800^\circ\text{C}$  以下の温度範囲にある時間は比較的短いので、温度は  $900^\circ\text{C}$  とした。

Fig. 1, 2 は上記の条件を満足するように作られた実験装置である。主要部は大型の熱天秤で、 $105^\circ\text{C}$  で乾燥された鉄石約 1 kg が高さを調節できる目板をもつ 4 in 鋼管内に取められて、外管 (6 in 鋼管) 内に垂され、6kw の電気炉で外部から加熱される。試料の温度および重量変化は、薄肉ゴム管で天秤の揺動を妨げずに気密を保ちつつ外部から測定され、還元用  $\text{H}_2$  は試料懸垂管内を通つて内部へ入り、試料を還元後炉外へ出て、生成水蒸気を凝縮および吸収されてから放出される。装入された鉄石は、 $600^\circ\text{C}$  に加熱された銅により脱酸された 1l/mn の  $\text{N}_2$  気流中で  $900^\circ\text{C}$  迄加熱され、結晶水の脱出、炭酸塩等の分解が終つて重量が一定になつた後  $\text{H}_2$  で還元される。使用した  $\text{H}_2$  は市販のボンペ入りのものであるが  $\text{N}_2$  2%,  $\text{O}_2$  0.1% 程度の純度なので、特別浄化せずそのまま用いた。重量の変化は 10 g 減る毎所要時間を、排気中の水分量は 5~10mn 毎に測定し還元終了後は少量の  $\text{H}_2$  または  $\text{N}_2$  を送つて再酸化を防ぎつつ  $100^\circ\text{C}$  以下迄冷却する。

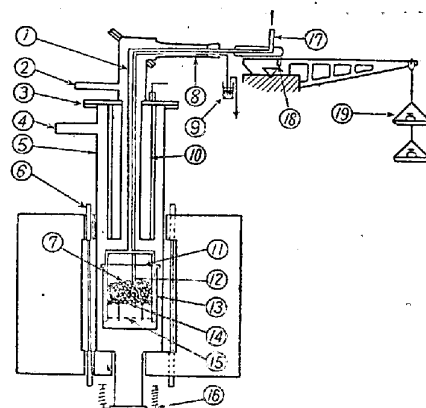
## III. 試 料

供試試料は磁鉄鉱 3, 赤鉄鉱 4, 褐鉄鉱 1 種である。磁鉄鉱の Vancouver は灰黒色の緻密な微晶質鉄石、



A. sample, B. balance, BT. thermo balance  
C. copper wire, D. deoxidizing furnace,  
F. flow meter, G. silica gel J. thermocouple,  
K. cooler, M. mirror, P. pyrometer, P.C. thermo controller, S. scale, T. telescope.

Fig. 1. Apparatus for experiment.



1. suspension pipe 2. preventive  $\text{H}_2$  for condensation  
3. flange 4. exhaust pipe 5. out side tube  
6. SiC heating unit 7. sample 8. rubber tube  
9. Hg vessel 10. gas pre-heating furnace 11. vessel cover  
12. Pt thermocouple 13. sample vessel  
14. adjustable height grating 15. fixed grating  
16. safety valve 17. gas inlet 18. mirror  
19. balance weight

Fig. 2. Thermo balance.

Texada は灰黒色で前者よりやや結晶の大きい微晶質、Heizer は黒色結晶状の磁鉄鉱であるが若干赤鉄鉱を混じている。いずれも接触鉄床に属し、方解石、石英の他硫化鉄物、スカルン鉄物を含むが、そのうち Vancouver は柘榴石、Texada は柘榴石、黄鉄鉱、黄銅鉱、Heizer は緑泥石に富んでいる。赤鉄鉱の Tata は青灰色の極めて緻密な高品位鉄で、若干層状部がある。Utah は赤紫色で気孔をもち、微細な結晶粒が散在し、Goa は赤褐色乃至赤紫色の多孔質一部層状の赤鉄鉱部から、赤褐色中に黄色乃至黒褐色の部分混じり多くの貫通孔をもつ赤鉄鉱と褐鉄鉱の混在するものに迄至っているが、これを生鉄の気孔率で分類し、後者の気孔率 20~30% のものを A, 前者の 10~20% のものを B とした。脇方は Mass type の沼鉄鉱で茶褐色の網状多孔質である。

Table 1. Type and analysis of ores investigated.

District	Type	Analysis percent							
		T.Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	C. W.	Ig. loss
Vancouver	Magnetite	59.99	25.60	7.28	4.99	0.91	—	1.44	—
Heizer	Magnetite	66.26	24.75	3.22	0.11	0.77	0.175	2.77	—
Texada	Magnetite	58.63	28.83	10.30	3.56	1.19	0.906	0.20	—
Tata	Hematite	68.21	1.23	0.90	0.025	0.44	—	1.70	0.56
Utah	Hematite	59.28	4.41	4.60	0.07	2.92	—	0.75	2.60
Goa A	Hematite + Lepidocrocite	55.97	3.15	3.56	0.116	6.80	—	8.11	8.21
Goa B	Hematite	60.71	2.53	1.33	0.033	1.47	—	3.86	5.12
Wakikata	Goethite	56.80	0.42	1.96	0.05	1.80	As 0.555	10.25	14.20

Table 2. Physical properties

	Raw ore			Roasted ore		
	True density <sup>1)</sup>	Apparent <sup>2)</sup> density	Porosity	True density <sup>1)</sup>	Apparent <sup>3)</sup> density	Porosity
Size of sample	—100mesh	2 in	—	—100mesh	15 mm	—
Roasting condition	—	—	—	500°C × 3h	450°C × 12h	—
Vancouver	4.869	4.65	4.9	4.810	4.62	3.9
Heizer	4.738	4.59	3.1	4.496	4.44	1.1
Texada	4.720	4.57	3.2	4.530	4.39	3.1
Tata	4.973	4.46	10.3	5.048	4.45	11.9
Utah	4.246	3.97	7.0	4.256	3.47	18.4
Goa A	4.606	3.48	24.5	4.245	2.72	35.9
Goa B	3.88	3.88	15.8	4.579	3.34	27.1
Wakikata	3.502	2.38	31.8	4.847	1.94	60.0

磁鉄鉱内の脈石の多少、および2種以上の酸化鉄鉱種が混合している場合の混合比は当然還元性に影響をもつので、生鉄の気孔率および外観で層別し、脈石を甚しく含まない平均的な鉄塊を試験に供するようにした。化学成分は Table 1 に示す。また物理的諸性質のうち還元性に最も大きな影響をもつものは気孔率<sup>(14)(15)</sup>なのでこれを測定した。測定法および測定値は Table 2 の如くである。

#### IV. 装置及び実験の精度

熱天秤自体の感度および精度は約1gで、100g以下の重量を1時に増減させても零点の移動は生じない。装置全体としての精度、再現性をみるため Vancouver 磁鉄鉱の4~6 mesh の試料1kg宛を30l/mnのH<sub>2</sub>で4回実験した結果は、Fig. 3で、各回とも殆んど同一曲線上にのり、十分な再現性をもっている事がわかる。N<sub>2</sub>の脱酸装置は1l/mnのN<sub>2</sub>送入量では0.1%以下迄O<sub>2</sub>が除かれ、使用後H<sub>2</sub>で還元して容易に再生さ

れる。

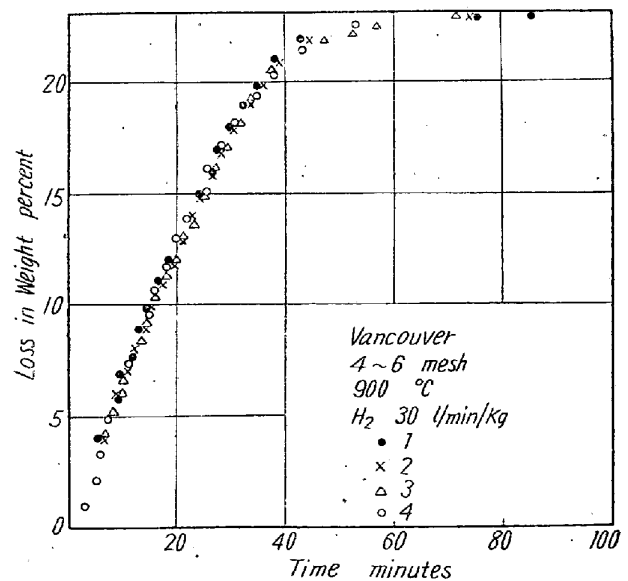


Fig. 3. Accuracy of experiment.

V. 還元率の算出

重量減または生成水量から還元率を求めるには大体 2 つの方法があり、一つは温度を 1000°C 位にあげて、ガス還元を完全に行かせたと考えられる際の重量減または水量を基準にするものと、他は還元前の試料分析値から Fe と化合している O<sub>2</sub> 量を求めて基準にするものである。前者は測定法としては精度が高いが、酸化鉄以外が還元される恐れが生じるのと、直接還元される量が知られない欠点がある。またこの装置が金属製で 1000°C 以上では試料が焼結して附着するおそれがある等を考慮して後者による事にした。Fig. 7 A 中の点線は種々の粒度の Vancouver 鉱について H<sub>2</sub> 30l/mn/kg で試験した結果である。ところが試料の粒度が大きくなると 1 回の実験に供する塊鉱数が少くなるので、前述の注意を払ってもなおその成分が平均分析値と異つてくる。それで層別した同一種の鉱石中では Fe 1g に化合している O<sub>2</sub> 量は一定であると見做し、還元後の試料の重量と Fe% から逆に還元前の O<sub>2</sub> 量を推定するように改めた。従つて還元率の算出法は次のようになる。

重量法還元率 = 還元減量 × 実減量 / 測定減量  
 × 100 / 推定 O<sub>2</sub> 量 % ..... 1)

水分法還元率 = 還元生成水量 × 空実験補正值  
 × 100 / 推定 O<sub>2</sub> 量 × 8/9 ..... 2)

推定 O<sub>2</sub> 量 = 還元後試料重量 × 還元後 Fe% / 100  
 × 平均 O<sub>2</sub>% / 平均 Fe% ..... 3)

但し 1) 式右辺第 2 項は天秤の器差の補正、平均 O<sub>2</sub>% 平均 Fe% は平均試料の分析値から求める。このようにして計算すると、Fig. 7 A の点線は実線のように改められる。

また重量法と水分法の両者で求めた還元曲線は Fig. 4 の如く殆んど一致するが、水分法の場合は装置が軟鋼製

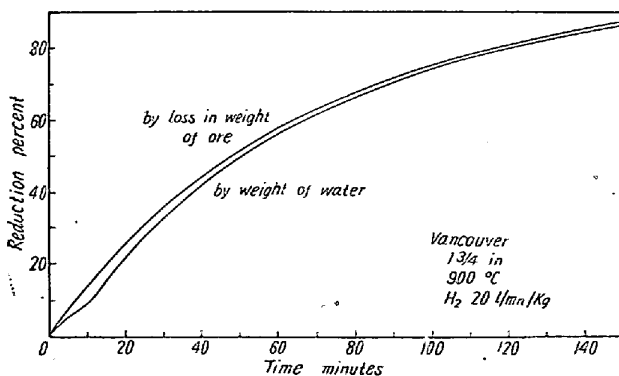


Fig. 4. Difference by calculating method of reduction degree.

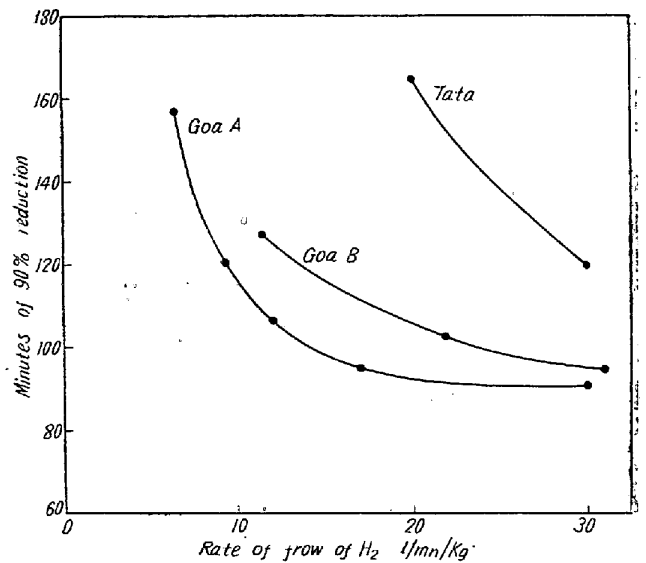


Fig. 5. Effect of rate of flow of hydrogen.

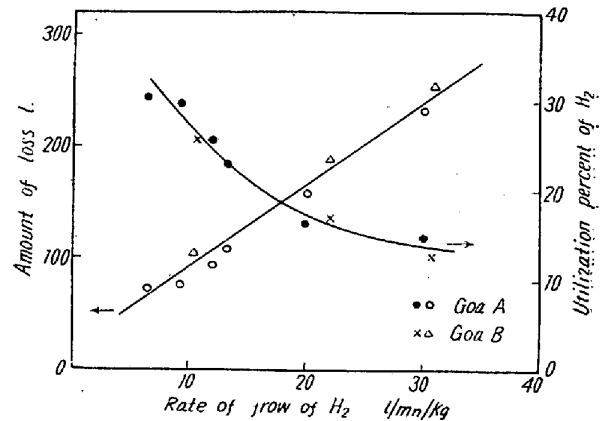


Fig. 6. Utilization of hydrogen.

のため、還元排ガスで酸化され測定値に時間的遅れを生ずるので、重量法を主にした。以下の実験結果はいずれも重量法還元率によるものである。

VI. 還元ガス量

還元ガス量は増加すれば或る程度迄還元が速くなるがそれ以上では余り効果がない。Tata, Goa A, B の 2in. 塊で H<sub>2</sub> 量をかえて実験し (Fig. 7 F, H, J) 90% 還元に必要な時間を求めると Fig. 5 の如く 20l/mn/kg 以上ではガス量の影響は少ない。一方室蘭製鉄所仲町第 1 高炉 (公称能力 700t/day) について装入物の炉内降下状態と Kinney<sup>31)</sup> の示す温度分布から、鉱石が 900 ± 50°C の間に滞留する時間を求めると<sup>32)33)</sup>、標準操業 (炉頂における降下速度 56 mm/mn) の時 113mn となるが、後述する標準鉱石の 90% 還元所要時間は H<sub>2</sub> 20l/mn/kg の時 112mn で上述の 113mn に近い。

またこのように多量の H<sub>2</sub> を使用する場合には H<sub>2</sub> の

利用率もゆるがせにできないが、90%還元する迄に送つた量と還元に使われた量を計算して利用率と損失を求めると Fig. 6 のように H<sub>2</sub> の損失量は流量に比例する。これ等を参照して H<sub>2</sub> 量は試料 1kg 当り毎分 20l と定めた。

### VII. 各種鉄鉱石の還元状態

以上に定めた還元条件で各種鉄鉱石を還元し Fig. 7 の結果を得た。還元は、磁鉄鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱の順に、

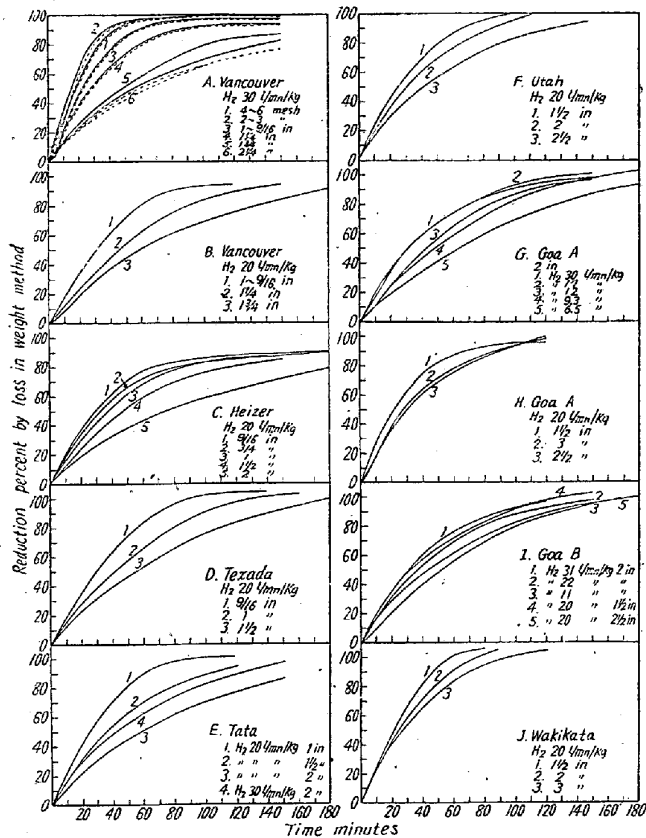


Fig. 7. Reducing curves of ores at 900°C (broken curves, without correction by amount of Fe in ore)

また気孔率の大きい程速くなつていく。磁鉄鉱は一般に還元途中で内部に緻密な Wüstite を生成するので、粒度が大きくなると急激に還元が遅くなる。特に Heizer 鉄は顕著で、熔鉄炉に装入される粒度範囲では容易に90%迄還元されない。実際の操業でもこの鉄鉱石を多量に使用すると、炉内温度の低下を生じている。この原因は結晶化が著しいためではないかと考えられるが、更に詳しく調査する予定である。Texada 鉄中には硫化鉄が溶融したため鉄石の表面に金属鉄の薄膜を生じ、内部から発生する水蒸気のためこの膜がふくれているものが認められた。脱硫は 9/16in 塊で、82.2%、1in 塊で 71.2%、

1 1/2in 塊で 62.9% 行われ、このため重量法還元率は100%を超した。磁鉄鉱では加熱還元中に生じる亀裂は、脈石にそうもの他、熱および体積変化による歪によつて生ずる大きなもので数も少なく、赤鉄鉱の場合のように細かい多数の亀裂は生じない故、これによつて還元が助けられる事は少ないと思われる。赤鉄鉱でも Tata は高品位の緻密な鉄石なので、還元途中の試料を切断してみると内部に Wüstite 層を生じている。また亀裂も表面にのみ網状に生ずるだけなので、磁鉄鉱に似て粒度が大きくなると還元が遅くなる。Utah は気孔があり、亀裂も内部迄生ずるので還元は速い。Goa B 中の層状部は特に層間での割れが著しくこれ等の鉄石では粒度と還元所要時間はほぼ直線の関係である。Goa A は気孔率高く、かつ亀裂が甚しく、3in 塊で 1 1/2 程度に碎けるものが多いので、粒度が 2in 以上になると還元速度はほぼ一定となつてしまう。Wakikata (脇方) 沼鉄鉄は気孔率が 60% にも達するので、還元は極めて早い。この鉄石は比較的割れないが、収縮が著しく、体積で約 1/3 に縮んだ。また As を含みこれが約 92% 除かれたため還元率は 100% を超した。一般に割れる鉄石は 2in 位から割れが激しいようであるが、本質的なものか実験方法によるものか不明である。還元によりできた海綿鉄は高品位の鉄石では粘く、展性を示し、低品位のものは碎け易かつたが、後者は生成した金属鉄の凝集が脈石類により妨げられるためであろう。

### VIII. 最大装入粒度の推定

このような比較的な試験結果から熔鉄炉に対する最大装入粒度を推定するには基準となるものが必要である。Joseph<sup>15)</sup> は 24% の気孔率をもつ赤鉄鉱が試験高炉では 2in 以下に碎いた時最も順調な操業を得た事を基準に 90% 還元に必要なとする時間から最大粒度を推定し、Wild<sup>14)</sup> は熔鉄炉の容積から最大粒度を 3in とし、還元への浸透速度から最大粒度を導いた。筆者等は Joseph の方法にまねた。Fig. 4 から気孔率(焙焼鉄)と 90%還元時間の関係を求めると Fig. 8 の如くなり、気孔率 24% では 90% 還元には 112mn を要するのが知られる。図中の点線は Joseph<sup>15)</sup> の求めた曲線を気孔率 24% の点で重ねたものであるが、気孔率の大きい方で異なっている。この理由は、Joseph は 6/19in の塊での実験結果から、大粒度の時の還元時間を比例的に推定しているが我々の実験によると、気孔率の大きい鉄石の還元所要時間は粒度が大きくなつても比較的増大しないのでこれが原因と考えられる。

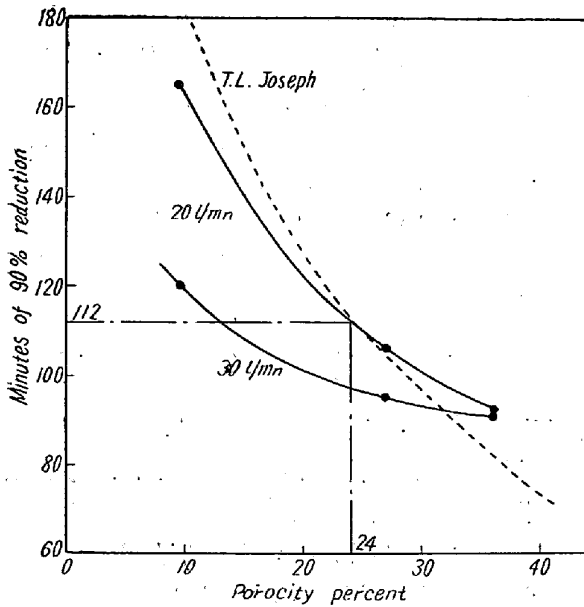


Fig. 8. Relation between porosity and time for 90% reduction of ores.

今気孔率 24% の鉱石の最大装入粒度は 2in であると仮定すると、前述の如くこの鉱石は 900°C において 20l/mn/kg の H<sub>2</sub> で 90% 還元されるのに 112mn を要するから、同一条件で他の鉱石を粒度をかえて実験し同一時間で 90% 還元する粒度を求めれば、これがその鉱石の最大装入粒度となる。(実際には端数を切捨て110mn をとつた。) Fig. 7 の曲線から粒度と 90% 還元時間の関係を求めると Fig 9 のように緻密な Wüstite を生ずる磁鉄鉱および緻密高品位の赤鉄鉱では、粒度—90%還元時間曲線は粒度の増大と共に発散の傾向を示し、気孔率が大きい、割れの著しい赤鉄鉱では収斂の傾向を示した。Texada 鉱については脱硫、Wakikata 鉱に

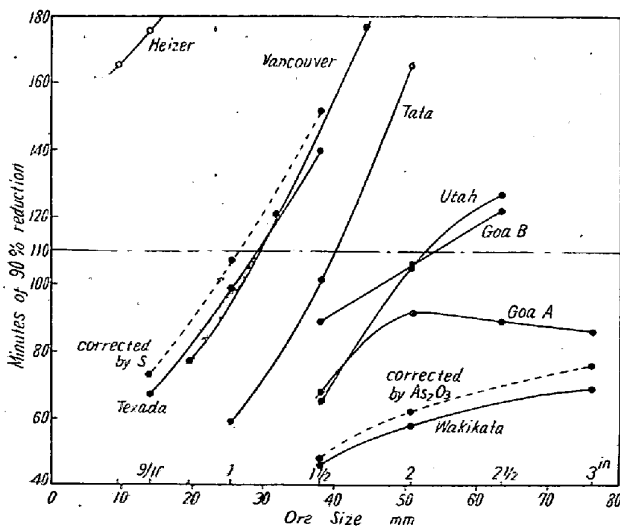


Fig. 9. Relation between size and time for 90% reduction of ores.

Table 3. Maximum size for blast furnace

Ore	Maximum size (mm)	
	By reducibility test	By porosity
Heizer	— 9	18
Texada	26	20
Vancouver	29	22
Tata	40	30
Utah	53	47
Goa A	54	56
Goa B	+75	69
Wakikata	+75	104

ついては脱砒素の影響を補正し、110mn で 90% 還元する粒度を求めると Table 3 のようになる。大別すると磁鉄鉱は25~30mm、緻密な高品位赤鉄鉱は約40mm、気孔をもち亀裂の生ずる赤鉄鉱は約50mmで、特に気孔率が高く、また割れの激しい赤鉄鉱および褐鉄鉱は、還元の際からは最大粒度の限界はなく、耐圧強度、炉の容積および他装入物の粒度との関連から最大値が定められるべきである。但し Heizer 磁鉄鉱は 25~30mm で装入するとき 85% 位しか還元されないから、他鉱石にくらべ直接還元されるべき量が2%増し、炉床温度を低下させる。これを防ぐためには 9mm 以下にせねばならないが、これは既に焼結原料の粒度であるから、このような鉱石は粉砕して焼結するか、酸化焙焼を行う等の予備処理を施すのが好ましいと考えられる。

IX. 結 言

熔鉱炉への最大装入粒度を実験室的に求める目的で、大型の熱天秤を用い各種鉱石の粒度別還元試験を行つて以下の結果を得た。

1) 供試鉱石は磁鉄鉱3種 (Vancouver, Heizer, Texada), 赤鉄鉱4種 (Tata, Utah, Goa A, B), 褐鉄鉱1種 (協方) で、これを約 1kg 宛用い、最大 3in の粒度迄実験した。

2) 還元温度は 900°C、還元ガスは鉱石 1kg 当り毎分 20l の H<sub>2</sub> を用いた。

3) 還元率は鉱石中の Fe と化合している O<sub>2</sub> 全量を 100% とし、還元中の重量減から求めた。この際試料品位の変動の影響を防ぐため、還元された鉱石中の Fe 量で補正を行つた。

4) 還元は、磁鉄鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱の順に、また気孔率が大きい程速くなつた。

5) 90%の還元に要する時間を取り、鉱石粒度との関係を求めると、磁鉄鉱および緻密な高品位の赤鉄鉱では粒度の増大と共に、粒度—還元所要時間曲線は発散の傾

向をもち、気孔率が大きい、加熱還元中に生ずる亀裂の著しい赤鉄鉱および褐鉄鉱では収斂の傾向を示した。従つて小粒度での実験から大粒度の還元時間を推定したものは異つた結果となる。

6) 気孔率 24% の鉄石の最大装入粒度は 2in と仮定し、この鉄石が 2in の粒度で 90% 還元する時間と同一時間で 90% 還元する如き他鉄石の粒度を、その鉄石の最大装入粒度とすると、磁鉄鉱は特にガス還元が悪いもの以外は 25~30mm、緻密高品位赤鉄鉱は約 40mm、気孔をもつ赤鉄鉱は約 50mm、気孔率の特に大きい、または亀裂の激しい赤鉄鉱および褐鉄鉱は、還元の際からは最大粒度は自由であるとの結論を得た。

終りに本報の発表を許可された富士製鉄株式会社室蘭製鉄所々長常務取締役佐蔵正義氏、副所長取締役伊藤正夫氏、研究所長前田元三氏に深く感謝する。

(昭和 30 年 3 月寄稿)

#### 文 献

- 1) J.M. Mcleod: Iron and Steel, 27 (1954) 145
- 2) 三本木貢治: 鉄と鋼, 33 (1947) 7~9 号, 34 (1948) 1~3 号
- 3) 長谷川熊彦, 後藤有一: 鉄と鋼, 19 (1933) 617
- 4) M. Wiberg: St u. Eisen 61 (1941) 141
- 5) J. D. Edstrom: J. Iron and Steel Inst. 175 (1953) 289
- 6) W.A. Bone, H.L. Saunders and N. Calver: J. Iron and steel Inst. 129 (1934) 33
- 7) 後藤有一: 鉄と鋼, 22 (1936) 245
- 8) M.C. Udy and C.H. Lorig: Trans. A.I.M.E. 154 (1943) 162
- 9) C.F. Ramseyer: Blast Furnace and Steel Plant 31 (1943) 156, 647
- 10) M.C. Udy and C.H. Lorig: 前出
- 11) S. E. Wood: Discussion of Faraday Society, 4 (1948) 184
- 12) A.N. Pochwisvew u. M. S. Gontscharewsky: St., u. Eisen 56 (1936) 47
- 13) 垣内富士雄, 山本純三: 鉄と鋼, 28 (1942) 5
- 14) R. Wild & H. L. Saunders: J. Iron and Steel Inst., 165 (1950) 198
- 15) T. L. Joseph: Trans. A. I. M. E. 172 (1947) 27
- 16) J. P. Lewis: Trans. A. I. M. E. 172 (1947) 27
- 17) 田所芳秋, 須賀音吉: 鉄と鋼, 28 (1942) 247
- 18) 沢村 宏: 鉄と鋼, 25 (1939) 548
- 19) 佐々木茂式: 鉄と鋼, 40 (1953) 3
- 20) 中村信夫: 鉄と鋼, 39 (1953) 943
- 21) E. Diepschlag: Archiv f. Eisenhüttenwesen, 10 (1936) 179
- 22) M. Tenenbaum & T. L. Joseph: Trans. A. I. M. E. 140 (1940) 106
- 23) L. F. Marek, A Bogrow and G. W. King: Trans. A.I.M.E. 172 (1947) 46
- 24) 小沢重明: 鉄と鋼, 6 (1920) 269
- 25) 沢村 宏: 鉄と鋼, 22 (1936) 121
- 26) W. A. Bone, L. Reeve and H.L. Saunders: J. Iron and Steel Inst. 115 (1927) 125, 121 (1936) 35
- 27) W. A. Bone, H. L. Saunders and H. J. Tress: J. Iron and Steel Inst. 137 (1938) 85
- 28) 池上平治: 鉄と鋼, 32 (1946) 2
- 29) 佐々木茂式, 安達春雄: 鉄と鋼, 39 (1953) 1221
- 30) G. Bitsianes & T. L. Joseph: J. of Metals, 5 (1953) 1641, 6 (1954) 150
- 31) S.P. Kinney: U.S. Bur. Mines, Tech. Paper, 442 (1929) 34
- 32) T. L. Joseph H. M. Beatty and Gust Bitsianes: Trans. A.I.M.E. 154 (1943) 148
- 33) 中長 長久, 池野輝夫, 萩原友郎: 富士技報, 3 (1954) 130