

UDC 622.341.1-492 : 669.094.1/.2 : 669.181 : 66.096.5

## 論 文

## 鼓胴型回転流動層による粉鉱の向流還元\*

天辰 正義\*\*・高本 泰\*\*\*・相馬 胤和\*\*

## Countercurrent Reduction of Powder Ore in a Drum-type Rotary Fluidized Bed

Masayoshi AMATATSU, Yasushi TAKAMOTO, and Tanekazu SÔMA

## Synopsis :

In order to increase the gas utilization coefficient and to prohibit the sintering phenomena in fluidized bed, the experiments of the countercurrent reduction of powder ore with CO gas in a drum-type rotary fluidized bed at the temperature of 900°C and 750°C were carried out.

In a modelling vessel (diameter : 30 cm), the rotary fluidized state could be obtained on the conditions that the filling ratio of powder ore was in the range of 30 to 50% and the dimensionless rotary speed ( $F$ ) was 1.0 to 1.2.

The motion of powder ore in the drum-type rotary fluidized bed was seemed to be a completely mixing state. The gas utilization coefficient was maximum under the condition that  $F$  was 1.0, and it could be increased up to the stoichiometric equilibrium concentration for the reduction of ore. The results of a mathematical calculation on dimensionless numbers ( $Gc$  and  $Ot$ ) for countercurrent reduction based on the three-interface model were in good agreement with observed data.

## 1. 緒 言

現在の鉄鋼製造技術の主流は高炉-転炉法であることは周知のとおりである。しかし、鉄鋼一貫工場の設備が巨大化したことおよびエネルギー需給事情の悪化などの諸問題と結びついて、天然ガス等の還元材の安価な地域では新製鉄法いわゆる直接製鉄法あるいは直接還元法の技術開発が指向されている。

各種の還元鉄製造技術の現状について総説<sup>1)2)</sup> および各論<sup>3)4)</sup> の報告がなされている。それによれば、各種の還元鉄製造法はエネルギー源の拡大と技術の改善によつてかなりの進歩をみているが、高炉法と共存ないし代替するプロセスとしては克服すべき問題点が多いとされている。

本研究で対象としている流動層還元法の還元鉄製造技術については近藤による総説<sup>5)</sup> がある。流動層法による還元鉄製造法の利点は、粉鉄鉱石の比表面積が大きく、したがって反応速度が大きいことおよび連続操作が容易であることにある。しかし、堅型流動層内では多量のガスが気泡の形で吹き抜けるため反応効率の低下および還

元鉄の凝集・焼結現象による反応条件の制約がある。したがって、流動層還元法ではガス利用率の向上ならびに焼結現象の防止が最も重要な課題となつている。

ガス利用率の向上に関する研究では、堅型流動層の多段化<sup>6)7)</sup> および流動層内に分割板を設けることによる多段多室化<sup>8)~10)</sup> ならびに粉鉱の循環<sup>11)</sup> によつて、ガスと粉鉱石の流れを可能な限り向流操作にもつていくことがなされている。流動層内に充填物構造の設置<sup>12)</sup> およびガス分散板のグリッド形状への改良<sup>13)</sup> によつて気泡の分散効果が認められ、還元ガスと鉄鉱石粒子の接触効率が改善されている。

一方、流動層還元では焼結現象の防止が課題の一つである。焼結防止対策として、流動層内に攪拌機<sup>14)</sup> および回転板<sup>15)</sup> を設置する方法および異物質を装入する方法<sup>16)~18)</sup> が報告されている。

相馬は回転炉において粉鉱の還元実験を行つた<sup>19)~22)</sup> すなわち、反応器を水平に対してわずかに傾斜させ、それを回転させることによつて粒子に働く遠心力と重力が釣り合うときに、回転流動状態を形成することができる。この回転流動状態では、粉鉱石と還元ガスの接触が

\* 昭和 52 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 4 月 11 日 (Received Apr. 11, 1980)

\*\* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

\*\*\* 東京大学大学院 (現:新日本製鉄(株)) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Nippon Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition of iron ore (wt%).

| T.Fe | FeO  | SiO <sub>2</sub> | MgO  | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S     | C.W. | Moist. | O*   |
|------|------|------------------|------|------|--------------------------------|-------|------|--------|------|
| 62.3 | 0.07 | 5.54             | 0.05 | 0.03 | 2.90                           | 0.001 | 2.0  | 3.9    | 26.8 |

O\*: Combined oxygen with iron, Mt. Newman ( $D_p$ : 0.71-1.00 mm)

良好でありガス利用率が高くかつ焼結の防止が可能である。したがって、反応器を一定の速度で回転させると粉鉱は流動状態を形成するので、その目的にはガスの運動エネルギーを必要としない。しかもシャフト炉の特長である鉱石とガスの流れの向流操作が可能であり、還元ガスの利用効率をシャフト炉のそれに近づけることも可能である。

回転流動層におけるこれまでの還元実験では、ストレート反応管内に堰を設け、粉鉱石の向流還元実験を行なった<sup>19)~22)</sup>。これらの実験では反応器内に滞在する鉱石量が堰の絞り形状に大きく依存し、必ずしも安定しなかった。

本研究では、反応帯における鉱石の滞在量を確保するために、ドラム状にふくらませた反応帯とその両側に鉱石・還元鉄の装入・排出のための軸管とからなる反応器を製作し、この反応器を水平に対して数度 ( $1\sim3^\circ$ ) 傾斜させてモーター駆動によつて回転させ、粉鉱石の向流還元実験を行なった。これを鼓胴型回転流動層 (Drum-type Rotary Fluidized Bed) と呼ぶことにする。本研究では、この鼓胴型回転流動層において粒子運動の観察、混合特性および CO ガスによる粉鉱石の向流還元実験ならびにそれらに関するモデル計算を行なった。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 鉄鉱石と還元ガス

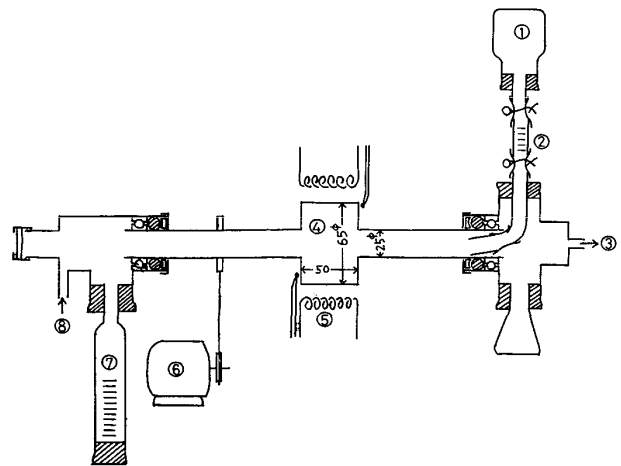
粉鉱石には Mt. Newman (ヘマタイト系) 鉱石を用いた。粉鉱石の粒度は  $0.71\sim1.0$  mm と  $0.42\sim0.71$  mm で篩分けによるものである。粉鉱石の化学組成を Table 1 に示す。

還元ガスには CO ガス (98% 以上) を用いた。これは CO<sub>2</sub> と活性炭の反応 ( $1100^\circ\text{C}$ ) による生成ガスをソーダライムとシリカゲルで CO<sub>2</sub> を除去したもので、不純物として N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> を含んでいるが、これを還元ガスとして使った。ガス流量は  $1\sim6$  NI/min であった。

乾式ガス流量計で反応器の入口および出口での流量を測定し、赤外線分析計で CO と CO<sub>2</sub> 濃度を連続分析した。

### 2.2 鼓胴型回転流動層反応器

鼓胴型回転流動層による粉鉱の向流還元装置の概略図



① hopper ② measuring reservoir ③ gas outlet ④ reactor  
⑤ electric furnace ⑥ v. s. motor ⑦ cylinder ⑧ gas inlet

Fig. 1. Experimental apparatus for countercurrent reduction in a drum-type rotary fluidized bed.

を Fig. 1 に示す。還元反応装置は粉鉱石の装入部分、還元反応帯(鼓胴部)および還元鉄の排出部分からなる。

還元反応帯の鼓胴部はサイズは内径 65 mm, 長さ 50 mm (同径で長さが 25 mm と 100 mm の反応器も製作した) である。この鼓胴部内で粉鉱石は、反応管をモーターの回転駆動によつてある範囲の速度で回転すれば流動状態を形成し、向流還元が進行する。鼓胴部の両側には粉鉱石と還元鉄の装入および排出径路となる軸管 (内径 25 mm) が取り付けられている。この軸管の両端はボールベアリングによる反応器の回転支持と O-リングによるガスシールを施した。反応管は粉鉱石が管内を円滑に降下するように  $1\sim3^\circ$  傾斜させた。

反応器への鉱石の装入は、鉱石秤量溜に所定の容量を秤り、 $2\sim4$  min ごとに反応管上部から装入する方法で行った。間歇的な装入では出口ガス濃度が変動するが、CO<sub>2</sub> 濃度で約 1% の変動範囲になるよう製入量と装入間隔を選んだ。

反応器の加熱はニクロム線ヒータ (1.5 kW) で外部加熱を行なった。反応器内の温度と反応器外の温度とはあらかじめ検定補正している。反応管の回転速度は反応管にマークをつけてストロボの発光回数 (rpm) と同期させることによつて測定した。

反応帯で粉鉱石は CO ガスによつて還元され、排出

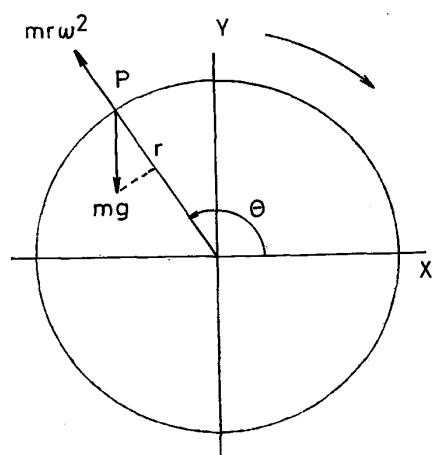


Fig. 2. Balance between centrifugal force and gravity.

側軸管を降下レシリンダーにたまる。その容積を測定し、排出速度が一定となり出口ガス濃度も一定となるまで鉄石の装入を繰り返した。還元反応の定常状態は反応帯に定常状態で滞在する鉄石量の約2倍以上を装入したときに実現できた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鼓胴型回転流動層の粒子運動

##### (1) 粒子運動の観察

回転炉モデル容器（直径 30 cm，深さ 5 cm）内に粒子を装入し、回転速度と充填率をパラメータとして粒子運動を観察した。

回転炉内の粒子に作用する遠心力と重力とが釣り合うまで回転速度を増加すれば、粒子層は回転流動状態を形成する。このときの回転数を臨界回転数と呼ぶ。回転炉の内径が  $D_T$  (cm) のとき、臨界回転数  $F$  (rpm) は次のように求めることができる。

回転軸から距離  $r$  の位置にある粒子は、粒子との相互作用および炉壁との間にすべりがないとすれば、

$$mr\omega^2 = mg \sin \theta \quad (1)$$

を満足する位置  $P(r, \theta)$  で接線方向に放物運動を始める (Fig. 2)。回転炉の頂点 ( $r = D_T/2$ ,  $\theta = 90^\circ$ ) においては  $\sin \theta$  が 1 となり、同一の  $r$  に対し  $\omega$  が最大になるので、回転流動を確実に行わせるためには、この回転条件が必要と考え、回転炉の頂点で求まる回転数を臨界回転数と呼び、各回転数を臨界回転数で基準化して無次元回転数で表す。(1)式に  $r = D_T/2$ ,  $\theta = 90^\circ$  を代入して

$$\omega = \sqrt{2g/D_T} = 2\pi f$$

$$F = 60f = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D_T}} = 422.8 / \sqrt{D_T} \quad (\text{rpm}) \quad (2)$$

コールドモデル容器の直径 30 cm では  $F = 77.2$

(rpm)，鼓胴型の向流還元反応器の直径 6.5 cm では  $F = 166$  (rpm) である。

コールドモデル容器に粒子を装入し、一定速度で回転させながら運動状態の写真を撮った。これらの結果を Photo. 1 に示す。

充填率 10% ではどの回転数でも粒子が壁面ですべるため回転流動状態を形成しない。充填率 30% 以上では、一定の無次元回転数の範囲 (1.0~1.2) で回転流動状態を形成する。しかし充填率 70% では、粒子は回転炉の内壁と等速回転するため流動化領域が狭いのが観察される。したがって、回転流動状態を形成するためには、充填率が 30%~50% になることが望ましい。

臨界無次元回転数 1.0 において、容器の頂点で粒子は放物運動をしていない。すなわち、粒子と壁面の間にすべりがあるので、無次元回転数 1.07 で回転炉の頂点から粒子は放物運動をしている。

これらの観察結果から充填率 30~50%、無次元回転数 1.0~1.2 の場合に良好な回転流動状態を形成するので、向流還元において鉄石粒子と還元ガスの接触がよくガス利用率の向上が期待できる。

##### (2) 鼓胴型回転流動層の滞在量と無次元回転数の関係

粉鉄石の嵩密度は  $1.9 \text{ g/cm}^3$  であつたので、内径 6.5 cm，長さ 5 cm の反応器 (166 cc) に充填できる鉄石量は 315 g である。反応器内の粉鉄の滞在量をこの値で基準化して充填率で表し、無次元回転数との関係を求めた。これらの結果を Fig. 3 に示す。図に示す結果 (a) は還元ガスを流さない場合のデータで、その他 (b と c) の結果は還元実験後のデータである。

充填率は、無次元回転数 1.0 以下では約 30% で、ほぼ一定している。無次元回転数 1.0 以上では反応器の回転による遠心力が大きくなり鉄石粒子が反応器の回転と等速運動をするので、鉄石滞在量は回転数に比例して増加している。その結果、流動化領域が少なく還元ガスとの接触が悪く、還元反応に寄与する部分が減少することになる。

##### (3) 鼓胴型回転流動層の混合特性

反応器内での粒子の混合特性を調べるために、インパルス応答法に基づいて定常排出速度の反応器内にトレーサをパルス信号的に装入し、反応器出口の流出応答を測定した。

装入粒子には粒度 0.5~1.0 mm のマグネシア粒子とトレーサ粒子として同粒度のキルナ鉄 (マグネタイト) を用いた。マグネシア粒子を 2 min ごとに 16 g を装入し、定常排出速度になつてから、マグネシア粒子と同体

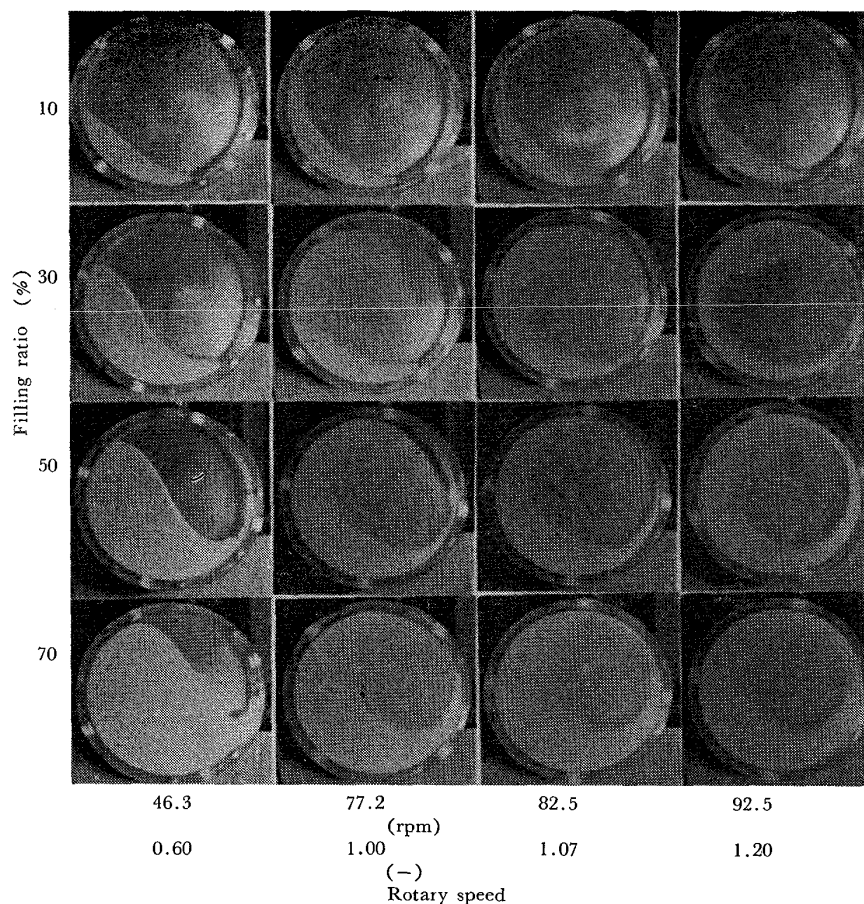
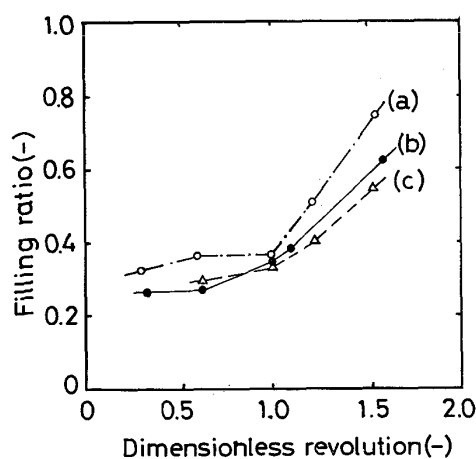


Photo. 1. Motion of alumina particles ( $D_p=2\text{ mm}$ ) in a cold model of the drum-type rotary fluidized bed.



|             | (a)         | (b)         | (c)         |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Temp.       | Room temp.  | 900°C       | 900°C       |
| Ore size    | 0.42-0.71mm | 0.71-1.00mm | 0.42-0.71mm |
| Charge rate | 20g/min     | 6g/min      | 10g/min     |

Fig. 3. Relation between filling ratio and dimensionless revolution.

積 (20 g) のキルナ鉱を 1 回だけ装入する。次回から再びマグネシア粒子の装入を繰り返す。キルナ鉱の装入時刻をスタート時間として排出側で 1 min ごとに 15 s 間

粒子を採取する。採取した粒子を磁選でキルナ鉱とマグネシア粒子とに選別し、両者の重量を測定して、その経時変化を求めた。回転炉の傾斜は  $1.1^\circ$  であつた。

反応器内に装入されたトレーサ粒子は瞬間に分散され、濃度は均一となり排出濃度はその濃度に等しいとする。いわゆる完全混合状態を仮定すれば、トレーサの排出濃度あるいは残留トレーサ濃度  $C$  の変化は次式で表せる。

$$\frac{dc}{dt} = c/\tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

粒子の平均滞在時間を  $\tau = V/v$  とすれば、時間  $t$  における反応器内濃度  $C$  は (3) 式を初期濃度  $C_0$  として積分すると、(4) 式が得られる。

$$C = C_0 \exp(-t/\tau) \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、完全混合状態を仮定すれば、濃度の対数と時間の関係は直線で表せる。

無次元回転数をパラメータとして、トレーサ濃度の経時変化を Fig. 4 に示す。図からトレーサ濃度の経時変化は、 $C_0 \exp\{-(t-t_i)/\sigma\}$  を表している。いずれの回

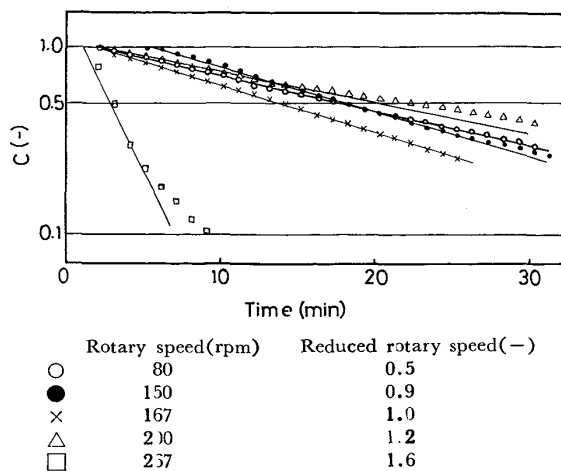


Fig. 4. Relation between residual fraction  $C$  of tracer in reactor and time.

転数においても直線関係が成立しており、ほぼ完全混合状態であることがわかった。 $t_1$  は軸管を通過する時間と考えられる。流動状態を形成する無次元回転数 (1.0~1.2) では  $t_1=2.0$  min であり、無次元回転数 1.6 では軸管径 ( $D_T=2.5$  cm) 内の領域で流動状態を形成するためにトレーサ粒子は反応帯に短時間滞在し排出されている。無次元回転数が 0.5 と小さいときには、 $t_1=5.3$  min と大きくなっている。この点は明確には理解できないが、一部は押し出し流れ (plug flow) の効果<sup>23)</sup> およびよどみ流れ (by-passing flow) が存在すると考える。

### 3.2 向流還元反応

#### (1) ガス利用率に及ぼす無次元回転数の影響

鉄石の装入速度  $W_s$ 、ガス流量  $Q$ 、還元温度 (900°C) および粉鉄石粒度  $D_p$  の向流還元条件を一定とし、反応器の無次元回転数を変えた実験を行った。還元実験では反応器が空塔の状態から CO ガスを流し、ついで鉄石の装入を開始する。出口ガス濃度および還元鉄の排出速度を測定し、それらの定常値を求めた。ガス利用率の定常値と無次元回転数の関係を Fig. 5 に示す。

図からガス利用率は臨界無次元回転数で最大値を示していることがわかる。回転速度が低いときは、粉鉄石は回転流動状態を形成しないので、還元ガスと粉鉄石の接触が悪くガス利用率が低い。一方、無次元回転数が臨界回転数より大きくなれば、反応器の軸付近に空洞を形成するために、この場合にも還元ガスと粉鉄石の接触が不十分となつてガス利用率が低下している。したがって、無次元回転数が臨界回転数のとき良好な流動状態を形成し、還元ガスと粉鉄石の接触が最もよくガス利用率は最大値を示したと考える。

#### (2) 還元反応速度式および向流還元の無次元数<sup>24)</sup>

鼓胴型回転流動層における粉鉄石の還元反応モデルを

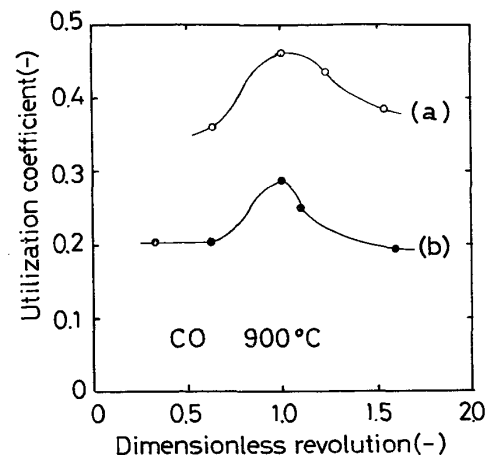


Fig. 5. Dependency of utilization coefficient at the steady state on dimensionless revolution.

考える。反応速度式には固定層および移動層の還元反応に適用してきたように<sup>25)</sup>、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4(\text{h})$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-FeO}(\text{m})$ 、 $\text{FeO-Fe}(\text{w})$  の三界面においてそれぞれ化学反応速度  $K_i$  と生成物層内のガス拡散速度  $D_i$  を考慮した未反応核混合律速モデルを使用する。例えば、 $\text{FeO-Fe}(\text{w})$  界面での還元速度式は次式で表す。

$$\frac{dR_w}{dt} = \frac{3K_w(C_w^{\text{eq}} - C_w)}{r_0\rho_0} \cdot \frac{1}{\{1 - (R_w/R_w^{\text{eq}})\}^{-2/3} + k_i r_0/D_i} \cdot [\{1 - (R_w/R_w^{\text{eq}})\}^{-1/3} - 1] \quad (5)$$

ヘマタイト、マグネタイトの還元速度式についてもサフィクス  $i$  をそれぞれ  $h$ ,  $m$  に変えて同様の還元速度式で表す。

還元反応は三界面において独立に進行するとし、ヘマタイト、マグネタイトおよびウスタイトの順に計算を進める。単位層の還元率  $R$  は各還元段階の還元率  $R_i$  の和で表す。

$$R = R_h + R_m + R_w \quad (6)$$

ガス利用率はヘマタイト、マグネタイトおよびウスタイトの反応順に合計され、その和が各段階でのガス利用率  $C_i$  とする。単位重量  $d_w$  当たりのガス利用率の増加  $dc_i$  は、次式で表す。

$$\frac{dC_i}{dW} = \frac{1400 \cdot X_0}{Q \cdot X_r} \cdot \frac{dR_i}{dt} \quad (7)$$

ここで  $Q$  は還元ガス流量  $\text{cm}^3/\text{min}$  であり、1400 は  $22400 \text{ cm}^3$  を酸素の原子量 16 で割った値である。

固定層における還元反応の実験結果からガス利用率と

Table 2. Rate constants  $K_i$ ,  $F_i$  and equilibrium concentration  $C_i$  for countercurrent reduction in a drum-type rotary fluidized bed (CO gas).

| Temp. (°C) | Rate constants |              |                    | Equilibrium conc. |       |       |
|------------|----------------|--------------|--------------------|-------------------|-------|-------|
|            | $K_w$          | $K_m (=K_h)$ | $F_w (=F_m = F_h)$ | $C_w$             | $C_m$ | $C_h$ |
| 900        | 0.030          | 0.012        | 0.15               | 0.318             | 0.787 | 1.0   |
| 750        | 0.015          | 0.005        | 0.15               | 0.377             | 0.673 | 1.0   |

還元率の関係を求める。ガス流れが均一なプラグフローを仮定して、還元率が、10, 30, 60, および 80% において実測値と計算値が一致するように各速度定数を求める。その代表値を Table 2 に示す。本実験に用いた粉鉱では、界面反応に対する粒内拡散の寄与率  $E_i (=K_i r_o / D_i)$  が 0.5 より小さく、還元反応は化学反応律速と見ることができる。

向流還元反応の計算ではこれらの速度定数を用いて、還元反応の条件、すなわちガス流量、粉鉱石の装入速度および粉鉱石の滞在時間を無次元数で表し、定常ガス利用率と定常還元率の関係を求める。

無次元鉱石滞在時間:  $O_t$

反応界面進行速度  $v_0$  は  $K \cdot X_r / \rho_0$  (cm/min) である。完全還元時間は  $r_0 / v_0$  であり、鉱石の滞在時間を  $t_0$  とすれば、無次元鉱石滞在時間  $O_t$  は、

$$O_t = \frac{t_0}{r_0 / v_0} = \frac{K \cdot X_r \cdot t_0}{r_0 \rho_0} \dots \dots \dots (8)$$

で表すことができる。鉱石の反応帯での滞在時間は、一般に反応器内に鉱石滞在量  $M$  (g) を装入速度  $w_s$  (g/min) で割った値になる。

$$t_0 = M / w_s \text{ (min)} \dots \dots \dots (9)$$

後述するように鼓胴型回転炉での鉱石と還元ガスが接触して反応する主領域は、全領域ではなく一部領域が反応帯となつている。したがって、その反応帯に存在する鉱石量を見積らなければならない。

無次元ガス接触時間:  $G_c$

鉱石の還元初期に生成するガス量は、鉱石の単位面積当たりについて

$$\frac{22400}{16} \cdot K \cdot X_r \cdot X_0 = 1400 K \cdot X_r X_0 \text{ (cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min)} \dots \dots \dots (10)$$

鉱石の総表面積  $A (=3W / r_o \rho_0)$  とすれば、鉱石の単位表面積当たりの還元ガス量は  $Q X_r / A$  である。還元ガス流量と生成ガス流量の比が無次元ガス流量であり、その逆数が無次元ガス接触時間  $G_c$  を示す。

$$G_c = \frac{1400 K X_r X_0}{Q X_r / A} = \frac{1400 K X_0 A}{Q} \dots \dots \dots (11)$$

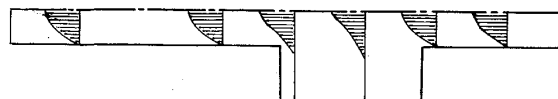


Fig. 6. Simulation of flow in a drum type reactor.

$G_c$  と  $O_t$  の比は次式で表せる。

$$\frac{G_c}{O_t} = \frac{3(W X_0 / t_0)}{(Q X_r / 1400)} = 3B_o \dots \dots \dots (12)$$

すなわち、単位時間当たりの鉱石中酸素とガスが還元する酸素との比、酸素比  $B_o$  の 3 倍である。

鼓胴型回転流動層では、ほぼ完全混合状態にありまた還元反応の結果が示すようにガス利用率は各還元段階で化学量論の平衡組成を越えていない。したがって、還元反応は単一流動層の反応、すなわち鉱石粒子の還元率は均一に進行すると仮定する。

一方、鼓胴型反応器内(空塔状態)の流れに関するシミュレーション<sup>26)</sup>から、1 Nl/min ( $Re=20$ ) では、ガス流れの主流は軸径(内径 25 mm)の領域であることが得られた(Fig. 6)、したがって、還元反応は反応器の軸部内径に等しい領域で、還元ガスと落下運動状態にある鉱石が接触して進行していると仮定する。この領域(反応帯)で還元反応に関与する鉱石量は回転流動状態にあるので、目下のところ求めることができないが、次のように仮定して鉱石反応量を求め還元反応の無次元数を得た。

粉鉱石粒子は鼓胴型回転炉内で軸長さ方向に均一な流動状態を形成しているとし、軸部領域でもその断面積に比例した鉱石量が落下運動状態にあるとする。軸部と鼓胴部の断面積比は 0.148 ( $2.5^2/6.5^2$ ) であるから、鼓胴部の平均滞在量を 150 g とすれば、反応に関与する鉱石量  $W$  は  $22.2 (=150 \times 0.148)$  g となる。向流還元反応の計算ではこの値を用いて、無次元数を求めた。実験結果に基づく向流還元反応の無次元数を求める場合は、実験後に得られた鼓胴部の鉱石滞在量の 14.8% が反応に関与するとした。

(3) ガス利用率と還元率の関係

定常状態で向流還元が進行しているとき、鉱石から奪

Table 3. Results of experimental data.

| Exp. No. | $W_s$<br>(g/min) | $Q$<br>(Nl/min) | $M$<br>(g) | $U_s$<br>(-) | $R_s$<br>(-) | $Gc$<br>(-) | $Ot$<br>(-) | $Bo$<br>(-) | Temp.<br>(°C) | $\theta$<br>(°) |
|----------|------------------|-----------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|
| 1        | 11.4             | 2.13            | 126.7      | 0.472        | 0.235        | 1.73        | 0.288       | 2.00        | 900           | 2.9             |
| 2        | 5.53             | 2.14            | 105.2      | 0.309        | 0.319        | 1.43        | 0.492       | 0.968       |               |                 |
| 3        | 5.93             | 1.01            | 114.6      | 0.491        | 0.223        | 3.31        | 0.500       | 2.21        |               |                 |
| 4        | 2.77             | 1.07            | 101.0      | 0.331        | 0.341        | 2.75        | 0.944       | 0.971       |               |                 |
| 5        | 5.51             | 4.29            | 110.9      | 0.240        | 0.498        | 0.753       | 0.510       | 0.492       |               |                 |
| 6        | 2.64             | 2.16            | 109.3      | 0.289        | 0.630        | 1.47        | 1.07        | 0.458       |               |                 |
| 7        | 6.41             | 3.28            | 115.5      | 0.288        | 0.393        | 1.03        | 0.466       | 0.737       |               |                 |
| 8*       | 5.48             | 2.36            | 212.4      | 0.305        | 0.349        | 2.62        | 1.00        | 0.873       | 900           | 1.1             |
| 9        | 1.01             | 4.58            | 127.6      | 0.075        | 0.908        | 0.812       | 3.27        | 0.083       |               |                 |
| 10**     | 2.48             | 2.23            | 67.4       | 0.225        | 0.601        | 0.881       | 0.704       | 0.417       |               |                 |
| 11**     | 1.00             | 4.44            | 67.4       | 0.075        | 0.893        | 0.442       | 1.74        | 0.085       |               |                 |
| 12       | 5.29             | 2.09            | 137.4      | 0.321        | 0.355        | 0.768       | 0.269       | 0.952       | 750           | 1.1             |
| 13       | 5.56             | 3.96            | 145.3      | 0.229        | 0.436        | 0.428       | 0.271       | 0.526       |               |                 |
| 14       | 2.88             | 6.00            | 128.4      | 0.120        | 0.665        | 0.245       | 0.460       | 0.178       |               |                 |
| 15       | 1.33             | 3.07            | 106.5      | 0.143        | 0.882        | 0.404       | 0.828       | 0.163       |               |                 |

\*) Reactor length is 100 mm, \*\*) Reactor length is 25 mm, the other's length is 50 mm

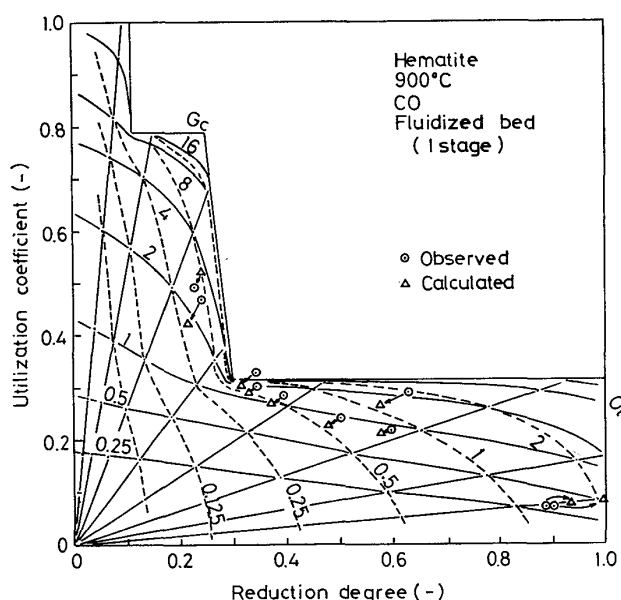


Fig. 7. Utilization diagram for countercurrent reduction in a drum-type rotary fluidized bed.

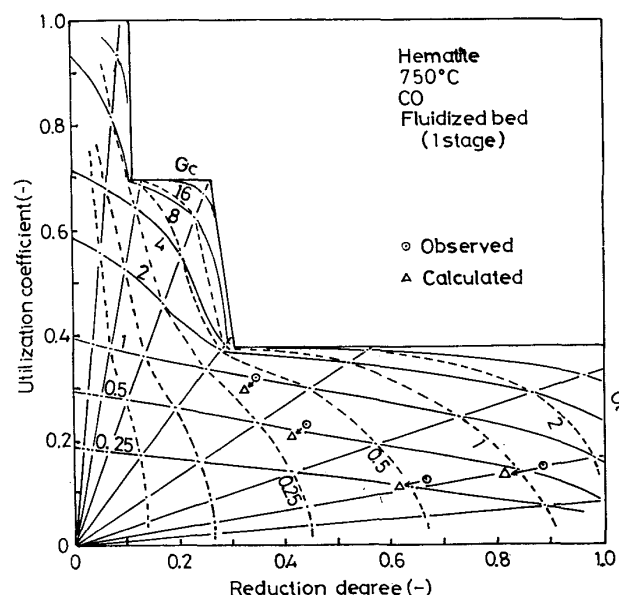


Fig. 8. Utilization diagram for countercurrent reduction in a drum-type rotary fluidized bed.

われる酸素と還元ガスが奪う酸素は等しい。したがって、本実験では定常ガス利用率が測定されているので、次式によって反応器出口の鉱石還元率を算出した。

$$Q \cdot u_s \cdot X_r \cdot \frac{16}{22400} = W_s X_o R_s \quad (13)$$

$$R_s = \frac{Q u_s X_r}{1400 W_s X_o} = \frac{1}{Bo} \cdot u_s \quad (14)$$

鼓胴型回転流動層におけるガス利用率と還元率の関係を Fig. 7(900°C) と Fig. 8(750°C) に示す。図中に測定値は○印で、計算値は△印で示してある。これらの結果は Table 3 にまとめた。

測定結果が示すように、一段一室の鼓胴型回転流動層での還元反応では、ガス利用率は化学量論の平衡組成を越えていない。すでに述べたように、回転流動層内では粉鉱石粒子はほぼ完全混合状態にあり、ほぼ均一に近い還元率分布になっていると見られる。したがって、一段一室の鼓胴型回転流動層における還元反応は単一流動層の反応、すなわち鉱石粒子の還元率がほぼ均一に進行していると理解された。

実験条件（装入速度  $W_s$ 、粉鉱石粒度  $D_p$  および還元ガス流量  $Q$ ）と実験結果（鉱石滞在量  $M$  およびガス利用率  $u_s$ ）とから無次元ガス接触時間  $Gc$  と無次元鉱石滞

在時間  $Ot$  を求めた。これらの無次元数を求める場合、反応に与える鉱石量は全鉱石滞在量の 14.8% とした。

Fig. 7 と Fig. 8 において実測値と計算値は概して一致している。還元率が低い範囲では計算値が実測値より低い値を示している。これは反応に関与する鉱石量が全鉱石滞在量（鼓胴部）の 14.8% より多いことにあるかまたは鉱石粒子の運動には完全混合プラグフローの効果が影響していると考えられる。本研究では、鼓胴型回転流動層において還元反応に関与する領域の鉱石量およびガス流れについて直接的には求めることができなかった。鼓胴型回転流動層による粉鉱石の向流還元では焼結現象の発生は少なくまたガス利用率の向上は化学量論の平衡組成まで可能であることが得られた。

#### 4. 結 言

反応管の中央部分に軸管径 (25 mm) より大きい鼓胴型の反応帯 (内径: 65 mm, 長さ: 50 mm) を持つ反応器を  $1\sim 3^\circ$  傾斜して等速回転させる方法、いわゆる鼓胴型回転流動層において粉鉱石の CO ガスによる向流還元実験および反応器内の粒子運動に関する実験を行った。

(1) 鼓胴型回転流動層内の粉鉱石は、充填率が 30~50%, 無次元回転数が 1.0~1.2 のときに良好な回転流動状態を形成し、運動状態はほぼ完全混合状態でありまた安定な鉱石滞在量を得ることができた。

(2) 向流還元反応の定常ガス利用率は無次元回転数 1.0 (臨界回転数) で最大値を示した。

(3) 一段一室の鼓胴型回転流動層の還元反応は単一流動層の反応、すなわち粉鉱石粒子はほぼ完全混合状態にあり還元率がほぼ均一であると理解した。

(4) 鼓胴型回転流動層における粉鉱石の CO ガス還元反応では焼結現象の発生が少ないことおよびガス利用率の向上は化学量論の平衡組成まで可能であることが得られた。向流還元反応の計算では還元反応に関与する領域が鼓胴部内の軸管径に等しいとして、向流還元反応の無次元数を求めた。これらの計算値はほぼ実測値と一致する結果を得た。

#### 記 号

|                                     |                                           |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| $A$ : 粉鉱石の総表面積                      | ( $\text{cm}^2$ )                         |
| $Bo$ : 酸素比                          | (—)                                       |
| $C, C_0$ : 初期および時間 $t$ におけるトレーサー濃度  | (—)                                       |
| $C_1^a$ : 各還元段階の平衡 $\text{CO}_2$ 濃度 | (—)                                       |
| $C_i$ : 層入口の $\text{CO}_2$ 濃度       | (—)                                       |
| $D_i$ : 各還元段階のガス拡散定数                | ( $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{min}$ ) |
| $D_p$ : 粉鉱石の平均粒度                    | ( $\text{cm}$ )                           |

|                                 |                                             |
|---------------------------------|---------------------------------------------|
| $D_T$ : 鼓胴型反応器の直径               | ( $\text{cm}$ )                             |
| $E_i$ : 各還元段階の界面反応に対する粒子内拡散の寄与率 | (—)                                         |
| $F, f$ : 臨界回転数                  | (rpm, rps)                                  |
| $g$ : 重力の加速度                    | ( $980 \text{ cm}/\text{s}^2$ )             |
| $G_c$ : 無次元ガス接触時間               | (—)                                         |
| $K$ : 化学反応速度定数                  | ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) |
| $K_i$ : 各還元段階の化学反応速度定数          | ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ ) |
| $M$ : 反応に関与する鉱石の滞在量             | ( $\text{g}$ )                              |
| $m$ : 粉鉱石の質量                    | (—)                                         |
| $Ot$ : 無次元化鉱石滞在時間               | (—)                                         |
| $Q$ : 還元ガス流量                    | ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )                |
| $r$ : 回転流動層反応器の半径               | ( $\text{cm}$ )                             |
| $r_0$ : 粉鉱石の半径                  | ( $\text{cm}$ )                             |
| $R$ : 層の平均還元率                   | (—)                                         |
| $R_i$ : 各還元段階の還元率               | (—)                                         |
| $R_i^0$ : 各還元段階の最終還元率           | (—)                                         |
| $R_s$ : 向流還元における定常還元率           | (—)                                         |
| $t_i$ : 軸管における滞在時間              | ( $\text{min}$ )                            |
| $t_0$ : 反応帯における粉鉱石の滞在時間         | ( $\text{min}$ )                            |
| $u_s$ : 向流還元における定常ガス利用率         | (—)                                         |
| $v_0$ : 還元反応界面の進行速度             | ( $\text{cm}/\text{min}$ )                  |
| $W$ : 反応帯の粉鉱石滞在量                | ( $\text{g}$ )                              |
| $W_s$ : 粉鉱石の装入速度                | ( $\text{g}/\text{min}$ )                   |
| $X_0$ : 粉鉱石中の結合酸素濃度             | (—)                                         |
| $X_r$ : 還元ガス (CO) 濃度            | (—)                                         |
| $\rho_0$ : 粉鉱石の密度               | ( $3.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ )             |
| $\tau$ : 粉鉱石の平均滞在時間             | ( $\text{min}$ )                            |
| $\omega$ : 角速度                  | ( $\text{rad}/\text{s}$ )                   |

サフィクス

$i$  ( $\equiv h, m, w$ ) : ヘマタイト, マグネタイトおよびウスタイトの還元段階

#### 文 献

- 1) 西田信直: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 705
- 2) 遠藤勝治郎, 松下幸雄: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 64
- 3) J. ASTIER: Rev. Met., 72 (1975), p. 711
- 4) K. OLRICH: Stahl u. Eisen, 98 (1978), p. 1211
- 5) 近藤真一: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1542
- 6) 市嶋 勲, 近藤真一, 松本龍太郎, 須賀田正泰, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 647
- 7) 市嶋 勲, 近藤真一, 松本龍太郎, 須賀田正泰, 石川英毅, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 649
- 8) 桜谷和之, 北原宣泰, 森中 功, 神谷 司, 尾澤正也, 田中 稔: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 169
- 9) 同上: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 176
- 10) 同上: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 185
- 11) Y. YAMAMICHI: Tetsu-to-Hagane Overseas, 3 (1963), p. 296
- 12) 桜谷和之, 神谷 司, 田中 稔: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1435
- 13) 大蔵明光, 徳田昌則, 松下幸雄: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 1039
- 14) 浜田尚夫, 白井 隆: 化学工学, 29 (1965), p. 995

- 
- 15) 井上紀夫, 中野義夫, 石田 愈, 白井 隆: 化学工学論文集, 4 (1978), p. 135
  - 16) H. SCHENCK, W. WENZEL, and H. D. BUTZMANN: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 211
  - 17) W. WENZEL, F. R. BLOCK, and E. WORTBERK: Arch. Eisenhüttenw., 43 (1972), p. 805
  - 18) S. Y. Ezz: Trans. Met. Soc. AIME, 218 (1960), p. 709
  - 19) 相馬胤和: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1320
  - 20) T. SOMA: Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 480
  - 21) 相馬胤和: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1557
  - 22) 佐々木康, 相馬胤和: 鉄と鋼, 60 (1974), S 342
  - 23) 永田進治, 江口 弥, 稲村寿一, 谷川 澄, 田中知治: 化学工学, 10 (1953), p. 387
  - 24) 相馬胤和: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 909
  - 25) 天辰正義, 相馬胤和: 鉄と鋼, 62 (1976), S 333
  - 26) 佐久田博司, 吉沢昭宣: 鉄と鋼, 64 (1978), S 528
-