
アトマイズ鉄粉の製造とその粉末冶金的特性

On the Production and Powder Metallurgical Characteristics of the Atomized Iron Powders

岸 高 寿 (Hisashi Kishitaka) 森岡 恭昭 (Yasuaki Morioka) 田村 皖 司 (Kiyoji Tamura)

要旨：

水アトマイズ鉄粉の製造過程の原理，製造装置およびその粉末冶金的特性について解説した。アトマイズの過程についてその化学工学的な理論が検討され，また得られた粉末粒子の平均粒径とアトマイズ条件との関係が述べられた。粉末冶金的特性についてはアトマイズ法およびその他の方法でつくられた鉄粉の間の性質の違いが検討された。また試作された合金鋼アトマイズ粉の特性が示された。

Synopsis：

The principle of the process and the equipment for the production of water atomized iron powders, as well as powder metallurgical characteristics of the products, are explained. The process of atomization has been investigated from the viewpoint of the theories of chemical engineering, and the relation between the average diameter of produced powder particles and the condition of atomization has been described. On the powder metallurgical characteristics, the difference between the qualities of the iron powders which are produced by atomization and by the method, together with the characteristics of the atomized alloy steel powders, has also been described.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

アトマイズ鉄粉の製造とその粉末冶金的特性

On the Production and Powder Metallurgical Characteristics of the Atomized Iron Powders

岸 高 寿*

Hisashi Kishitaka

森 岡 恭 昭**

Yasuaki Morioka

田 村 皖 司***

Kiyoji Tamura

Synopsis:

The principle of the process and the equipment for the production of water atomized iron powders, as well as powder metallurgical characteristics of the products, are explained. The process of atomization has been investigated from the viewpoint of the theories of chemical engineering, and the relation between the average diameter of produced powder particles and the condition of atomization has been described.

On the powder metallurgical characteristics, the difference between the qualities of the iron powders which are produced by atomization and by the methods, together with the characteristics of the atomized alloy steel powders, has also been described.

1. 諸 言

近年における鉄系粉末冶金製品の生産の伸びには著しいものがあり、その製品の種類もきわめて多岐にわたっている。それにともなって原料としての鉄粉の需要も量的に増加するとともに質的にも多様化しつつある。とくに従来粉末冶金用鉄粉の主流を占めてきた低密度および中密度部品用の鉄粉のほかに圧粉密度で 7.0 g/cm^3 あるいはそれ以上のいわゆる高密度部品用の鉄粉あるいは合金鋼粉などが要求されるようになってきた。需要におけるこのような変化に対して、還元鉄粉は原料として用いられる酸化鉄が固相で還元される際に生ずる粒子の内部気孔の存在のために一回の加圧成形工程では高い密度を得ることが困難であり、また還元法はその製造工程において鉄粉の化学成分を調整することは難かしく合金鋼粉の製造には適さない。

このような問題点を解決するための最も有力な方法として考えられるのが熔融金属を直接粉化させるいわゆるアトマイズ法（噴霧法ともいう）である。この方法によれば内部気孔がほとんどない比較的平滑な表面をもった金属の微粒子が容易に得られ、また任意の成分をもった合金粉をつくることも可能である。当社においても鉄粉の需要における質的な多様化に応ずるためにアトマイズ法による鉄粉の製造が考慮され、科学技術庁金属材料技術研究所の開発による水アトマイズ法¹⁾（日本国特許第552253）を採用することになった。ここにその方法、装置およびそれに関する化学工学的考察の概要とアトマイズ鉄粉の粉末冶金的な特性について述べることにする。

2. アトマイズ法の原理

一般に金属粉末の製造法としての水アトマイズ法は基本的にはある液体の流れにそれよりもはる

* 技術研究所粉体研究室室長

*** 金属材料技術研究所粉末冶金研究室室長 工学博士

** 技術研究所粉体研究室主任研究員 工学博士

かに大きい速度をもった別の流体の流れを接触させてはじめての液体を分散させる間接噴霧法の一種で、分散される液体が熔融金属でありそれに接触させる高速流体として水を用いたものと考えられる。そこでここでは一般的にアトマイズ法の原理について考えてみる。

2・1 粉碎仕事について

アトマイズ法において液体が微粒子状に分散される過程は力学的な仕事による物質の微粒子化という点では固体の衝撃による粉碎の過程に類似している。これを模型的に説明してみよう。固体の衝撃粉碎の一例として運動している鋼球が別の静止物体に衝突しその物体がいくつかの破片に割れる過程を考えた場合、粉碎に必要なエネルギーははじめに鋼球の運動エネルギーとして与えられ、それが衝突の過程で粉碎の仕事に変化するのである。次に液体の噴霧過程について考えてみよう。この過程は次の2つの種類に大別することができる。1つは分散されるべき液体を直接加速するもので直接噴霧法とよばれている。他の1つはまず別の流体（これを噴霧媒体という）を加速しておきそれを分散されるべき液体に接触させる方法で間接噴霧法とよばれている。**Fig. 1 (a)**に直接噴霧法の例を模型的に示す。すなわち分散される液体は小孔から高速度で噴射され、もしこの液体に表面張力がなければそれは連続した流線を保って運動を続けるであろう、しかし実際の液体は通常は正の値の表面張力をもっているのは最小の表面積を持つとして球状に分裂し分散が起こる。この場合粉碎に必要なエネルギーははじめに液体の運動エネルギーとして与えられ、それが自らの流動による表面積の増加の過程で粉碎仕事に変化するのである。次に**Fig. 1 (b)**に間接噴霧法の例を模型的に示す。この場合分散されるべき液体は高速度で運動している噴霧媒体に接触して加速され同時に球状に分裂して分散が起こるのである。そうして粉碎に必要なエネルギーははじめに噴霧媒体の運動エネルギーとして与えられそれが分散される液体との接触の過程で粉碎仕事に変化するのである。熔融金属のアトマイズ法としては通常この間接噴霧法が用いられ使用する噴霧媒体

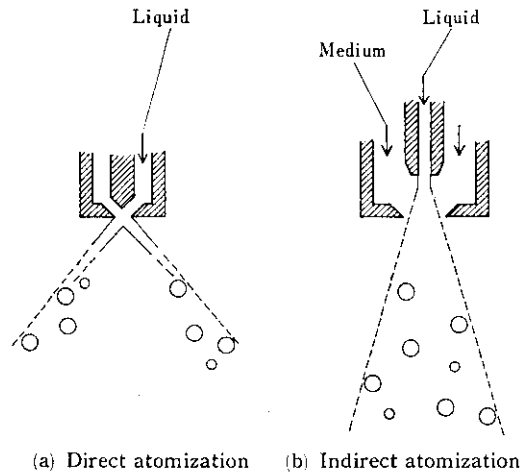


Fig. 1 Models of atomization

の種類に応じて水アトマイズ法あるいはガスアトマイズ法とよばれている。

このような噴霧の過程については実用的な必要から多くの研究が行なわれてきたが、この過程に対する厳密な意味での数学的な解析はこれに関係する因子が複雑で不明な点が多いために未だ成功していない。

ここではこの熔融金属の間接噴霧法における分散過程について、それに関係する因子の間になりたつエネルギー保存の法則を未知の因子を含めたままで数式化してみることとする。

この分散過程が連続的に進行し定常状態にあるものとすればこれに関係する各エネルギー項の間に次の式がなりたつ。

$$K_1 = K_2 + E_s + E_l \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 1)$$

K_1 : 単位時間当りに分散過程に持ち込まれる運動エネルギー

K_2 : 単位時間当りに分散過程から持ち出される運動エネルギー

E_s : 単位時間当りに分散過程から持ち出される表面エネルギー

E_l : 単位時間当りに分散過程内で粘性抵抗により熱エネルギーに転化する仕事

ここでこの分散過程について次の仮定

- (1) 熔融金属のこの過程への流入速度はあまり大きくなくそれによって持ち込まれる運動エネルギーの量は噴霧媒体のそれに比べて小さ

く無視することができる

- (2) 熔融金属の分散はその凝固のためにきわめて短い時間で終了してしまうので、その時点においては媒体自身はほとんど分散されていないものと考えられる
- (3) 熔融金属と噴霧媒体との界面エネルギーは媒体として水が用いられる場合でもその界面には水蒸気の薄層が存在し、また沸点における水蒸気と水の界面エネルギーに比べて十分に小さいので、熔融金属自身の表面エネルギーで置き換えることができる
- (4) この分散過程において熱エネルギーの仕事への転化は起こらない

がなりたつものとすれば (2・1) 式はさらに具体的に次のように書くことができる。

$$\frac{W_m v_m^2}{2} - \frac{(W_m + W_p) v_p^2}{2} = \frac{6W_p \gamma_p \phi_p}{d_p \bar{D}_p} + E_i \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 2)$$

W_m : 噴霧媒体の単位時間当りの重量流量 (kg/h)

W_p : 熔融金属の単位時間当りの重量流量 (kg/h)

v_m : 噴霧媒体の初期噴射速度 (m/h)

v_p : 分散終了時の金属粒子と媒体の平均速度 (m/h)

γ_p : 熔融金属の表面エネルギー (kg/h²)

d_p : 熔融金属の密度 (kg/m³)

$\bar{D}_p$: 分散された熔融金属粒子の調和平均直径 (m)

ϕ_p : 分散された熔融金属粒子の形状係数 (無次元)

ここで (2・2) 式の主要な項が実際にどのような値をもっているか調べてみよう。まず噴霧媒体の運動エネルギーの供給量を示す左辺第1項の値は媒体を水としその流量を 12×10^3 kg/h、また噴射口の面積を 2×10^{-5} m² として計算すれば 2.16×10^{15} kgm²/h³ となる。これに対して熔融金属の分散直後の表面エネルギーの発生量を示す右辺の第1項の値は金属の種類を鉄とした場合その温度を $1,550^\circ\text{C}$ 、流量を 300 kg/h および形状係数を1

として $1,550^\circ\text{C}$ の鉄の物性値を用いて計算すれば 99.6×10^9 kg m²/h³ となる。この両者を比較すれば噴霧媒体によるエネルギーの供給量は熔融金属の分散のために必要なエネルギーの量に対して圧倒的に大きいことがわかる。

2・2 分散粒子の平均粒径について

間接噴霧法の分散過程における仕事の伝達の機構はまだ明らかにされていないので、(2・2) 式における未知の因子 v_p 、 E_i を分散過程の境界条件から解析的に計算しそれによって分散粒子の平均粒径と噴霧条件との関係を求めることはできない。またこの場合の各因子間の無次元化された実験式もまだ得られていない。しかし無次元化されてはいないが気体による液体の間接噴霧について分散粒子の平均直径と噴霧条件との関係を比較的によく表わすといわれている抜山らの実験式⁵⁾にここで用いられた各因子をあてはめると次の式が得られる。

$$\bar{D}_p = \frac{0.585}{v_m} \left(\frac{\gamma_p}{d_p} \right)^{1/2} + 1.683 \times 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\mu_p}{(\gamma_p d_p)^{1/2}} \right\}^{0.45} \left(\frac{W_p}{W_m} \right) \dots\dots\dots (2 \cdot 3)$$

$$\frac{W_p}{W_m} < 0.1$$

ここに μ_p は熔融金属の粘性係数 (kg/mh) である。

実際に熔融金属を水でアトマイズして得られた粉末の調和平均直径の実験値とその際の実験条件から (2・3) 式を用いて計算された平均直径の値との比較を Table 1 に示す。

2・3 分散粒子の冷却と凝固

ここで分散された熔融金属の凝固について考えてみよう。熔融金属粒子のガス中における冷却速度について粒子の形状が球であると仮定すれば熱伝達に関する化学工学的な実験式から次の式が得られる。

$$\frac{dt_p}{\tau} = \frac{6\lambda_g(t_p - \bar{t}_g)}{d_p C_{pM} \bar{D}_p^2} \left\{ 2.0 + 0.60 \times \left(\frac{D_p d_p}{\mu_g} \right)^{1/2} \left(\frac{C_{pM} W_p t_g}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right\} \dots\dots\dots (2 \cdot 4)$$

Table 1 Experimental and calculated values of harmonic average diameter of atomized metal powder particles

Ex.No.	Kind of metals	Velocity of water jet	Flow rate of molten metal	Flow rate of water	Harmonic average diameter, $\bar{D}_p$	
		v_m	W_p	W_m	Experimental	Calculated
		$\times 10^3$ m/h	kg/h	$\times 10^3$ kg/h	$\times 10^{-6}$ m	$\times 10^{-6}$ m
1	Fe	666	277	15.05	53	51
2	Fe	598	277	15.79	48	57
3	Fe	523	277	17.73	47	65
4	Fe	496	277	18.69	52	68
5	Fe	412	370	18.59	53	82
6	Fe	601	370	13.59	54	57
7	Fe	432	370	9.76	67	79
8	Fe	601	370	13.59	59	57
9	Fe	601	370	13.59	53	57
10	Cu	609	300	13.81	40	44

 D_p : 球状粒子の直径 (m) t_p : 溶融金属粒子の表面温度 ($^{\circ}\text{C}$) Δt_p : 溶融金属粒子の表面温度の降下 ($^{\circ}\text{C}$) $\Delta \tau$: 経過時間 (h) C_{pMe} : 溶融金属の定圧比熱 (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$) $\bar{t}_g$: 粒子の周辺の境界層外のガス体の平均温度 ($^{\circ}\text{C}$) λ_g : 粒子の周辺のガス体の熱伝導度 (kcal/mh $^{\circ}\text{C}$) d_g : 粒子の周辺のガス体の密度 (kg/m 3) μ_g : 粒子の周辺のガス体の粘性係数 (kg/mh) C_{pgw} : 粒子の周辺のガス体の重量基準の比熱 (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$) Δv : 粒子とガス体の平均相対速度 (m/h)

(2・4) 式を用いて100 $^{\circ}\text{C}$ の水蒸気中における1,550 $^{\circ}\text{C}$ の溶融鉄の微小球体の表面の冷却速度を、水蒸気と球体の相対速度を300 $\times 10^3$ m/hとして計算した結果をTable 2に示す。

この数値を見れば分散された溶融金属の粒子の冷却速度はきわめて大きくそれは急速に凝固するであろうということが予想される。すなわち分散される溶融金属の流量に対して噴霧媒体の流量が

Table 2 Cooling rates of the surface of spherical molten iron particle in water vapor

Diameter of the sphere	Cooling rate
μ	$^{\circ}\text{C/h}$
25	1.830×10^9
50	0.551×10^9
100	0.171×10^9
200	0.054×10^9

十分に大きければ分散された粒子にきわめて短い時間内に凝固し再分散はほとんどなく、場合によってはそれが独立した球形をつくる以前に凝固してしまうこともあり、そのような形状の粒子の存在も実験的に確かめられている。

3. 製造方法と装置

水アトマイズ法による鉄粉の製造工程のブロック図をFig. 2に示す。ここではこの工程の主要な部分についてその装置と各過程の化学工学的な取扱いについて述べる。

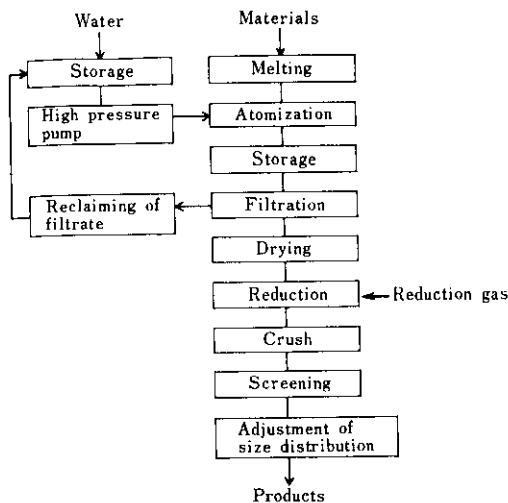


Fig. 2 Production process of the water atomized iron powder

3.1 溶解およびアトマイズ

この工程は水アトマイズ法において最も重要な部分である。これに使用される装置は材料を溶解するための電気炉、溶湯を一時貯溜し細流として流下させるためのノズルをもったつぼ、それを保温するための加熱装置、水を噴射させるための水ノズルおよびそれに高圧で水を供給するための加圧ポンプなどからなりたっている。その概要を Fig. 3 に示す。

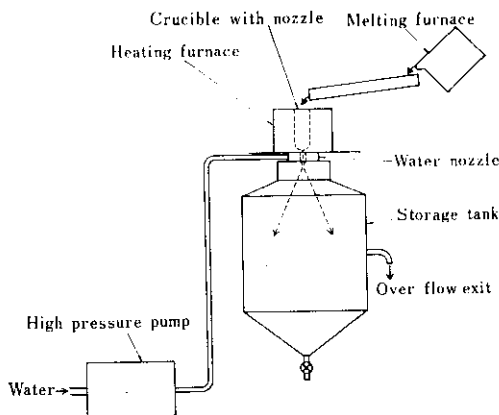


Fig. 3 Equipments for melting and atomization

溶解炉としては誘導加熱炉が用いられまた溶湯保持用のノズル付きるつぼの加熱にはるつぼが空の状態でも加熱できるように外熱式の抵抗炉が用いられる。

るつぼはアトマイズ中の湯面の高さの変動を少なくするためある程度以上の大きさのものが必要である。るつぼの底部に取付けられたノズルを通して流下する溶湯の量は円管内流動の圧力損失に関する実験的な法則にもとづき次の3つの式を用いて計算することができる。

$$R_e = \frac{1}{3.2 f^{1/4}} - \frac{1}{2} \log f - \frac{1.2}{3.2} \quad (3.1)$$

$$h = \frac{\mu_p^2 R_e^2}{8 g d_p^2 r_1^2} \left(1 + \frac{2 f \ell_1}{r_1} \right) \quad (3.2)$$

$$W_p = \frac{R_e \pi r_1 \mu_p}{2} \quad (3.3)$$

$$3000 < R_e < 3.24 \times 10^6$$

ℓ_1 : 溶湯ノズル孔の長さ (m)

r_1 : 溶湯ノズル孔の半径 (m)

h : るつぼ内の溶湯の深さ (m)

R_e : レイノズル数 (無次元)

f : パラメーター (無次元)

g : 重力加速度 (127.094×10^3) (m/h²)

溶湯の物性として 1550°C における鉄についての数値を用い ℓ_1 を 50mm として求められた W_p と h および r_1 との関係を図 4 に示す。

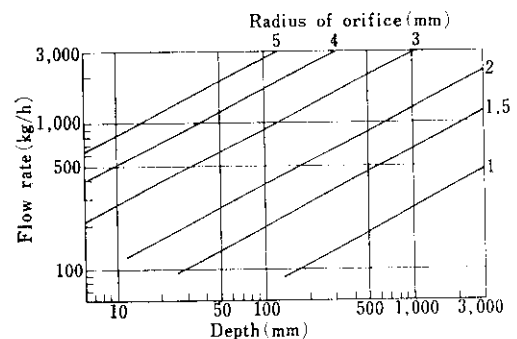


Fig. 4 Relation between flow rate and depth of molten iron for radius of orifice in molten metal nozzle

水を噴射するためのノズルとして金材技研方式においては環帯状の射出スリットをもったものが用いられ水はそこから斜め下向きに噴射され逆円錐面状の水膜を形成する。この水ノズルと溶湯ノズルの相互の関係を Fig. 5 に示す。またノズルに水を供給するポンプとしては加圧力が高く流量および圧力の変動の少ないものが要求される。

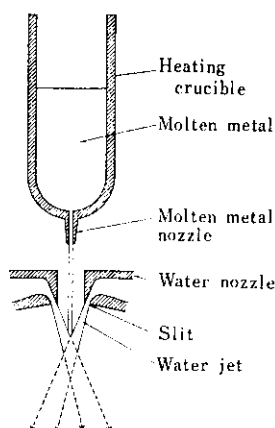


Fig. 5 Schematic model of atomizing unit

3.2 捕集, 脱水および乾燥

アトマイズされた粉末は水とともにノズルの下方に設けられた貯溜槽に一時的に蓄積される。ここで粉末は槽の底部に沈下し余分の水は槽の中央部側面のオーバーフロー流出口から排出される。

一般に媒体中を重力によって沈下する球に近い形状の粒子は媒体に対して次のストークスの式で表わされる終末速度をもつ。

$$v_f = \frac{g(d_s - d_m) D_s^2}{18 \mu_m} \quad (3.4)$$

$$R_e = \frac{d_m v_f D_s}{\mu_m} < 2$$

d_s : 粒子の密度 (kg/m³)

D_s : 粒子の相当直径 (m)

v_f : 粒子の沈降の終末速度 (m/h)

μ_m : 媒体の粘性係数 (kg/mh)

したがってこの終末速度の値が貯溜槽内の水の上昇速度よりも小さい微粒子は沈降せずにオーバーフロー流出口より水とともに排出され、ここでアトマイズ粉末の一部について分級が行なわれることになる。鉄の粒子が40°Cの水中を沈下する場合について各物性値を(3.4)式に入れて計算すれば次の式が得られる。

$$v_f = 20.68 \times 10^3 \times D_s^2 \quad (3.5)$$

貯溜槽の底に沈んだ粉末は水とともに取り出され濾布上で脱水されたのち乾燥される。乾燥には粉末の酸化が進行するのを避けるために赤外線輻射を用いた急速乾燥装置が適している。

3.3 仕上還元

乾燥された粉末はアトマイズ工程において粒子の表面に生じた鉄の酸化物を金属に還元した急激な冷却によって粒子内に生じた歪みを除去するために水素を含む還元雰囲気中で高温に加熱し還元される。アトマイズの際の鉄の酸化は高温における鉄と水蒸気との反応によるもので、ノズルの周辺の空気をあらかじめ不活性ガスで置換しても避けることはできない。実際の低炭素鋼アトマイズ粉の仕上還元前の酸素含有量はおよそ3~6%である。

乾燥後の低炭素鋼アトマイズ粉をAXガス雰囲気中にて900°Cで還元した場合の還元減量および粒子の硬さの変化の一例をTable 3に示す。

Table 3 Effects of finishing reduction for the atomized iron powder

Reduction time	Reduction loss	Micro-vickers hardness of particle
h	%	μHv
0	2.94	362
0.5	0.33	—
1.0	0.17	118
2.0	0.15	98
3.0	0.06	90

Reduction atmosphere AX gas
Reduction temperature 900°C

3.4 解砕および粒度調整

仕上還元された粉末粒子は互いに弱く焼結しているのをそれをほぐすために機械的な粉碎装置(たとえばハンマーミル)を用いて解砕される。解砕後の粉末は篩分けおよび再混合の過程によりその用途に応じて粒度分布が調整される。

4. アトマイズ鉄粉の特性

ここではアトマイズ法によってつくられた鉄粉の特性と還元法あるいは電解法によってつくられた鉄粉のそれとの違いについて述べることにする。これらの鉄粉の特性の差異は本質的には、ア

アトマイズ鉄粉が液体の分散とその冷却凝固という過程を経てつくられるのに対し、還元鉄粉は酸化鉄の機械的粉碎とその還元過程を、また電解鉄粉は溶液よりの金属鉄の析出とその機械的粉碎の過程を経てつくられるという製造過程の違いに起因している。ここでは鉄粉の特性として粉末冶金用の材料としてとくに重要なものについてその製造上の各種の因子との関係について考えてみることにする。Table 4 に今回試作されたアトマイズ鉄粉とその他の方法でつくられた鉄粉の粉末冶金的特性値の代表的な例を示す。

4.1 粉体特性

まず粉体特性として見掛け密度および流動性について考えてみる。これらの特性は粉体がとくに外圧が加えられない状態で自然に堆積あるいは流動する場合の性質を表わすもので主として粒子の形状（寸法も含む）および表面の状態によってきまるものと考えられる。Photo. 1 に各種の方法によってつくられた鉄粉粒子の形態的な特長を表わす粒子断面の光学顕微鏡写真を、また Photo. 2 に走査電顕像の代表的な例を示す。

(1) 見掛け密度

一般に固体粒子の集合体としての粉体の見掛け密度については次の式がなりたつ。

$$d_t = \frac{w_p}{\frac{w_p}{d_p} + v_n + v_i} \quad (4.1)$$

d_t : 粉体の見掛け密度 (g/cm³)

w_p : 粉体の重量 (g)

d_p : 粉体粒子の真密度 (g/cm³)

v_n : 粉体粒子の内部気孔の容積 (cm³)

v_i : 粉体の粒子間の空間容積 (cm³)

ここにおいて d_p は粉体粒子を構成する物質によって定まるので鉄粉のみについて考える場合にはほとんど一定である。 v_n は還元鉄粉の場合は製造の際の還元の過程で内部気孔が生じやすいのでその値は比較的に大きい。それに対してアトマイズ鉄粉および電解鉄粉の場合はその製造方法にとくに内部気孔の生じやすい過程は含まれていないのでその値は小さい。また v_i は粒子が自然に堆積したときの充填の程度によってきまりその値は粒子の形状が複雑で粒子相互間の静止摩擦係数が大きいほど増大する。還元鉄粉においてはその粒子の形状は原料酸化物の粉碎の過程できまるので複雑で角が多くまた

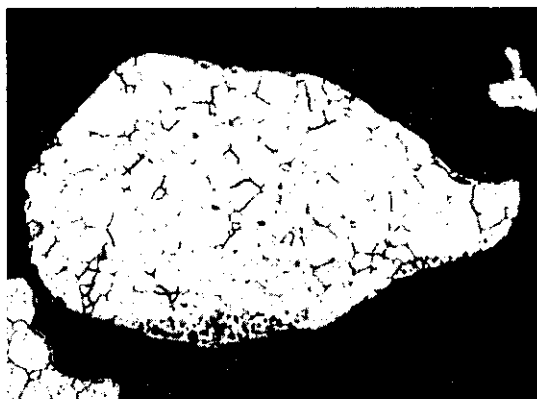
Table 4 Powder metallurgical characteristics of various kinds of iron powders

Method of production	Characteristics of powders			Characteristics of green compacts		Characteristics of sintered compacts			
	Apparent density	Flow rate	Reduction loss	Density	Rattler value	Density	Dimensional change on sintering	Tensile strength	Elongation
	g/cm ³	sec/50g	%	g/cm ³	%	g/cm ³	%	kg/mm ²	%
Atomization of low carbon steel	2.64	25.3	0.15	6.92	0.74	6.90	-0.18	18.8	17.9
	2.63	27.0	0.12	7.02	0.98	7.10	-0.11	17.2	12.7
Atomization of electrolytic iron	2.77	24.1	0.18	6.96	1.16	6.99	-0.17	17.1	12.9
Crushing of electrolytic iron	2.78	25.5	0.67	6.91	2.20	6.85	-0.01	19.0	10.8
Reduction of iron ore	2.42	31.1	0.49	6.65	0.36	6.6	-0.21	15.2	9.5
Reduction of steel mill scale	2.54	27.4	0.22	6.83	0.45	6.8	-0.24	16.5	12.1

Compacting pressure: 5 t/cm²

Sintering atmosphere: AX gas

Sintering temperature and time: 1,150°C×1 h



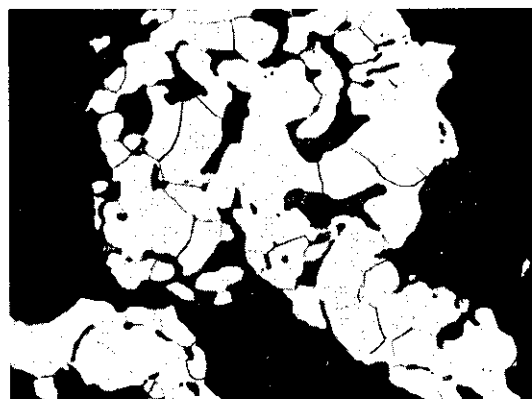
(a) Atomized iron



(b) Crushed electrolytic iron

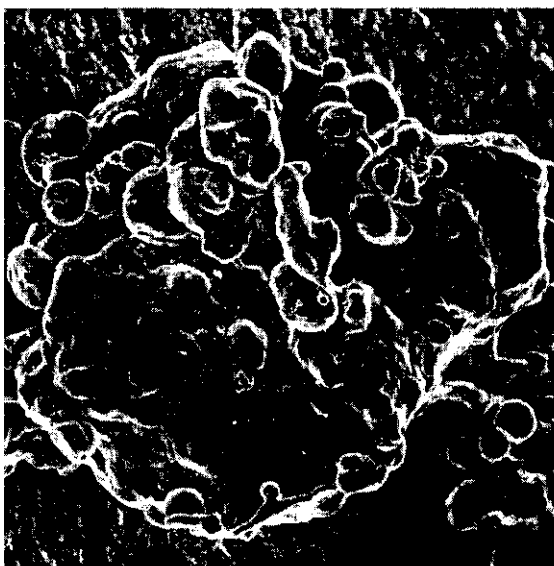


(c) Reduced iron ore

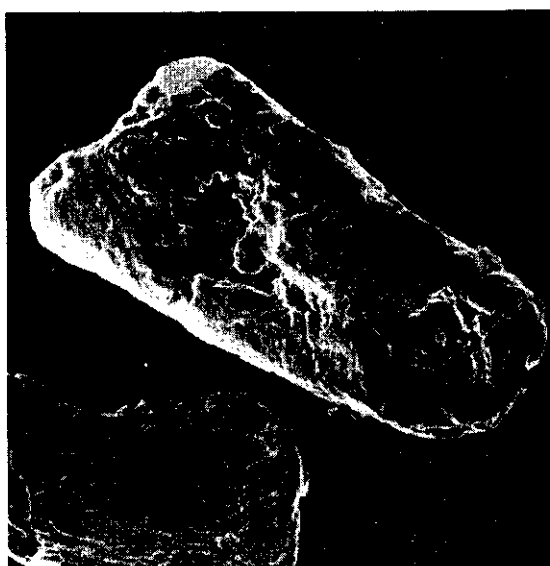


(d) Reduced steel mill scale

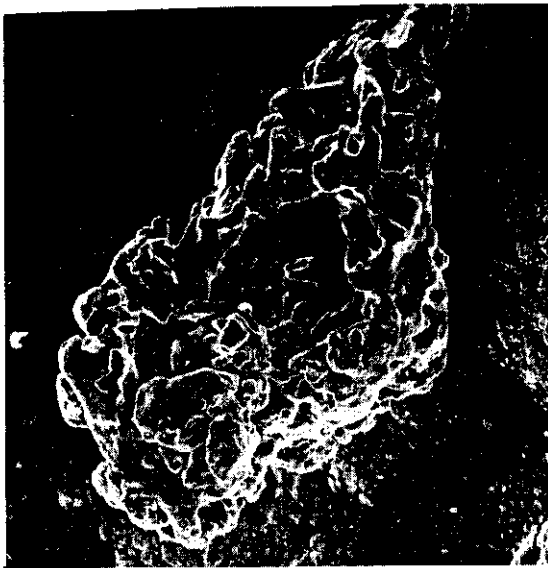
Photo. 1 Optical micrographs of various kinds of iron powder particles ($\times 400$)



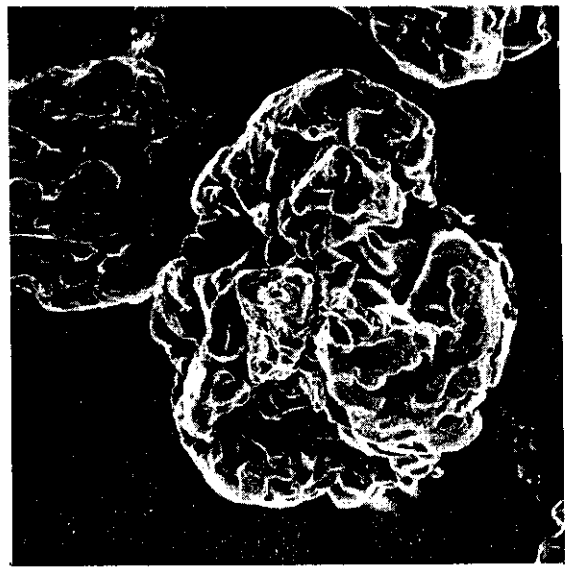
(a) Atomized iron



(b) Crushed electrolytic iron



(c) Reduced iron ore



(d) Reduced steel mill scale

Photo. 2 Scanning electron microscopic figures of various kinds of iron powder particles (×400)

表面も粗い。これに対してアトマイズ鉄粉の粒子は液体の分散によって生じた液滴が凝固したものであるためその形状は丸味があり表面も滑らかである。また電解鉄粉の粒子は平行な劈開面をもった電解析出物を機械的な衝撃によって粉碎したものであるために薄片状の形と滑らかな表面をもっている。しかるに滑らかな表面をもった粒子相互間の静止摩擦係数は粗い表面をもったものに比べて小さいから、粒子の形状も含めた総合的な効果により見掛密度についてはアトマイズ鉄粉あるいは電解鉄粉の方が、還元鉄粉よりも高い値のものが得られやすい。

(2) 流動性

一般に粉体の流動性は粒子相互間の動摩擦係数の値が小さいほど良くなる。そうしてこの動摩擦係数は粒子の形状によるその相互間のからみ合いが弱く粒子の表面が滑らかなほど小さい。したがって見掛密度の場合と同様に粉末の製造方法の違いによる粒子の形態的な特性の差から、アトマイズ鉄粉あるいは電解鉄粉の方が還元鉄粉よりも流動性が良い場合が多い。

4.2 圧縮性

粉体の圧縮性は通常それを金型の中に入れ圧縮

したときに得られる成形体の見掛上の密度、いわゆる圧粉密度とその成形圧力との関係によって表示される。この圧粉密度については前節の場合と同様に次の式がなりたつ。

$$d_c(p) = \frac{w_p}{\frac{w_p}{d_p} + v_n + v_i(p)} \quad \dots\dots\dots(4 \cdot 2)$$

p : 成形圧力 (t/cm²)

$d_c(p)$: p の関数としての圧粉密度 (g/cm³)

$v_i(p)$: p の関数としての粒子間の空間容積 (cm³)

粒子内気孔の大きさが圧縮成形の過程で変化しないものとすれば、圧粉密度と自然堆積の場合の見掛密度の違いは粒子間の空間容積が成形圧力の増加とともに急速に減少することによるものと考えられる。この粒子間の空間容積の大きさは自然堆積の場合と同様に粒子の形状が複雑で粒子相互間の静止摩擦係数が大きいほど増加するものと考えられる。ただこの場合は加圧によって粒子の形状が変化する点が異なっている。したがって粉体の圧縮性をきめる因子としては成形前の粒子の形状と粒子表面の滑らかさのほかに粒子の変形に対する抵抗性を加えなければならない。この粒子の変形に対する抵抗性は主としてそれを構成する物

質の化学成分とそれが受けた熱履歴によって定まるので、そのような条件が等しい材質をもった粒子からなりたつ粉体の圧縮性は、成形の際に用いられる潤滑剤についての条件が一定であれば前節にのべたような粉体粒子の形態的な特性によってのみ決定される。そのために同じ材質のものであるアトマイズ鉄粉あるいは電解鉄粉は還元鉄粉に比べて圧縮性のすぐれたものが得られやすい。

Fig. 6 に各種の鉄粉の圧縮曲線を示す。

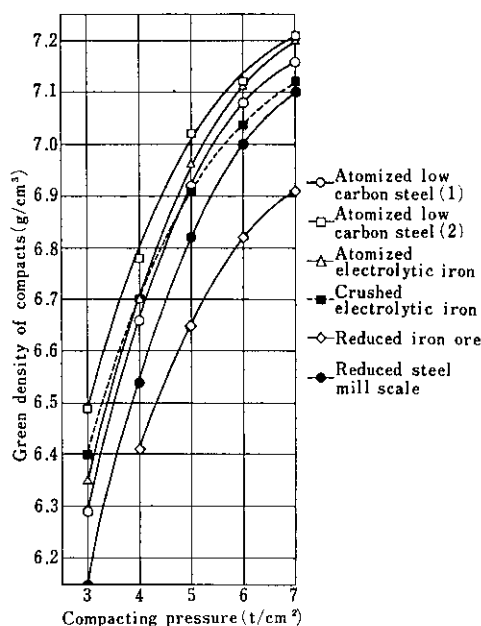


Fig. 6 Compressibility of various kinds of iron powders

4.3 圧粉体の強さ

粉体を圧縮して得られる成形体の機械的な強さは成形体内部における粒子相互の空間的なからみ合いが強く、粒子相互間の静止摩擦係数が大きいほど増大する。しかしこれらの条件は同時に粉体の流動性および圧縮性を悪くする原因でもあるので、流動性および圧縮性がすぐれているアトマイズ鉄粉あるいは電解鉄粉は一方において圧粉体の強度が還元鉄粉に劣る場合が多い。しかしアトマイズ鉄粉においては製造条件を適当に選ぶことにより粒子の形状を単純な水滴形ではなく小さな球状粒子がいくつか融着した形にすることも可能なので、この方法によって圧縮性をいくらか低

下させるだけで圧粉体強度を改善することができる。

4.4 焼結性

ここで粉体の焼結性というのはその成形体を高温で加熱した場合に起こる粒子間の結合、結晶の成長、変態および添加された物質と粒子との反応などの起こりやすさを総称したものである。これらの現象は一般に粒子を構成する結晶の内部および表面において原子（イオン）あるいはその空孔の移動が容易なほど起こりやすい。したがって粉体の焼結性はその粒度構成が同じ場合にはその粉体粒子の材質および表面の状態によってきまるものと考えられる。実際にアトマイズ鉄粉、電解鉄粉および還元鉄粉の3者の間においてはその成分および酸化度が同じ場合にはその焼結性にはあまり差が見られない。

しかしこの焼結性の一部を表わすところの焼結の前後における成形体の寸法変化については、電解鉄粉は粒子の形状および結晶組織に大きな異方性があるので成形時に粉末粒子が特定の方向に並びやすく加圧する方向に対する相対的な方位によって異った値を示すが、アトマイズ鉄粉はその生成過程からみて形状的にも材質的にも等方性でありその値に方向性は見られない。

また粉末の焼結性は主として粒子の材質に支配されるのでアトマイズ鉄粉においては使用する溶湯の成分を調整することによりその焼結性を変えることが可能である。

4.5 焼結体の強度

粉末の焼結体は一般的には空孔をもった均質な固体と考えられ、その機械的な強度はそれを構成する固相部分の機械的な強度が大きく空孔の量が小さいほど増加する。またそれは空孔の形状によっても変化するがその影響はあまり大きくない。また固相部分の機械的な強度はその成分および熱履歴によって定まりその影響はきわめて大きい。

アトマイズ鉄粉あるいは電解鉄粉は圧縮性がすぐれているので同じ成分のものでも還元鉄粉に比べて空孔の少ない見掛け密度をもった焼結体を得られやすく、強度の高い焼結体の製造に適している。

5. 合金鋼アトマイズ粉

アトマイズ法によれば任意の成分をもった合金鋼の粉末を容易につくることができることはすでに述べたとおりである。将来はアトマイズ法の発達により各種の合金鋼粉末がこの方法によってつくられるようになるものと思われる。

しかし合金の種類によっては焼鈍後もその硬度が高くそれによって構成されている粉体粒子の変形に対する抵抗がきわめて大きく圧縮性の良い粉末が得られない場合もあり、鋳造あるいは圧延用

の材料として開発された合金と同じ成分をもった粉末が必ずしも焼結製品の製造に適しているとは限らない。そこで今後は粉末冶金のための新しい成分の合金鋼の開発が必要であろうと思われる。

Table 5 に試作された合金鋼アトマイズ粉の特性の一例を示す。

6. 結 言

以上述べたようにアトマイズ鉄粉の粉末冶金的な特性はその成分およびアトマイズ条件を選ぶことによりある範囲内で変えることが可能であるので、今後は成分についての冶金学的な研究およびアトマイズ条件についての化学工学的な研究を進め新しい特性をもった鉄粉の開発に役立てたいと考えている。

なおこの研究に用いられたアトマイズ鉄粉は科学技術庁金属材料技術研究所粉末冶金研究室に設置されている装置を用いて製造されたものである。

Table 5 (a) Chemical composition of atomized alloy steel powders

Kind of alloys	M. Fe	C	Si	Mn	P	S	M. Mo
Fe-Ni	93.83	0.003	0.01	0.19	0.00	0.0044	79 —
Fe-Mo	94.39	0.003	0.01	0.17	0.008	0.008	— 4.53
Fe-Ni-Mo	93.44	0.002	0.02	0.15	0.006	0.007	2.32 0.79

Table 5 (b) Powder metallurgical characteristics of atomized alloy steel powders

Kind of alloys	Characteristics of powders				Characteristics of green compacts		Characteristics of sintered compacts			
	Apparent density	Flow rate	Reduction loss	Hardness of particle	Density	Rattler value	Density	Dimensional change on sintering	Tensile strength	Elongation
	g/cm ³	sec/50g	%	μHv	g/cm ³	%	g/cm ³	%	kg/mm ²	%
Fe-Ni	2.51	26.5	0.20	155	6.54	0.87	6.65	-0.10	22.1	8.7
Fe-Mo	2.81	23.8	0.11	162	6.72	1.54	6.95	-1.20	25.9	14.4
Fe-Ni-Mo	2.64	26.1	0.68	167	6.52	1.21	6.71	-0.68	19.7	7.5

Compacting pressure: 5 t/cm² Sintering atmosphere: AX gas
Sintering temperature and time: 1,150°C×1 h

参 考 文 献

- 1) 田村：特許出願公告，昭 43-6389
- 2) 田村，鯉川：金属材料技術研究所報告，12 (1969) 1, 63
- 3) 田村，武田：粉体および粉末冶金，11 (1964) 4, 192
- 4) 田村，武田：粉体および粉末冶金，12 (1965) 1, 25
- 5) 枝山，棚沢：機械学会論文集，5 (1949) 18, 136
- 6) S. Small, T. J. Bruce: Int. J. Powder Metallurgy, 4 (1968) 3, 7
- 7) N. Dautzenberg: Arch. Eisenhüttenw., 40 (1969) 4, 351