

技術報告

流動層による石炭ガス化-鉄鉱石還元
プロセスの開発堀 江 徹 男*・清 水 信*²Development of Coal Gasification-Iron Ore Reduction Process
by Fluidized Bed

Tetsuo HORIE and Makoto SHIMIZU

Synopsis:

This study was made to investigate a process in which the gasification of coal and the reduction of iron ore took place simultaneously in a reactor. Fluidized bed was selected for the type of reactor from preliminary study on reduction time at 800°C.

The result obtained from the tests using hydrogen gas, mixed gas and recirculating gas with 100 mm inner diameter reactor are as follows.

1) Metallization more than 90% can be achieved at reaction temperature above 920°C with mean resident time above 10 minutes.

2) Metallization is affected with the ratio of half the number of hydrogen atoms as a form of hydrogen, moisture and hydro-carbon contained in gasses, ore and reductant supplied to the reactor and the total number of iron atoms contained in ore, since in this process there are always solid carbons such as char in the reactor. The molar ratio of the hydrogen/Iron is to be preferably more than 4.

3) Coking coal which tend to cause sintering is also usable provided that more active fluidization or rapid gasification is maintained.

Key words: direct reduction; fine ore; iron ore; fluidized bed reduction; coal gasification.

1. 緒 言

石油あるいは天然ガス資源に恵まれないが、低品質ながら石炭と鉄鉱資源が豊富で、いまだ鉄鋼需要の小さい地域を対象とし、石炭のガス化と同時に粉鉱を還元する小規模な 50 ないし 300 t/日程度の鉄鉱石還元炉の開発をめざしている。従つてエネルギー源の石炭は、低品位ながら低廉に入手可能なものと仮定し、金属化率 90% 以上の還元鉄製造を目標としている。

この研究は、(1) 文献調査と推算にもとづく反応炉形式の選定と可能性の検討、および実験条件の選定、(2) 流動化ガスをボンベから供給し、操業と金属化率達成の確認を行うベンチスケールテスト、(3) 種々の混合ガスを供給し、滞留時間と石炭の溶融による流動層への影響を調べる混合ガステスト、(4) 反応管排ガスを処理し CO₂ や H₂O を除去した後、反応層の流動化ガスとして使用する循環テストの四段階にわかれている。

2. 事 前 検 討

2.1 還元時間

球形粒子を想定し、この球形粒子が粒子周囲のガスに還元されると仮定した場合に、単位時間当たりの粒子表面ガス境界膜におけるガス拡散量と、粒子表面より粒内反応界面までのガス拡散量と、反応界面において酸化鉄と反応するガス量が等しく、それぞれ次のような式で表すことができる。

(1) 粒子表面ガス境界膜ガス拡散量

$$\frac{dH}{d\theta} = 4\pi r_0^2 k_f (C - C_1)$$

(2) 粒内ガス拡散量

$$\begin{aligned} \frac{dH}{d\theta} &= k_p \int_{r_1}^{r_0} dC / \int_{r_1}^{r_0} \frac{dr}{4\pi r^2 \epsilon_p} \\ &= \frac{4\pi k_p (C_1 - C_2) r_0 r_i \epsilon_p}{r_0 - r_i} \end{aligned}$$

昭和 61 年 3 月 11 日受付 (Received Mar. 11, 1986)

* 石川島播磨重工業(株)工業炉環境装置事業部 (Iron and Steel Plant Environmental Control Equipment Division, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 2-2-1 Otemachi Chiyoda-ku, Tokyo 100)

*2 石川島播磨重工業(株)技術研究所 (Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

(3) 反応界面ガス反応量

$$\frac{dH}{d\theta} = 4\pi r_i^2 k (C_2 - C_{eri})$$

以上の三式に

(1) H_2 および CO ガスの鉄鉱石還元反応における粒子周囲ガス濃度と、反応ガス収支と平衡定数とより求める式

$$C_{eri} = C_e \left(1 + \frac{1}{K}\right) - \frac{C_2}{K}$$

(2) 反応界面における微小時間で微小区間での反応容積と単位容積当たりの反応ガス量の関係,

$$\frac{dH}{d\theta} = (4\pi r_i^2 \cdot dr_i) \alpha / d\theta$$

(3) 還元率と反応界面半径と粒子半径との関係,

$$f = 1 - r_i^3 / r_0^3$$

以上の関係を導入すると、反応時間と還元率の関係が次式として求まる。

$$\theta = \frac{\alpha D}{2(C - C_e)} \left[\frac{f}{3h_r} + \frac{D\{3-2f-3(1-f)^{2/3}\}}{12k\rho\varepsilon_p} + \frac{\{1-(1-f)^{1/3}\}}{k(1+1/K)} \right]$$

この還元時間推算式にガス拡散係数¹⁾、境膜ガス拡散係数^{2)~4)}、粒内ガス拡散係数⁵⁾、反応係数⁶⁾などの文献値を参考として用い計算した結果、1 mm 粒径の鉄鉱石を 800°C で金属化率 90% 以上に還元する場合の所要時間は約 20 min となり、セメントプラントで利用されている数秒の反応時間しか期待できない気流炉方式を採用した場合、実機では経済的に実現困難な数 μm 以下の粒径にすることが必要となる。このため、反応炉形式には流動層を採用することに決定した。

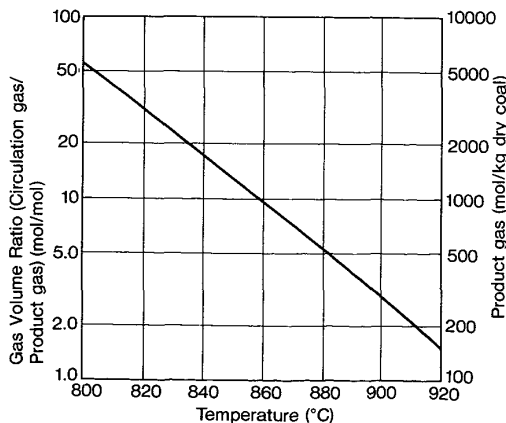


Fig. 1. Relation between circulation gas and product gas.

2.2 循環ガスに関する推算

金属化率を約 92%, 石炭と鉱石の供給重量比を 3:7, 排ガス組成は平衡状態となり, 炭化水素は CH_4 になるものと仮定して, 反応炉排ガスを処理し, 反応炉下部へ流動化ガスとして供給した場合のガスについての推算を行い次の結果を得た。

(1) 空気を供給して部分燃焼させ反応熱を供給した場合には, N_2 の除去が不可能なため循環ガス量が多くなり, 反応炉直径が大きくなりすぎる。従つて酸素を使用するか間接加熱とする必要があり, 前者では酸素プラントを, 後者には発電プラントを設置するとか, 供給ガスと鉱石の高温予熱を行うなどの選択になる。

(2) 排ガスを無処理で循環させると, 排ガス組成を還元状態に維持するために石炭を多量に必要とする。従つて除湿と脱炭酸が循環ガス量減少のために必要となる。ガス循環中の C 折出防止のためには, 改質炉を設け, CO を H_2 に置換させた方が好ましいが, 設備費上昇を招く。

(3) 反応温度を 800°C とした場合の循環ガス量は Fig. 1 に示すように, 発生ガス量の約 50 倍になるのに対し, 850°C では 12 ないし 13 倍と高温になるほど P_{H_2O}/P_{H_2} 平衡値が小さくなり循環ガス量が減少する。石炭灰の熔融温度を考慮し, 反応温度を 850 ないし 950°C とする。

3. 実験方法

3.1 供試材

Table 1 に示す四種類の外国産ヘマタイトを入手し, 粒砕後, 0.25 mm と 1 mm のふるいを使用し Fig. 2 に示す粒度分布とした。これに対し, 石炭は 1 mm と 2.4 mm のふるいをを用い Fig. 3 の粒度分布として使用し, 実験後の還元鉄とチャーを分別しやすくしている。石炭は Table 2 に示す国内産褐炭 T1~T4 と, 外国産の強粘結炭 S1~S3 および弱粘結炭 R32 と R54, それに国内産雑木木炭を粉碎して使用している。褐炭は炭化度の低い入手の容易な石炭例として用い, 実験が長期間にわたって実施されたため, 鉱石と同様, 四種類となつている。強粘結炭の S1 は原料炭として選炭されたものである。

Table 1. Analysis of iron ores used.

Kind of ores	Total Fe (%)	Carbon (%)	Moisture (%)	Gangue (%)	Specific gravity (g/cc)
M1	66.2	0.06	0.09	5.51	5.02
M2	68.4	0.05	0.07	4.57	5.09
M3	63.3	0.06	0.19	9.82	4.64
M4	69.8	0.03	0.02	3.27	5.11

Table 2. Analysis of reductants used.

Kind of reductants	Calorific values (kcal/kg)	Fixed carbon (%)	Volatile matters (%)	Moisture (%)	Ash (%)	S (%)	Composition analysis (%)		
							C	H	N
Coal T1	6350	37.7	45.0	5.75	11.5	0.29	64.7	5.4	1.2
Coal T2	5410	33.1	39.8	5.48	21.6	0.26	—	—	—
Coal T3	6200	36.6	45.9	4.60	12.9	0.25	64.0	5.4	1.0
Coal T4	6290	36.4	47.1	4.57	11.9	0.23	67.0	5.6	1.0
Coal S1	6690	49.5	33.4	0.23	17.0	2.12	—	—	—
Coal S2	5690	42.7	27.2	0.60	29.5	2.08	—	—	—
Coal S3	4590	33.6	24.0	1.08	41.4	2.36	—	—	—
Coal R32	4470	35.2	25.8	7.5	31.5	0.80	50.3	3.4	0.8
Coal R54	2420	19.2	18.5	3.7	58.6	2.9	25.5	2.3	0.4
Charcoal	7330	80.0	12.8	5.60	1.6	<0.05	87.0	2.8	0.3

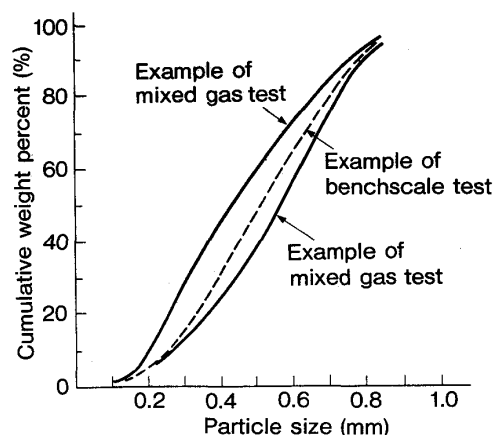


Fig. 2. Particle size distribution of iron ores.

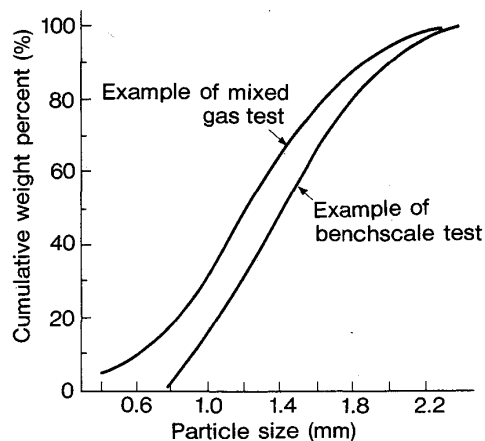


Fig. 3. Particle size distribution of coals.

るが、S2は選炭前の未選炭、S3は選炭残渣の廃却品利用を考え使用してみた。弱粘結炭のR32とR54は灰分の多い場合における流動層への影響を調べるために使用し、R54の灰分は58.6%と非常に高い。従つて熱収支と石炭価格の比較において実機での利用の可否がきめられる。木炭は森林資源利用の可能性を確認するために使用している。

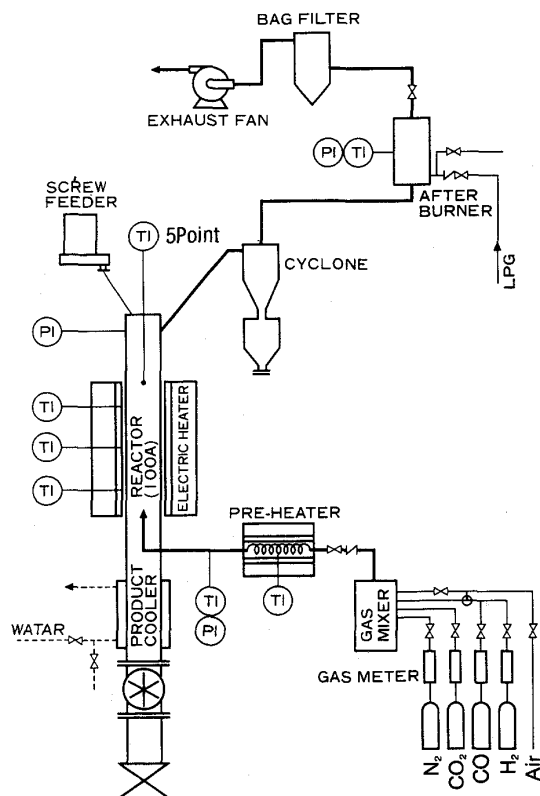


Fig. 4. Flow diagram of benchscale test apparatus.

3.2 実験装置

3.2.1 ベンチスケールテスト装置

Fig. 4に示すように、ボンベより H_2 、 CO 、 CO_2 、 N_2 などのガスを流量計、混合室と通し、有効高さ700mmの100A・Sch40・SUS316反応管下部に供給し、流動化ガスとして上昇させ、反応管上部よりサイクロンへと導き、除塵後、アフターバーナーで焼却している。鉬石と石炭は上部ホッパーよりスクリーフィーダーで連続定量供給し、反応後の還元鉄とチャーは反応管下部のロータリーバルブより流動層圧損を所定値に保つ速度に調整しつつ排出した。また高さ方向に位置を変えた5本以上の熱電対を反応管上部より挿入し、三分割配線とし

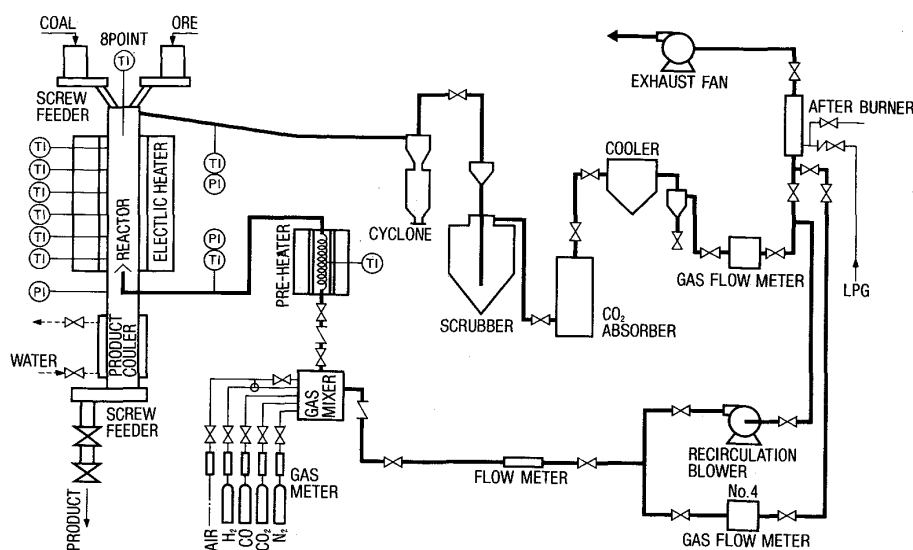


Fig. 5. Flow diagram of gas recirculating test apparatus.

た電気炉で流動層を $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に制御した。反応管上部のフリーボードにはガスサンプリング用のノズルを設置している。

3・2・2 混合ガステスト装置

Fig. 4 のベンチスケールテスト装置を次の改造を行い使用している。

(1) 反応管の有効高さを 700 mm より 1400 mm に大きくし、流動層高を大きくとれるようにした。

(2) 反応管下部の排出機をロータリーバルブよりスクリュースチャージャーに変更し、管下部の気密性を向上させた。

(3) 反応管排気ダクトを下向き傾斜とし、ダスト閉塞に備えた。

(4) 反応管排気口に向けて蒸気を吹き付けるための吹込みノズルを設置し、カーボン沈積に対処可能とした。

3・2・3 循環テスト装置

混合ガステスト装置に次の改造を行い Fig. 5 の装置を完成させた。

(1) リサイクルガス配管の設置

(2) 反応管下部ガス供給管に、ガスサンプリングノズル、蒸気供給管および微粉炭または微粉鉄吹込み管を設けた。

(3) 反応管排ガスは、Fig. 5 のフローシートに示すように除塵後、NaOH 水溶液による吸収塔とガスを 5°C 以下に冷却するクーラーを通し、 CO_2 と H_2O を除去したあとガスメーターで流量を測定し、一部をアフターバーナーで焼却し、残部は反応管に供給される。

3・3 金属化率簡易判定法と流動化状態の判定

使用鉄鉱石別に比重と金属化率の関係をグラフとして置き、反応管排出品を 1 mm ふるいで分別したあと軽く粉碎し、磁石で還元鉄とチャーを分離し、He を使用したガス比較式比重計で測定し、金属化率を求め、次の実験方針を定める簡易判定法として利用した。

流動化風量の少ない穏やかな流動状態の場合とか、強粘結炭を使用した場合などに生ずる流動化不良は、流動層下部とフリーボードの圧力差変動を記録させ、変動振幅の減少および周期の長くなることの両方より検知した。

4. 実験結果と考察

4・1 ベンチスケールテスト

流動化ガスに水素を使用し、流量を $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ として 920°C にすると反応管内空塔風速は約 60 cm/s となる。鉄鉱石が還元され見掛け比重が 3.7 g/cc になるとして計算すると、粒子の流動化開始速度直径は約 0.7 mm となり、粒径差による滞留時間差が生じ、金属化率も大粒子では極端に低くなっていることが懸念される。実験で得た還元鉄を炭材と分別した後 0.5 mm のふるいで分別し、ふるい下と上との金属化率を調べるため、真比重を比較してみた。しかし、Fig. 6 にみられるように、両者に差が認められない。

最初、鉄鉱石のみを水素で流動化し昇温してみたが約 600°C で焼結した。ついで、直径 1 ないし 2 mm の重質油熱分解残渣のフルイドコークスと鉄鉱石を供給し、水素 $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ で流動化し、 950°C まで焼結せずに昇温す

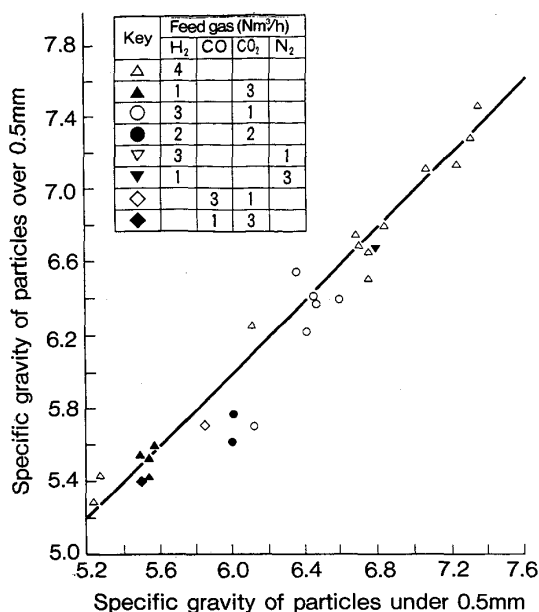


Fig. 6. Relation of particle sizes to specific gravity of sponge irons at benchscale test.

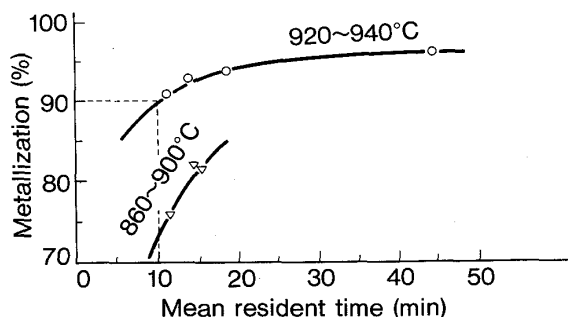


Fig. 7. Effects of fluidized bed temperatures and mean resident times on metallization of sponge irons at benchscale test at 4 Nm³/h of H₂ and 0.667 kg/kg ratio of coal and iron ore.

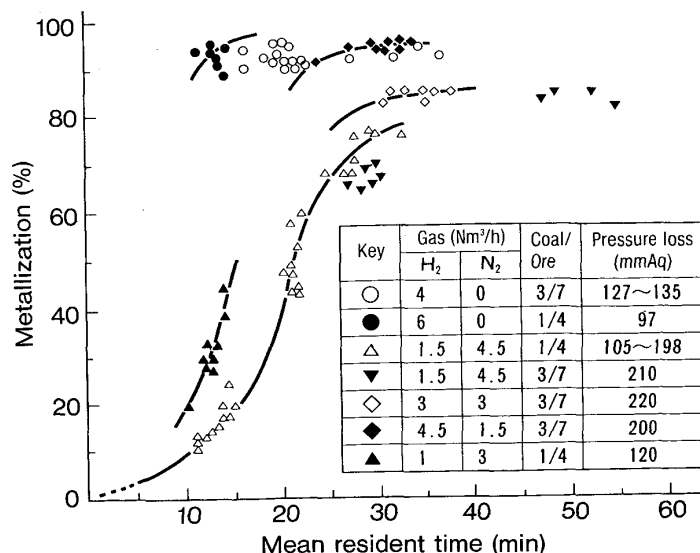


Fig. 8. Effect of mean resident times to metallization at mixed gas test.

ることができたが、金属化率は 75% 以下であつた。

石炭と鉄鉱石の重量比を 1:3 として流動層上部より供給し、4 Nm³/h の水素流量で実験したところ、Fig. 7 の結果が得られた。すなわち、鉱石と石炭を同時に供給することにより、鉱石近傍で石炭の分解が生じ、反応性に富んだ水素の生成や鉱石表面でのカーボンの折出が生じ、平均滞留時間を 10 min 以上とし、還元温度を 920°C 以上とすることにより金属化率 90% 以上が得られる。

4.2 混合ガステスト

水素 100% の流動化ガスを供給し、920°C の反応温度と 10 min 以上の滞留時間で金属化率 90% 以上が得られることを確認した後、還元温度を 920°C の一定とし、水素と窒素の混合ガスを供給し、平均滞留時間と金属化率の関係を調べ Fig. 8 に結果を示している。この図では、供給ガス中の水素含有量が多くなると金属化率も高くなり、90% 以上の金属化率を得るためには水素を 75% 以上にすることが必要と思われる。また、水素が同じ 25% であっても、供給風量 6 Nm³/h より 4 Nm³/h の方が短い滞留時間で高い金属化率が得られており、ガス滞留時間の影響というよりは流動層が穏やかになり、石炭の気化ガスと鉱石の接触が良好になるためと考えた方が妥当である。

強粘結炭は流動化不良を起こしやすいといわれており、Table 2 に示す記号 S1 や S2 の原料炭と未選炭を使用し次のような結果が得られた。

(1) 供給ガス流量を 6 Nm³/h とし、石炭と鉄鉱石の供給重量比を 4:6 とし合計 6.5 kg/h で供給した場合、反応温度が 920°C と 850°C の両者とも流動化不良とな

つた。

(2) 石炭と鉱石の重量比を 3:7 とし、しかも供給合計量を 3.1 kg/h に少なくしてみたが、改善されなかった。

(3) 供給風量を 6 Nm³/h より 9 Nm³/h に増加したところ、流動状態が良好となり実験可能となった。しかも反応温度 900°C より 930°C の方が活発な流動層が得られた。

(4) 供給風量を 9 Nm³/h、反応温度を 920°C とし、石炭供給量を増加していくと流動状態が悪化してくるが、風量を 11 Nm³/h とすると、通常石炭と鉱石比 4:6 で 6 kg/h 供給しても良好な流動層となつたが、飛散が激しくダクト閉塞を生じた。

(5) 石炭粒径を 1 ないし 2.4 mm より 0.5 ないし 1.4 mm と小さくすることにより風量 6 Nm³/h、温度 920°C、石炭と鉱石重量比 4:6 で 6 kg/h 供給しても流動層は良好であつた。

以上をまとめると、反応管風速を大きくしたり粒子直径を小さくし活発な流動層にすると、石炭粒径を小さくしたり反応温度を高くし石炭のガス化時間を短くすることにより、強粘結炭でも使用可能であることが確認された。

4.3 循環テスト

4.3.1 循環ガス中の水蒸気含有量の影響

褐炭を使用し、流動層下部へ吹き込む循環ガス中の水蒸気含有量を変えて実験した Fig. 9 の結果では、石炭を微粉として流動下部へ吹き込んだ場合に低い金属化率を示している以外、平均滞留時間によつて金属化率が変化し、供給ガス中の水蒸気には金属化率が影響されてい

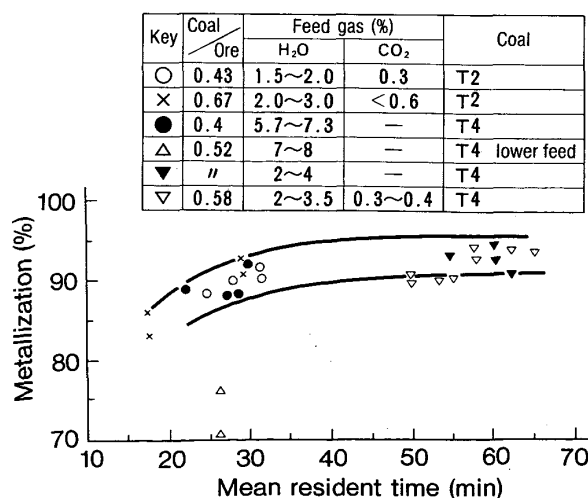


Fig. 9. Results of recirculating gas test with high volatile bituminous.

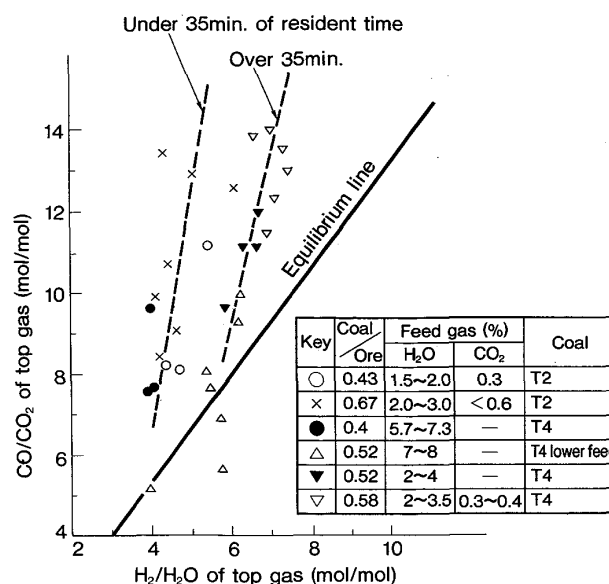


Fig. 10. Results of recirculating gas test with high volatile bituminous.

ない。流動層には、炭素を含むチャーが多量に存在し、H₂O が C と反応し H₂ と CO に変化するためである。一方、排気中の CO/CO₂ と H₂/H₂O を調べてみると、Fig. 10 に示すように平衡線より CO/CO₂ の大きい値の方へずれており、H₂ による還元の方が優先的に進行していることを示している。しかし、石炭を流動層下部へ吹き込んだり平均滞留時間を長くすると平衡値へ近づくようになる。またベンチスケールテストや混合ガステストに比べ、短い滞留時間で低い金属化率を示しているのは、流動層下部へ供給される循環ガス中に CO が 35 ないし 45% 含まれ、H₂ が 45 ないし 55% と低くなっているためであり、この滞留時間では CO による還元が望めないことを示している。

4.3.2 炭種比較

炭種による影響を調べると、Fig. 11 に示されているように、滞留時間が長い場合には同じ金属化率を示すが、短い場合には褐炭の方が高い金属化率を示している。また、供給ガスと石炭中に含まれる全水素を H₂ モル数に換算し、供給鉱石中の全 Fe モル数との比を水素比、供給石炭中に含まれる全炭素を C モル数に全水素を H₂ モル数に換算し両者の和と、供給鉱石中の全 Fe 数との比を石炭比とし、鉱石に対する還元力を水素比および石炭比として金属化率との関係を調べると Fig. 12 の結果となり、石炭比と金属化率には炭種の影響がみられるのに対し、水素比と金属化率には炭種の影響がみられず、金属化率を確実に 90% 以上とするためには Fig. 12 のプロットより水素比 7.5 以上が必要となつている。しか

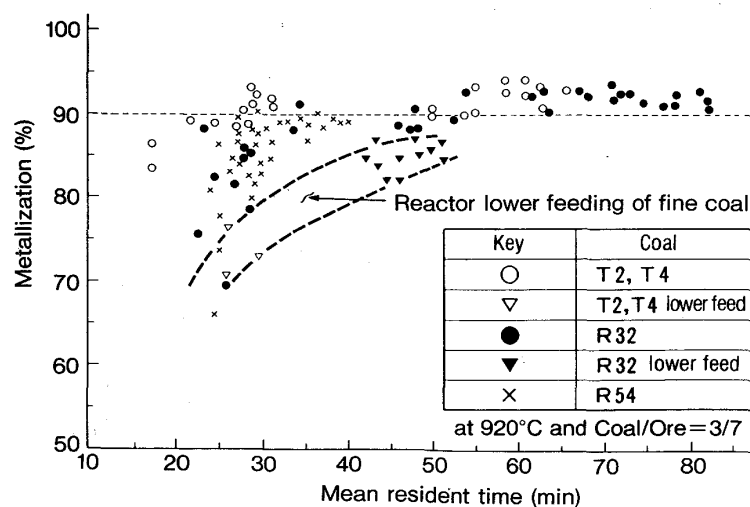


Fig. 11. Effect of mean resident times to metallization with various kind of coals at recirculating gas test.

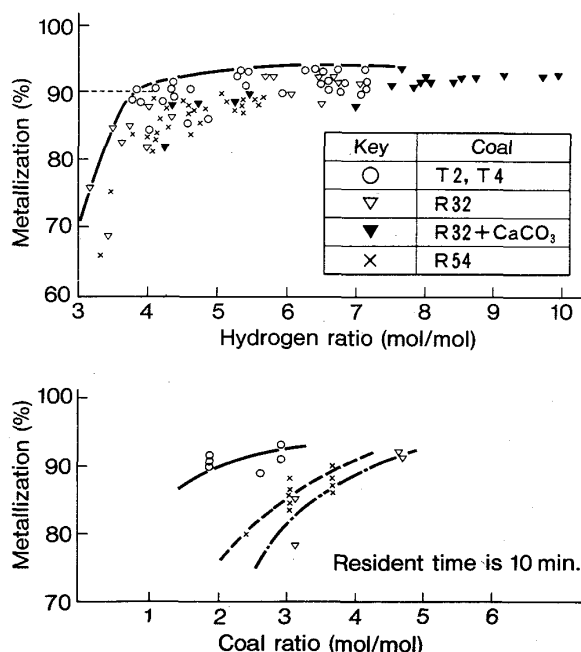


Fig. 12. Relation between metallizations and hydrogen ratio and coal ratio. Hydrogen ratio is sum of hydrogen as H₂ contained coal and gas feeded. Coal ratio is sum of C and hydrogen as H₂ contained in coal feeded.

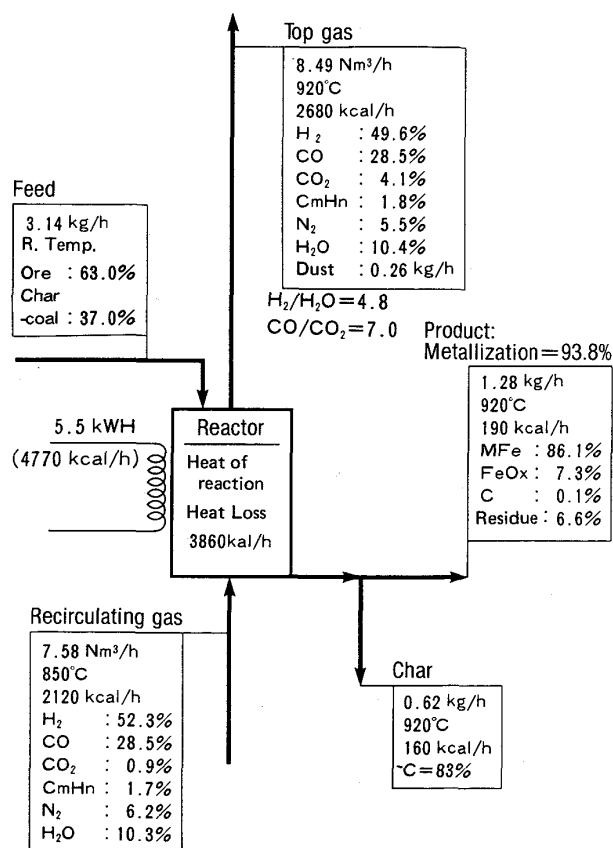


Fig. 13. Material and heat balance of experimental work with charcoal.

し、この実験では流動層直径が約 100 mm と小さく、しかも流動層高が直径の 3 ないし 4 倍にも達し、スラッシングが激しくガスと粒子との接触が悪くなっているが、直径がより大きくなる実プラントの炉では滞留時間確保のために必要な流動層高さとしてもスラッシングを起こさず、ガスと鉱石の接触状態が良好となるため、実線で示した水素比と金属化率の関係になると考えられ、水素比 4 で金属化率 90% が得られると推測される。また石炭のガス化により発生した反応力の強い水素と鉱石の接

触時間を大きくするため Fig. 11 において微粉炭を流動層下部に吹き込んだ実験を行つたが、スラッシングが原因となつて低い金属化率しか得られなかつた。実機では直径が大きくなりスラッシングは発生しない設計とできるため流動層上下両方より石炭を供給する方法で、反応力の強い石炭ガス化直後発生した水素と鉱石との接触機

会を多くできると考えている。

Fig. 12 の石炭比と金属化率の関係に対する炭種の影響を比較すると、弱粘結炭同志では灰分の多い R54 を使用したときの金属化率の方が、灰分のより少ない R32 より大きいような傾向もみせており、灰分量には金属化率が影響されないようである。また、炭化度の若い褐炭の方が高い金属化率を得ていることから、草炭あるいは乾燥木材も還元剤として可能性をもっていることがうかがえる。

4.3.3 木炭の利用

木炭には水素がほとんど含まれていないが、Fig. 13 の物質・熱収支結果にみられるように、供給循環ガス中の水分を高くして供給することにより金属化率 93.8% が得られ、排ガス中の $(\text{H}_2 \cdot \text{CO}_2) / (\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O})$ の値も 0.69 と平衡値に近くなっている。この図の結果は、還元剤が C のみであつても供給ガス中の水分を高くすることにより水素比を高め、水分と炭素の反応により水素を生成させ還元反応を進行させることが可能なことを示している。木炭には揮発分がほとんどないため、木炭からの水素発生が流動層上部で発生していないことと、木炭は石炭より反応性の高い C を有し、 H_2O との反応性が高いことより、排ガス組成が平衡値に近い値となつていると考えられる。

5. 結 論

流動層に石炭と鉄鉱石を同時に供給し、ガス化と還元を同時に行わせ次の結果をえた。

(1) 還元温度が高いほど短い滞留時間で金属化率が高くなり、水素 100% の供給ガスの場合に 920°C , 10 min 以上で 90% 以上の金属化率が得られる。

(2) 反応排気中の CO_2 と H_2O の一部を除去し、流動化ガスとして反応層へ供給する循環ガス試験では、反応排ガス中の $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ と CO/CO_2 の値は、 $(\text{H}_2 \cdot \text{CO}_2) / (\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CO})$ の平衡値に対し CO/CO_2 の大きい値のほうへずれていた。しかし、滞留時間を大きくしたり、石炭を微粉として流動層下部へ供給すると平衡へ近づく傾向を示した。

(3) このプロセスでは、固体炭素が十分に存在する反応条件下で操業されるため、水素原子供給量が金属化率を高める重要因子となる。金属化率 90% 以上を得るには、供給ガスや石炭から供給される水素や水分、炭化水素の水素を H_2 に換算した H_2 と鉄鉱石から供給される鉄分とのモル比を約 7.5 とすることが必要であつた。しかし、流動層直径が大きくなりスラギングが発生しない流動状態とし、ガスと粒子の接触状態が良くなれば約

4 倍のモル比となる可能性を示している。

(4) 炭化度の若い揮発分の多い石炭ほど水素が多くなり還元剤として適しており、木材の利用も考えられる。灰分の高低は金属化率に影響しない。

(5) 強粘結炭は流動化不良を起こしやすい。しかし流動化風速を大きくしたり、粒子直径を小さくしたり、反応温度を高くすることにより対処可能である。すなわち流動層を活発にすると、石炭のガス化時間を短縮する操作条件とすることにより強粘結炭も使用可能となる。

(6) H の少ない石炭を使用する場合には、供給ガス中の水蒸気量を多くすることが必要である。木炭はほとんど H を含まないが、活性度が高く水蒸気と反応しやすい C で構成され、良い還元剤といえる。

なお、本プロセスは金属鉄製造プロセスとしても有効な手段であるが、その他にも種々の利用が考えられる。例えば最近注目されている溶融還元法における、その予備還元部分にも利用できる。すなわち、溶融還元炉生成ガスを利用して本プロセスで粉鉄を流動還元する、本法 + 溶融還元炉の組合せも十分現実的なプロセスと考えられる。それらの点については今後の検討課題としたい。

記 号

- C: 還元ガス濃度 (mol/cm^3)
- C_e : 還元ガス反応平衡濃度 (mol/cm^3)
- C_1, C_2 : 粒子表面及び反応界面での還元ガス濃度 (mol/cm^3)
- C_{eri} : 粒内反応界面での還元ガス反応平衡濃度 (mol/cm^2)
- D: 粒径 (cm)
- f: 還元率
- H: ガス反応量 (cm^3)
- K: $\frac{\text{生成ガス反応平衡濃度}}{\text{還元ガス反応平衡濃度}} \left(\frac{\text{mol}}{\text{mol}} \right)$
- k: 反応速度係数 (cm/s)
- k_f : 境界膜ガス拡散係数 (cm/s)
- k_p : 粒内ガス拡散係数 (cm/s)
- r_0 : 粒子半径 (cm)
- r_i : 反応界面半径 (cm)
- α : 粒子単位容積当たり反応ガス量 (mol/cm^3)
- ϵ_p : 粒内還元層空隙率 (cm^3/cm^3)
- θ : 還元時間 (s)

文 献

- 1) 佐藤一雄: 物性定数推算法 (1962) [丸善]
- 2) W.E.RANTZ and W.R.MARSHALL: Chemical Engineering Progress, **48** (1952), p. 141
- 3) 井伊谷鋼一: 粉体工学ハンドブック (1965) [朝倉書店]
- 4) 高橋礼二郎, 八木順一郎, 大森康男: 選研彙報, **27** (1971) 12, p. 173
- 5) 高橋礼二郎, 八木順一郎, 大森康男: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 1597
- 6) 宮下恒雄, 西巻活明, 下間照男, 山田健夫, 大槻 満: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 608