

論 文

UDC 669.162.283 : 669.162.263.24/.25

高炉装入物の高温性状測定法*

山岡洋次郎**・堀田 裕久**・梶川 脩二***

Testing Method of High Temperature Properties of Blast Furnace Burdens

Yojiro YAMAOKA, Hirohisa HOTTA, and Shuji KAJIKAWA

Synopsis :

Regarding the reduction under load test for measuring high temperature properties of blast furnace burdens, the test conditions, i.e. the load, gas flow rate, particle size and bed height were examined through tests and calculations based on a reduction model for fixed bed. Examinations covered also evaluation criteria of test results for high temperature properties.

The results obtained are summarized as follows :

- (1) Test results are influenced by each of the load, gas flow rate, particle size and bed height conditions.
- (2) It is desirable to minimize the longitudinal difference of degree of reduction and the dependence on load of test results. The optimal test conditions (Fig. 2) were decided from such a point of view.
- (3) The following evaluation criteria of test results for high temperature properties were proposed :
i) the temperatures at the beginning of softening and melt-down are high, with a small temperature difference; ii) the integral and average values of index of permeability resistance between softening and melt-down are small; and iii) the degree of reduction achieved at 1 000 to 1 200°C is high.

1. 緒 言

日本鉄鋼各社の高炉解体調査結果は、高炉操業における装入物の高温性状（高温被還元性、軟化・溶融特性およびこれに伴う通気性の変化）の重要性を如実に示しており、これを契機として、高温性状のより正確な測定および改善を目的とした荷重還元試験が各方面で行われるようになってきた。しかしながら、その試験条件は各者各様であり^{1)~13)}、全く統一されていないのが現状である。また、試験結果から高温性状の良否を評価する基準についても、下村ら⁶⁾のS値を除いて、明確に定義されたものは見当たらない。従つて、試験条件あるいは試験結果の評価基準によつては、同一試料について異なつた評価が与えられる可能性があり、適正試験法の確立がぜひとも必要となつてきている。

このような理由から、最近、試験条件の検討が行われ始め、西田ら²⁾は、試験結果に及ぼす試料粒度、荷重およびガス組成の影響について、一定のガス流量および温度条件下で調査を行つている。下村ら³⁾も、昇温速度あ

るいは荷重により、試験結果が異なることを指摘している。また、吉永ら⁴⁾⁵⁾は、還元ガス流量の増加により、1 200°C以上の高温域での収縮率が減少すること、および、層高方向の平均還元率のガス流量依存性を少なくするためには、0.13~0.22 m/s以上の空塔速度が必要なことを報告している。しかしながら、これらはいずれも特定条件単独の影響の検討にとどまつており、必ずしも十分なものではない。

このような点を考慮して、本研究では、高炉内条件近似を基本とする荷重還元試験法において、試験結果に及ぼす荷重、ガス流量、試料粒度および充填層高の影響およびそれらの適正組み合わせについて、実測および数式モデルにより総合的に検討し、また、試験結果の評価基準についても検討した。以下に、その結果を報告する。

2. 試 験 装 置

Fig. 1に試験装置の概略を示す。装置の基本原理は次のとおりである。まず、ガス混合・供給装置により所定の流量（定値制御）および組成（CO-CO₂-N₂ プログ

* 昭和 54 年 10 月 18 日本会講演大会にて発表 昭和 55 年 3 月 27 日受付 (Received Mar. 27, 1980)

** 日本鋼管(株)技術研究所福山研究所 (Fukuyama Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*** 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K.)

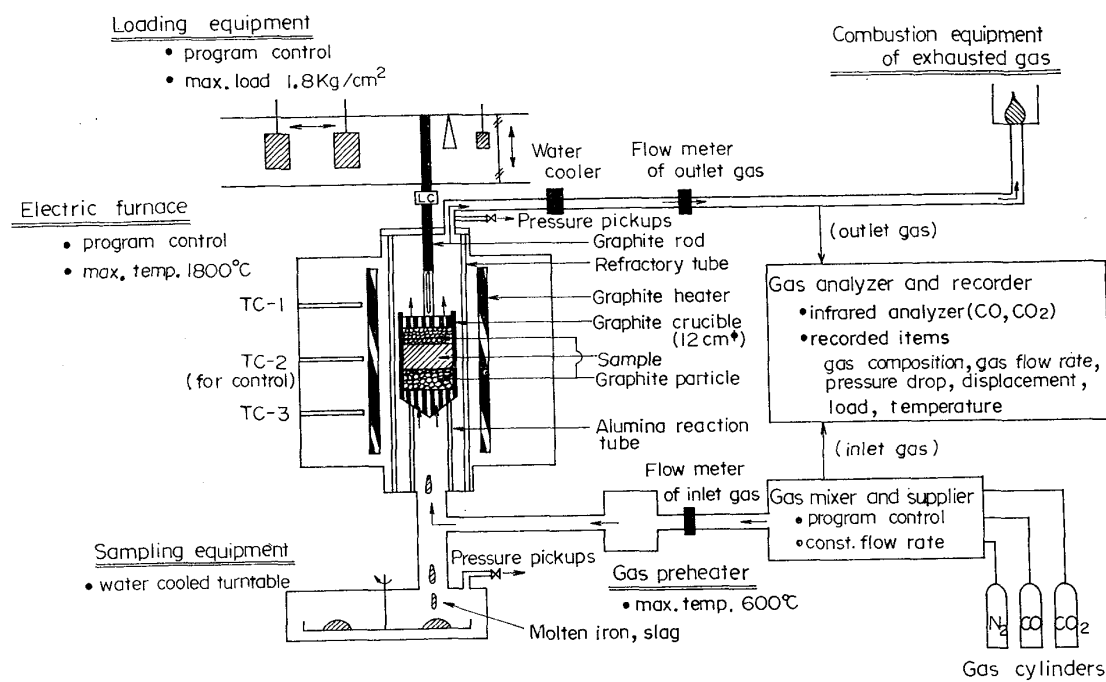


Fig. 1. Schematic drawing of testing system.

ラム制御) に制御された入口ガスは、赤外線式分析計 (CO, CO₂) およびタービン式流量計により、組成および流量を再度測定され、ガス予熱炉 (max. 600°C) を経て、タンマン炉 (75 kVA) 内に導入される。タンマン炉内の黒鉛るつぼ (内径 120 mmφ) に充填された試料は、所定の荷重および温度条件 (いずれもプログラム制御) 下で、このガスにより還元される。出口ガスは、冷却器により常温まで冷却された後、流量および組成が測定される。なお、入口および出口ガスの組成 (CO, CO₂) は 1 min 間隔でそれぞれ交互に測定され、溶融滴下試料は、炉下部に設けた回転式水冷盤により、時系列的に採取できるようにになっている。

3. 測定項目

通常の測定項目は、i) 充填層直上のガス温度、ii) 充填層高の変化、iii) 充填層の圧損、iv) 入・出口ガスの組成 (CO, CO₂) および流量、v) 試料の層高方向の平均還元率、vi) 試料層の通気抵抗指数であり、必要に応じて、vii) 滴下物の量および化学組成も調査される。試料粒子の温度は、種々のガス流量条件下で、試料粒子中にシース熱電対を埋込む方法、テンピルペレット装入による方法 (いずれも 1200°C 以下) および試料層中に装入したコークスの格子定数 (L_c) 変化を測定する方法 (1200°C 以上) により推定した。(以後、特にことわらない限り、温度とは粒子温度を指すものとする。) 層高方

向の平均還元率 $\bar{R}$ は、項目 (iv) と試料の酸素バランスから試験後に計算され、通気抵抗指数 K は、斧ら¹⁾ により提案された (1) 式を用いて、項目 (ii) ~ (iv) から同じく試験後に計算される。

$$K = \Delta P \cdot \rho_g / (\mu^{0.3} \cdot G^{1.7} \cdot L) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 G : ガスの空塔質量速度 (kg/m²·s)

L : 充填層高 (m)

ΔP : 圧損 (kg/m²)

ρ_g : ガスの密度 (kg/m³)

μ : ガスの粘度 (kg/m·s)

K : 通気抵抗指数 (M.K.S 単位)

(1) 式の計算にあたっては、後述する試料層上下の黒鉛粒子層の影響も考慮する必要があるが、黒鉛粒子のみを充填した場合、層高および圧損はほとんど変化しないという事実から、黒鉛粒子層については、この 2 因子は全温度域を通じて一定であるとして計算した。なお、混合ガスの粘度は、SUTHERLAND の式¹⁴⁾ から計算した各成分ガスの粘度を、WILKE の式¹⁴⁾ に代入して求めた。

4. 適正試験条件の検討

高炉内条件近似を基本とする荷重還元試験について、予備試験による実測、および、固定層還元モデルによる実測結果の解析を総合した結果、一応適正と考えられる試験条件として、Fig. 2 に示す条件が得られた。

以下に、これらの検討内容について説明する。

Table 1. Chemical compositions of samples.

Sample	Chemical component (%)							Porosity (%)
	T. Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaO/SiO ₂	
Sinter	56.60	5.46	5.60	2.10	9.49	1.55	1.69	20.1
Acid pellet	63.29	0.19	4.98	2.94	0.25	0.08	0.05	25.4

Table 2. List of preliminary test conditions.

Test name	Max. load (kg/cm ²)		Gas flow rate (Nl/min)		Particle size (mm)		Bed height (mm)	
	Sinter	Pellet	Sinter	Pellet	Sinter	Pellet	Sinter	Pellet
A-1	0.5 0.8 1.0 1.2	}	90	}	11.1~12.7	}	100	70
A-2								
A-3								
A-4								
B-1	1.0	}	30 50 70 90	}	11.1~12.7	}	100	70
B-2								
B-3								
B-4								
C-1	1.0	}	90	}	7.9~9.5 11.1~12.7 12.7~15.9 15.9~19.1	}	100	70
C-2								
C-3								
C-4								
D-1	1.0	}	90	}	11.1~12.7	}	50 70 100 130	50 70 100 —
D-2								
D-3								
D-4								

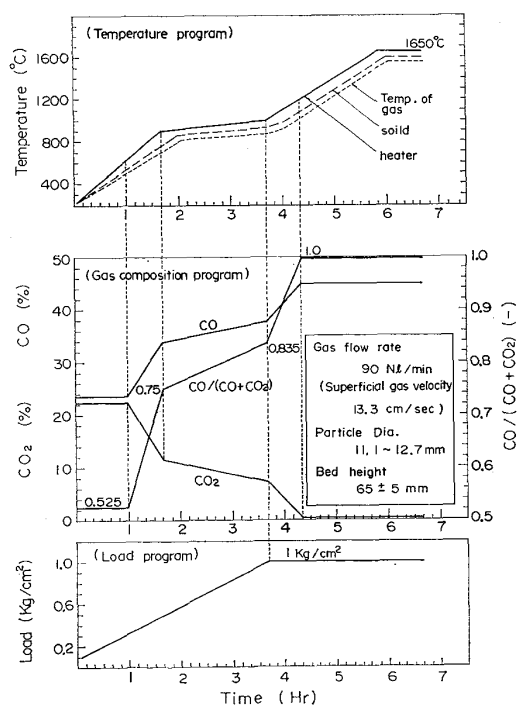


Fig. 2. Conditions of reduction under load test.

4.1 予備試験条件

4.1.1 試料

供試試料は、工業規模で生産されている酸性ペレット 1 銘柄および自溶性焼結鉄 1 銘柄の 2 種である。これらの化学組成および気孔率を Table 1 に示す。

4.1.2 予備試験条件

試験結果に及ぼす荷重、ガス流量、試料粒度および充填層高の影響について調査するため、Table 2 に示す条件で予備荷重還元試験を行つた。なお、焼結鉄と酸性ペレットの層高の差は、試料充填量を一定 (T. Fe 換算で 1 kg) としたため生じたものである。また、いずれの予備試験においても、ガス-粒子間の熱交換、溶融物の滴下しやすさ、層高方向の荷重分布などを考慮して、試料層の上下には、それぞれ層高 50 mm および 100 mm の黒鉛粒子層 (粒子径 9.5~12.7 mm) を設けた。層内ガス・粒子温度-入口ガス組成条件については、当社高炉の解体調査結果および垂直ゾンデによる実測結果に基づいて、高炉内半径方向中間部で最も一般的と思われる条件 (Fig. 2) に設定し、すべての予備試験で一定とした。入口ガスの予熱については、600°C まではこの層内ガス温

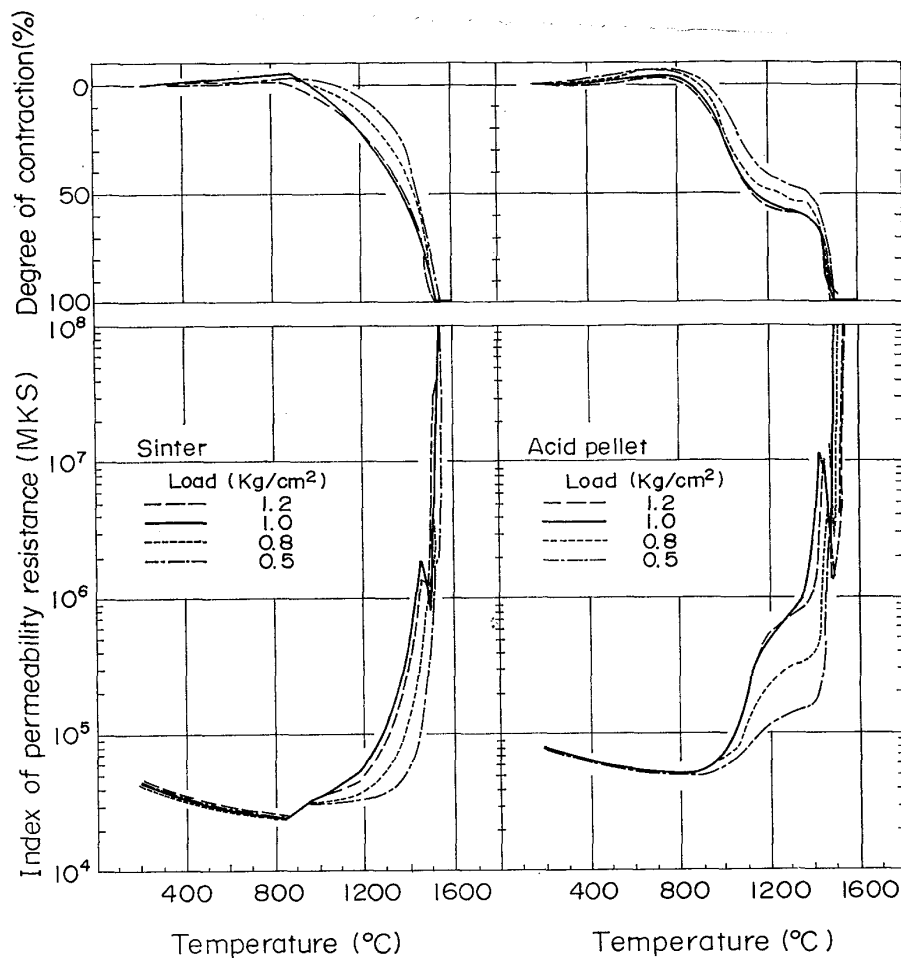


Fig. 3. Effect of load on degree of contraction and index of permeability resistance.

度条件に追従させ、以後は 600°C 一定とした。なお、予熱によるガス組成の変化は、 CO 濃度でみると、 600°C (ガス温度) で約 0.2% 程度 (予熱炉入口: 29.2 , 出口: 29.0% CO) であり、試料下部の黒鉛層による CO_2 濃度変化は、黒鉛のみを充填した予備試験によると、 1000°C (粒子温度) 付近で 0.2% 以下 (タンマン炉入口: 3.0 , 出口: $2.8\sim 2.9\%$ CO_2) であり、いずれも極めて小さい。ただし、試料上部の黒鉛層によるガス組成の変化については、 1000°C 以上で多少生じている可能性もあるが、確認はしていない。しかし、これは試験結果および還元率の計算結果になんら影響を与えない。

4.2 予備試験結果

4.2.1 荷重の影響

Fig. 3 に荷重条件のみを変えて行つた予備試験 (A-1 ~ A-4) の結果を示す。ただし、荷重負荷のパターンは、RANKINE, ZENKOV ら¹⁵⁾による高炉内圧力分布の推定計算結果を参考にして、いずれの試験においても、層内ガス温度が 200°C から 900°C に上昇する間は直線的

に増加させ、 900°C で所定の荷重 (最大荷重) に達した以後は、この値で一定とした。(以後、荷重とはこの最大荷重を示すものとする。)

Fig. 3 から明らかなように、焼結鉱と酸性ペレットを比較した場合、収縮曲線および通気抵抗曲線の形状にはかなりの差が認められるが、これらの荷重依存性はよく一致している。すなわち、荷重 1 kg/cm^2 以下では、荷重が小さくなる程、収縮率および通気抵抗指数の上昇開始温度が高くなる傾向があるが、荷重が 1 kg/cm^2 以上になると、これらの荷重依存性は極めて小さくなっている。

4.2.2 ガス流量の影響

Fig. 4 にガス流量の水準のみを変えて行つた予備試験 (B-1 ~ B-4) の結果を示す。図から明らかなように、焼結鉱、酸性ペレットいずれについても、 50 Nl/min 以下では、ガス流量の減少により層平均還元率が大きく低下しており、そのガス流量依存性を少なくするためには、この粒度および層高では、 $70\sim 90\text{ Nl/min}$ (標準状態空塔速度 $10\sim 13\text{ cm/s}$) 以上必要であることがわかる。こ

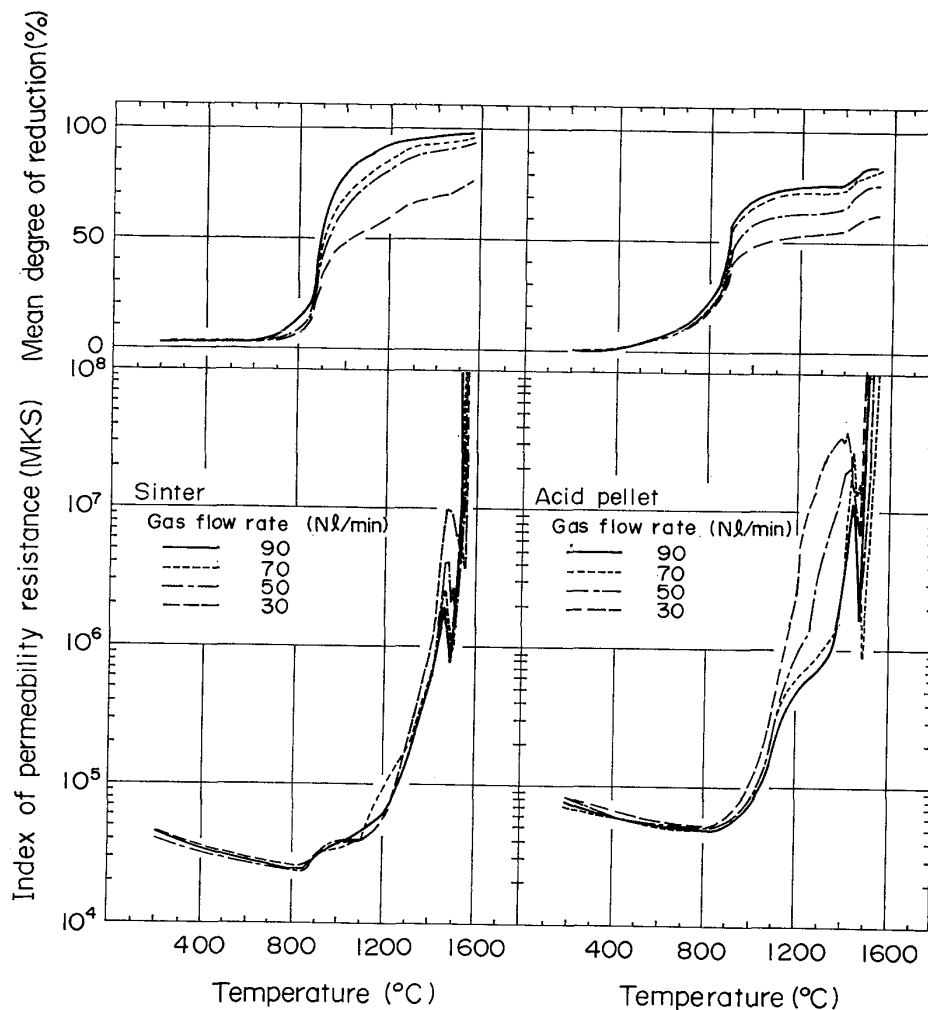


Fig. 4. Effect of gas flow rate on degree of reduction and index of permeability resistance.

れは吉永ら⁵⁾の結果とよく一致している。しかし、層平均還元率曲線の形状およびその絶対値には、両者間にかんがりの差が認められ、酸性ペレットの場合、wustite からメタルへの還元段階で、ペレット表層部に緻密な metallic shell が形成されるため、焼結鉱に比べて高温域での還元が著しく停滞する傾向がある。通気抵抗指数のガス流量依存性も、層平均還元率のそれとおおむね対応しているが、酸性ペレットの場合特に著しい。

4.2.3 試料粒度の影響

Fig. 5 試料粒度の水準だけを変えて行つた予備試験 (C-1~C-4) のうち、酸性ペレットについての結果を示す。いずれの試料についても、粒度が小さくなるにつれて層平均還元率は増加するが、その依存性は焼結鉱より酸性ペレットの方が大きく、特に 1000°C 以上で顕著な差が生じている。通気抵抗指数についても同様で、いずれの試料についても、粒度の減少により、1200~1300°C 以上での値が低くなる傾向があるが、酸性ペレットの方がより顕著である。この原因は、通気抵抗指数のガ

ス流量依存性の原因と同一と思われ、粒度の減少あるいはガス流量の増加により、1000~1200°C での到達層平均還元率が高くなる結果、脈石と残留 wustite の反応による熔融スラグの生成が抑制されるためと推定される。なお、軟化・熔融過程における試料の組織変化については、別報²¹⁾にて報告する。

4.2.4 充填層高の影響

充填層高のみを変えた場合、いずれの試料でも、層高の増加とともに層平均還元率は低下するが、焼結鉱の方がその依存性が大きい。これは、焼結鉱の被還元性（特に 1000°C 以上での高温被還元性）が酸性ペレットに比べて高いためと考えられる。通気抵抗指数の層高依存性については、逆に、酸性ペレットの方が顕著で、焼結鉱についてはほとんど認められない。

4.3 固定層還元モデルによる ガス流量、粒度および層高条件の検討

本荷重還元試験は、高炉内での移動層還元過程を固定層によりシミュレートする微分層還元試験であり、層高

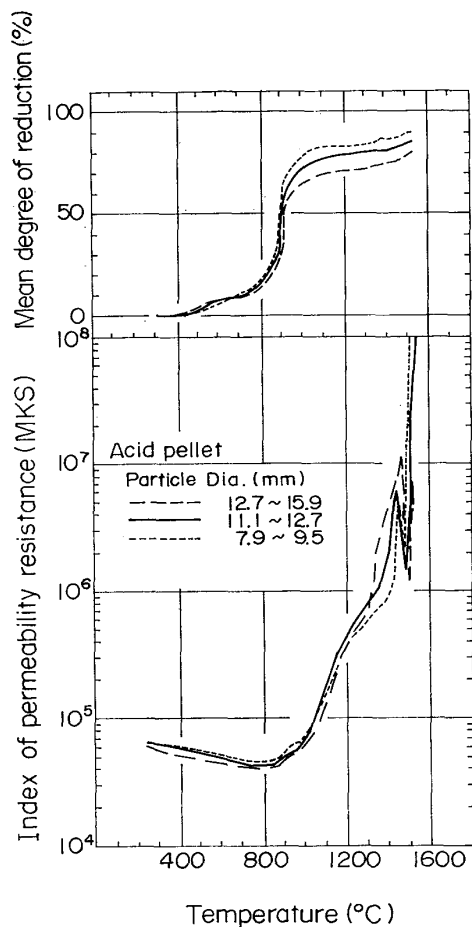


Fig. 5. Effect of particle diameter on degree of reduction and index of permeability resistance.

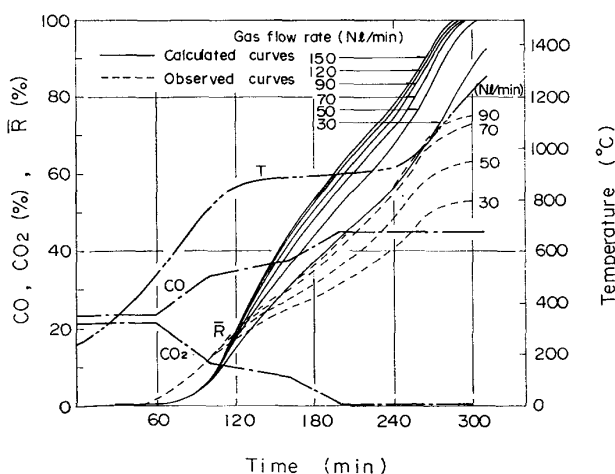


Fig. 6. Comparison of observed reduction curves with calculated ones by three-interface model at various gas flow rate. (Bed height : 64 mm (calculation), 65±5 mm (experiment), Particle diameter : 12 mm (calculation), 11.1~12.7 mm (experiment)).

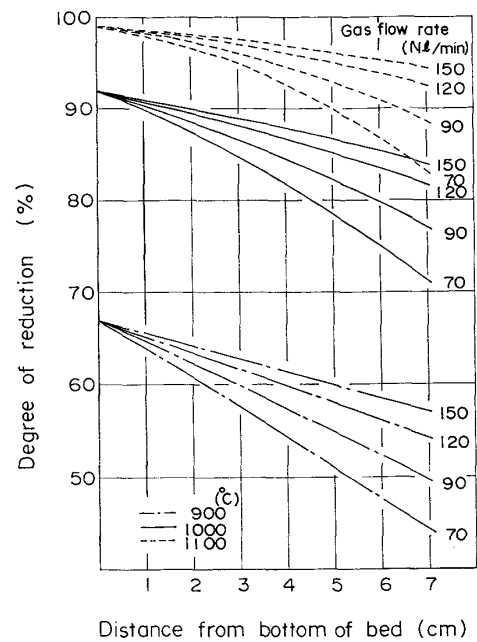


Fig. 7. Effect of gas flow rate on longitudinal distribution of calculated degree of reduction. (Particle diameter : 12 mm).

方向の還元率の幅はできるだけ小さいことが望ましい。また、層高方向の還元率の幅および平均還元率は、試験結果に大きな影響を及ぼし、特に酸性ペレットの場合、その感受性が大きいことが予備試験から判明した。このような理由から、多界面未反応核モデル⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾に基づく固定層還元モデル (Appendix 参照) を用いて、層高方向の還元率分布および平均還元率に及ぼすガス流量、粒度および層高の影響について更に検討した。計算は CO-CO_2 混合ガスによるヘマタイトペレットの還元を対象とした。

ガス流量による層平均還元率の径時変化について、実測値 (予備試験 B-1~B-4, 試料: 酸性ペレット) とその計算値を Fig. 6 に示す。また、その時の還元率分布の計算値を Fig. 7 に示す。比較のため、予備試験 A-4 を所定の温度 (1100, 1300, 1450°C) で中断して実測した還元率分布を Table 3 に示す。更に、到達温度 1000°C における層高方向の還元率の幅および平均還元率のガス流量依存性の計算値を Fig. 8 に示す。

これらの計算値と実測値を比較すると、計算の前提条件がおおむね満足される 1000~1100°C 以下では、絶対値の差はあつても、変化の傾向はかなりよく一致している。従つて、以下に述べる計算結果の特徴は、これ以下の温度領域においては、おおむね実際の試験 (特に酸性ペレットの場合) のそれに対応するものと考えられる。

1) 層高および粒度が一定の場合、1000°C 付近にお

Table 3. Longitudinal distribution of degree of reduction.

			Temperature at interruption of test		
			1 100°C	1 300°C	1 450°C
Sinter	Degree of reduction calculated from chemical analysis	Upper layer	77.7	98.6	98.0
		Middle layer	81.8	97.5	—
		Lower layer	92.1	97.6	95.3
		Ave.	83.9	97.9	96.7
	Mean degree of reduction calculated from oxygen balance in gas		80.0	90.0	94.0
Acid pellet	Degree of reduction calculated from chemical analysis	Upper layer	58.1	82.5	90.1
		Middle layer	61.9	78.2	—
		Lower layer	70.9	79.4	91.1
		Ave.	63.6	80.1	90.6
	Mean degree of reduction calculated from oxygen balance in gas		61.0	70.0	80.0

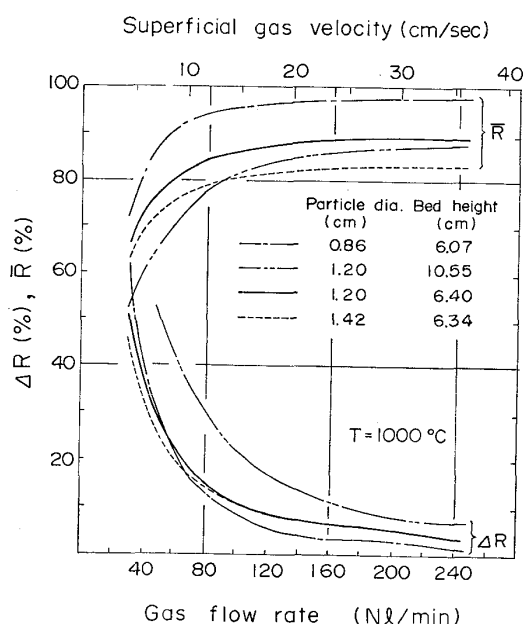


Fig. 8. Effect of gas flow rate, particle diameter and bed height on mean calculated degree of reduction ($\bar{R}$) and the difference in calculated degree of reduction between top and bottom of bed (ΔR).

ける層平均還元率のガス流量依存性は、ある値以上になると急激に小さくなる。この時のガス流量（以後、臨界ガス流量と称す）は、層高 60~70 mm、粒度 8~14 mm のヘマトイトペレットの場合、80~90 Nl/min（空塔速度 12~13 cm/s）である。しかし、臨界ガス流量以上でも層高方向の還元率の幅はかなり大きく、上記の試料条件下で、1000°C におけるこの幅を 5% 程度におさえるためには、200 Nl/min（空塔速度 30 cm/s）以上必要で

ある。

2) 層高一定で粒度を小さくした場合、臨界ガス流量はあまり変化しないが、臨界ガス流量以下での還元率の幅のガス流量依存性が大きくなる。これは、粒度の減少により、単一粒子の総括還元速度が大きくなる結果、低流量側での層高方向のガスの還元ポテンシャルの幅が大きくなるためと考えられる。

3) 臨界ガス流量を低下させるためには、粒度を大きくするより、層高を低くする方が効果的である。

4.4 適正試験条件

以上の結果に基づいて、荷重、ガス流量、粒度および層高の各条件の適正化について検討した。以下に、その内容および結果を示す。

荷重については、高炉内における荷重分布の実測値がほとんどないため、適正条件の判断基準が不明確であるが、筆者らは、荷重による試験結果の変化およびそのばらつきを最小限にすることを判断の基準とし、予備試験結果に基づいて、荷重を 1 kg/cm² に設定した。

ガス流量、粒度および層高については、試験結果に大きな影響を与える層高方向の還元率の幅をできるだけ小さくするという観点から設定した。すなわち、層高は、充填層としての特性が失われず、試験結果のばらつきが大きにならない範囲で、できるだけ小さくすることが望ましく、充填粒子層数として 4~6 層程度が適当と考えられる。ガス流量は、その層高に対応する臨界ガス流量以上にすることが望ましい。粒度については、i) 臨界ガス流量および還元率の幅の粒度依存性はそれ程大きくない、ii) 粒度が丸つぶ径の 1/10 以上になると、るつ

Table 4. Softening and melting characteristics of samples.

Sample	T_1 (°C)	T_2 (°C)	ΔT (°C)	ΣK	$\bar{K}$	$\bar{R}$ (%)	
						at 1 000°C	at 1 200°C
Sinter	1 306	1 491	185	2.2×10^8	4.6×10^5	84	94
Acid pellet	1 217	1 491	274	3.2×10^8	6.5×10^5	69	78

T_1 : Temp. at pressure drop of 100 mmH₂O, T_2 : Temp. at beginning of melt-down, $\bar{R}$: mean degree of reduction

$$\Delta T = T_2 - T_1, \quad \Sigma K = \int_{1000}^{T_2} K dT, \quad \bar{K} = \Sigma K / \Delta T$$

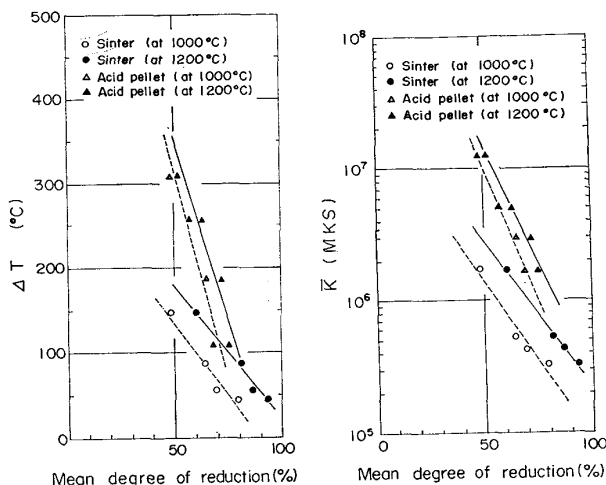


Fig. 9. Relation between softening and melting characteristics and mean degree of reduction achieved at 1000 and 1200°C for sinter and pellets.

ば内壁近傍でのガスの channeling の影響が大きくなる
2), iii) ペレットの平均粒度は 10~15 mm 程度である；
ことなどを考慮すると、筆者らの装置条件では、おのず
から 12 ± 1 mm 程度に限定される。このような理由によ
り、内径 120 mm のるつぼに対して、ガス流量 90 Nl/
min (空塔速度 13.3 cm/s)、粒度 11.1~12.7 mm、層
高 65 ± 5 mm を適正条件として設定した。Fig. 2 に示
した試験条件はこのようにして設定されたものである。

5. 高温性状の評価基準

試験結果から高温性状の良否を評価するための基準に
ついては、高温性状と高炉操業成績とを結びつけるデー
タが十分でないため、必ずしも明確ではないが、高炉解
体調査結果から推定して、次のような評価基準が一例と
して考えられる。すなわち、i) 圧損が 100 mmH₂O
となる温度 (軟化開始温度の近似値) T_1 および滴下開
始温度 T_2 が高く、かつ、その差 $\Delta T (=T_2 - T_1)$ が小
さいこと、ii) T_1 (または 1000°C) ~ T_2 間の通気抵抗
指数の積分値 ΣK およびその温度平均値 $\bar{K}$ が小さいこ
と、iii) 1000~1200°C での到達層平均還元率 $\bar{R}$ が高

いこと；である。

適正試験条件 (Fig. 2) 下で得られた焼結鉱および酸
性ペレットのこれらの特性値を Table 4 に示す。上述
の基準に基づいてこれを評価すると、焼結鉱の高温性状
は、酸性ペレットに比べて、総合的に優れていると考え
られる。しかし、上述の評価基準の妥当性については検
討の余地があり、今後の課題として残される。

ここで注目すべきことは、Fig. 9 にその一部を示すよ
うに、焼結鉱、酸性ペレットいずれについても、1000~
1200°C での到達層平均還元率 $\bar{R}$ が高くなる程、軟化・
溶融特性がよくなっている (T_1 , T_2 が高く、 ΔT , ΣK ,
 $\bar{K}$ が小さくなっている) ことである。これらの結果は
ガス流量の水準を変えた予備試験 (B-1~B-4) から得ら
れたものであり、田代ら¹⁴⁾の結果とも一致する。このこ
とは、高炉操業条件によつてこの温度付近の到達還元率
を高くする (操作特有の被還元性の改善) か、あるい
は、試料固有の被還元性を高くすることができれば、高
炉内での軟化・溶融特性を改善することが可能なことを
示唆している。

逆の見方をすれば、高温性状測定法としての荷重還元
試験においては、試験結果に与える操作特有の被還元性
の影響をできるだけ少なくし、試料固有の被還元性の影
響を最大限に検出できるような試験条件が望ましく、
Fig. 2 に示した適正試験条件は、前述の検討内容から明
らかなように、この要求をほぼ満たしていると考えられ
る。

6. 結 言

高炉内条件に近似させた荷重還元試験について、実測
および固定層還元モデルに基づく計算により、適正試験
条件の検討を行った。また、試験結果から高温性状の良
否を評価する基準についても検討した。

得られた結果を次に要約する。

(1) 荷重、ガス流量、粒度および層高条件のいずれ
の変更によつても、試験結果は変化する。その変化幅は
焼結鉱より酸性ペレットの方が大きい。

(2) 層高方向の還元率の幅はできるだけ小さくする必要があり、そのためには、i) 層高は、充填層としての特性が失われない範囲で、できるだけ小さくする。
ii) 粒度は、10 mm 程度の 1/10 程度にする。
iii) ガス流量は、層平均還元率のガス流量依存性が小さくなるガス流量以上にする；ことが望ましい。また、荷重は、試験結果の荷重依存性が大きくならない範囲で小さくすることが妥当と思われる。このような観点から適正試験条件を設定した。

(3) 高温性状の評価基準として、i) 軟化開始および滴下開始温度が高く、その温度差が小さいこと、ii) 軟化～滴下間の通気抵抗が低いこと、iii) 1000～1200 °C での到達還元率が高いこと；を考えた。この基準からみると、焼結鉄の高温性状は酸性ペレットより優れている。

(4) 1000～1200 °C における到達還元率と軟化・熔融特性の間には密接な関係があり、操作固有あるいは試料固有の被還元性を高くすることによつて、高炉内での軟化・熔融特性を改善できることが推定された。

終わりに、本研究を進めるにあたり、貴重な御助言を賜った東北大学選鉄製錬研究所教授、大森康男博士に深甚なる謝意を表します。

Appendix

多界面未反応核モデルに基づく固定層還元モデル基礎式の誘導にあたり、以下の仮定を設けた。

(i) 層内の温度は均一で、粒子とガスの温度は等しい。

(ii) 粒子径および空隙率は均一かつ一定である。

(iii) ガス流れは押し出し流れである。

以上の仮定のもとで、層内微小体積について、ガスおよび粒子側の物質収支をとると、(A-1)、(A-2) 式が得られる。

$$\frac{\partial R_i}{\partial \theta} = \frac{V_i}{W_p \cdot d_{0,i}} \dots \dots \dots (A-1)$$

$$G \left(\frac{\partial Y}{\partial Z} \right) + \frac{\epsilon_B \cdot G}{U_0} \left(\frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) = - \frac{6(1-\epsilon_B)S}{\pi \cdot D_p^3} \Sigma V_i \dots \dots \dots (A-2)$$

ここに、添字 i は多段反応における i 段目の反応を指し、総括還元率 R は (A-3) 式から求められる。

$$R = 0.1111 R_M + 0.1872 R_W + 0.7017 R_F \dots (A-3)$$

初期および境界条件は、それぞれ (A-4)、(A-5) 式で与えられる。

$$\theta = 0 \quad \text{で} \quad R_i = R_i^\circ \dots \dots \dots (A-4)$$

$$Z = 0 \quad \text{で} \quad Y(\theta) = Y^\circ(\theta) \dots \dots \dots (A-5)$$

(A-1)～(A-3) 式を (A-4)、(A-5) 式および所定の温度条件下で計算すると、任意の時間 θ におけるガス組成 Y 、各段階の還元率 R_i および総括還元率 R の層高方向分布を求めることができる。計算は特性曲線法により行い、数値積分には RUNGE-KUTTA-GILL 法を用いた。なお、時間および距離の差分は、それぞれ $\Delta \theta = 120 \text{ s}$ 、 $\Delta Z = 1/2 D_p$ とした。

単一粒子の総括還元反応速度 V_i の計算には、最初、SPITZER ら¹⁸⁾が提案し、原ら¹⁶⁾が改良した多界面未反応核モデルを用いた。また、これに必要な化学反応速度定数および粒子内有効拡散係数は、いずれも村山ら¹⁷⁾が CO-CO₂ 混合ガスによるヘマタイトペレットの還元実験により求めた値を使用した。ただし、Fe₃O₄→Fe の化学反応速度定数については文献値がないので、便宜的に Fe₂O₃→Fe₃O₄ のそれを使用した。この反応は実際には生じていないため、計算結果には影響がない。また、ガス境界物質移動係数は城塚らの式¹⁹⁾、ガス拡散定数は藤田らの式²⁰⁾、各成分ガスの粘度は SUTHERLAND の式¹⁴⁾、混合ガスの粘度は WILKE の式¹⁴⁾を使用して求めた。

ここで、

$d_{0,i}$: 粒子中の被還元酸素濃度 (g-mol/g)

D_p : 粒子径 (cm)

G : ガス流量 (g-mol/s)

R : 総括還元率 (—)

R_i°, R_i : 初期還元率および還元率 (—)

S : 充填層断面積 (cm²)

U_0 : 標準状態ガス空塔速度 (cm/s)

V_i : 単一粒子の総括還元反応速度 (g-mol/s)

W_p : 粒子 1 個の重量 (g)

Y°, Y : 入口 CO 濃度および CO ガス濃度 (—)

Z : 層底からの距離 (cm)

ϵ_B : 充填層空隙率 (—)

θ : 時間 (s)

添字

i : M(Fe₂O₃→Fe₃O₄), MF(Fe₃O₄→Fe)

W(Fe₃O₄→FeO), F(FeO→Fe)

文 献

- 1) 斧 勝也, 肥田行博, 重見彰利, 児玉惟孝: 鉄と銅, 61(1975), p. 777
- 2) 西田信直, 重見彰利, 斧 勝也, 山口一良: 学振 54 委, 物測小委-5010 (1976) (昭和 51 年 7 月)
- 3) 下村泰人, 有野俊介: 学振 54 委, 物測小委-5205 (1977) (昭和 52 年 7 月)
- 4) 吉永真弓: 学振 54 委, 物測小委-5208 (1978) (昭和 53 年 2 月)

- 5) 吉永真弓, 宮崎富夫, 下田輝久: 学振 54 委, 物測小委-5304 (1978) (昭和 53 年 11 月)
- 6) 下村泰人, 九島行正, 沖川幸生, 有野俊介: 学振 54 委, 物測小委-5306 (1978), (昭和 53 年 11 月)
- 7) O. BURGHARDT and K. GREBE: *Stahl u. Eisen*, 89 (1969), p. 561
- 8) P. BARNABA, M. CECCARINI, and R. FONTANA: *Boll. Tech. Finsider*, Feb. (1976), p. 69
- 9) P. BARNABA and M. PALCHETTI: *Boll. Tech. Finsider*, Dec. (1976), p. 744
- 10) 福安憲司, 石井邦宜, 近藤真一, 吉井周雄: 学振 54 委, 反速小委-87 (1978) (昭和 53 年 11 月)
- 11) 田代 清, 相馬英明, 高田 司: 「還元研究会」資料 (1979) (昭和 54 年 3 月)
- 12) 土屋 脩, 小野田守, 藤田勇雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 349
- 13) 成田貴一, 前川昌大, 北村雅司, 金山宏志: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 368
- 14) 佐藤一雄: 物性定数推算法, (1972), p. 77 [丸善]
- 15) K. POLTHIER: *Stahl u. Eisen*, 87 (1967), p. 960
- 16) 原 行明: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1894
- 17) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1099
- 18) R. H. SPITZER, F. S. MANNING and W. O. PHILBROOK: *Trans. Met. Soc. AIME*, 242 (1968), p. 618
- 19) 城塚 正, 平田 彰, 村山昭彦: 化学技術者のための移動速度論, (1965), p. 241 [オーム社]
- 20) 藤田重文: 化学機械, 15 (1951), p. 234
- 21) 山岡洋次郎, 堀田裕久, 梶川脩二: 鉄と鋼に投稿中