解説

金属材料の粉末技術～鉄粉～

高下 拓也*, 宇波 繁

JFE スチール(株), 〒260-0835 千葉市中央区川崎町1番地.

Powder Technology of Metal Materials ~ Iron Powder ~

Takuya TAKASHITA* and Shigeru UNAMI

Iron Powder & Magnetic Materials Research Department, Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation,
1 Kawasaki-cho, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.

Received April 27, 2020; Revised June 12, 2020; Accepted August 26, 2020

ABSTRACT

Iron powder is one of the “long-seller” material because it has been used since B. C. 300. Iron powder is mainly used for powder metallurgy in recent years. On the other hands, it is also used for the functional applications by using chemical reaction, such as body warmer, deoxidant and agricultural application. There are the several methods to produce iron powder, and reduced and water atomized iron powders are mainly used for the powder metallurgy due to their good compactibilities. In this paper, the details of production process of iron powders containing alloyed steel powders in JFE steel, which produces both reduced and water atomized iron powders, are described. In addition, the powder characteristics of these two kinds of iron powders are also described. The expansion of functional applications such as additive manufacturing process or magnetic cores is expected in the future, thus additional improvement of iron powders quality will be required.

KEY WORDS

pure iron powder, water atomized iron powder, reduced iron powder

1 はじめに

鉄粉の初期の使用例は紀元前300年にインドのデリーに作られた円柱にまで遡る¹⁾。それから2300年経った近年でも、鉄粉は用途、目的を変えて使われ続けており非常に息の長い材料であると言える。国内の2016～2018年度の鉄粉出荷量とその内訳をFig. 1に示す²⁾が、近年はその半数が粉末冶金用として出荷されていることが分かる。また、図中に明記されていない用途として、カイロや脱酸素剤、近年注目されている稲作向けの直播用鉄粉などがあり、適用先が構造材料だけに留まらず、多くの機能材料にも亘る点も鉄粉の特徴の一つであると言える。

鉄粉と一口に言っても、その製造方法には様々なものがある。鉄粉の製造方法をまとめたものをTable 1に示す³⁾。鉄粉の製造方法は、主として化学的反応法およびアトマイズ法に大きく分類できる。それぞれの手法によって、得られる鉄粉粒子の形状、粒子径等の粉末特性も大きく変化する。このう

ち粉末冶金用としては、水アトマイズ法もしくは化学的反応法の中の還元法によって得られる鉄粉が多く用いられている。この2つの方法によって得られる鉄粉は比較的不定形な粒子形状をしており、鉄粉成形時に粒子同士が絡み合うため、保形性が高く、焼結を行うまでの工程のハンドリングが

Fig. 1 Domestic production volume trend of iron powder²⁾.

* Corresponding author, E-mail: t-takashita@jfe-steel.co.jp

Table 1 Several methods for producing iron powder.

Principle	Method
Chemical reaction	Reduction process
	Mill scale
	Iron ore
	Electrolytic process
Atomization	Carbonyl process
	Gas atomization process
	Water atomization process
	Centrifugal atomization process

容易なためである⁴⁾。水アトマイズ法あるいは還元法で鉄粉製造を行っているメーカーは国内に数社存在するが、両方の方法で鉄粉を製造しているメーカーはJFE スチールのみ⁵⁾である。本解説では鉄粉の中でも粉末冶金用として消費量の多い水アトマイズ鉄粉および還元鉄粉に着目し、JFE スチールでの製造方法を例として各工程の詳細およびその製造方法によって特徴づけられる各種鉄粉および合金鋼粉の粉体特性や、それらを用いた焼結部品の特性について述べる。

2 鉄粉の製造方法

2.1 製造工程概略

JFE スチールにおける鉄粉の製造工程を Fig. 2 に示す⁶⁾。上述のように、大きく分けて水アトマイズ鉄粉と還元鉄粉の2種類の製造プロセスが存在する。しかしながら、いずれも還元熱処理以降の工程は共通化されており、水アトマイズ工程および海綿鉄（還元鉄）工程で製造されたそれぞれの原料鉄粉は、還元工程で集約して処理する流れとなっている。還元工程以降は、必要に応じて混合や偏析防止処理を施した後に出荷される。また、一部の用途では還元工程や偏析防止処理工程を経ずにそのまま出荷されるものもある。

2.2 アトマイズ工程～水アトマイズ鉄粉製造工程～

アトマイズ工程の概略図を Fig. 3 に示す。まずは、溶解炉にて所定の成分に調整した溶鋼をタンディッシュに注ぐ。溶鋼の原料は一般的にはスクラップを溶解して用いることが多いが、JFE スチールでは転炉溶鋼の一部を分湯して水アトマイズに用いている。これによりスクラップ由来の不純物が極めて少ない水アトマイズ粉の製造が可能となっている。

次に、タンディッシュ下部にある小孔より溶鋼を流出させる。この溶鋼流に対して高圧の水ジェットを吹き付けることで、溶鋼が粉碎、急冷されて粉末が得られる。水アトマイズ時の溶鋼の温度や流量、また溶鋼流に吹き付けられる水ジェットの水压、流量および角度等によって得られる粉末の特性が変化する。鉄粉メーカー各社のノウハウとなっている部分も多く、具体的な数値は公表されていないが、例えば新田ら⁷⁾の検討では水ジェット水压は6～15 MPa 程度である。また、水ジェットの形状についても逆円錐型ノズル方式、Vジェット方式、ペンシルジェット方式等、種々の形が提案されている⁸⁾。

Fig. 2 Manufacturing process of iron powder and steel powder.

Fig. 3 Water atomizing process.

上述のようにして噴霧された粉末は噴霧槽内に水と混ざり合ったスラリーの状態で堆積しており、ポンプで吸い上げられて脱水・乾燥工程へ進む。スラリーは粉末中に含まれる水分量が多く、一度の工程で乾燥させるのは困難である。そのため、脱水機によって水分を減少させたのちに、スチームドライヤーで乾燥される⁹⁾。乾燥後の粉末は篩分けによって所定の粒度に分級され、次工程へ送られる。ここまでの工程で得られた鉄粉のことをJFE スチールでは「生粉」と呼称している。生粉は1 mass% 未満の酸素と炭素を含み硬質なため、

Fig. 4 First reduction and crushing process.

圧粉成形や焼結を行う粉末冶金用途には不適であるが、化学反应用途等に用いられることもある。

2.3 粗還元工程～還元鉄粉製造工程～

還元鉄粉は酸化鉄を原料とした鉄粉である。そのため、還元により酸化鉄中の酸素を還元する必要がある。原理上、還元を後述の仕上還元工程にて1度で行うことも可能であるが、仕上還元工程での水素使用量が増加してしまう等の経済的なデメリットがある。そこで、水素による仕上還元を実施する前に粗還元によりある程度の還元を行うのが一般的である。粗還元工程の概略図をFig. 4に示す。

まずは、原料の酸化鉄、還元剤であるコークスおよび脱硫剤である石灰（ CaCO_3 ）をサガーと呼ばれるSiC製耐熱容器内に充填する。原料の酸化鉄として、JFEスチールではミルスケールを採用している。ミルスケールとは、鋼板製造工程における熱間圧延工程でスラブや粗圧延後の鋼板表面に生じた酸化鉄を、水ジェットで表面から除去した後に回収したものである。元を辿れば転炉で精錬された溶鋼であるため、清浄度が高いことが特徴である。その他、高純度の鉄鉱石を原料として還元鉄粉を製造しているメーカーも存在する⁹⁾。

原料を充填されたSiC製耐熱容器は、粗還元炉（トンネル炉）へと挿入され、約1100℃で5日間程度熱処理される。この際の鉄の還元反応は酸化鉄とコークスの固相反応ではなく、COガスによる還元反応が支配的であると言われている⁹⁾。COガスはコークスが酸化して生じる(1)のケースと、 CO_2 とコークスが反応して生じる(2)のケースの両方が考えられている⁹⁾。

脱硫剤として添加している石灰は熱分解で CO_2 を生じる。そのため、石灰も間接的に還元に寄与していると考えられる⁸⁾。COと酸化鉄は(3)の反応で還元され、純鉄が得られる。

また、上記のような反応が進む一方で、COによる純鉄への浸炭も同時に進行する。過度の浸炭は、後工程での脱炭を困難にするため、本工程での還元は浸炭が過度に進行しないレベルで終了させることが必要である。

Fig. 5 The structure of finish reduction furnace.

トンネル炉通炉後にSiC耐熱容器から取り出された酸化鉄は焼結が進行して凝集している。本工程までで得られたものをJFEスチールでは「海綿鉄」と呼称している。海綿鉄は未反応のコークスと石灰も含まれる状態となっている。そのため、粉碎と磁選により鉄濃度を高めた粉末とする。この粉碎粉は、アトマイズ工程で得られた生粉同様、粉末冶金用として用いるには酸素量と炭素量が高すぎるため、続く還元熱処理工程で更に酸素量と炭素量を低減する。上述のように一部の用途では海綿鉄を粉碎したものを出荷する場合もある。

2.4 還元熱処理工程

アトマイズ工程で得られた生粉および粗還元工程で得られた海綿鉄粉碎粉（以下原料鉄粉）は、その炭素量や酸素量が高く硬質なため、粉末冶金用途には適さない。そこで、還元熱処理炉による脱炭および還元処理を行う。

還元熱処理炉の構造をFig. 5に示す。基本的な構造は、ステンレスベルトによって加熱対象を炉内へ搬送するベルト炉である。原料鉄粉は、ステンレスベルトの上に厚み数十mm程度の層状（鉄粉充填層）に乗せられ、ベルトにより炉内へ搬送されてゆく。炉体は複数のゾーンから構成されており、役割ごとに加熱帯、均熱帯および冷却帯と区別されている。炉内は水素雰囲気であり雰囲気ガスは炉の出側から入側に向かって原料鉄粉の進行方向とは逆に流れている。炉内では以下に示す3式の反応が進行する。

加熱帯では(4)の反応を促進させるために水素に加えて水蒸気が導入される。西田ら¹⁰⁾によれば脱炭反応は還元反応が進む900℃以上よりも低い、820℃近傍にピークがあるとされる。また、多量の水蒸気は還元反応を阻害するため、原料鉄粉の温度が比較的低い加熱帯にて水蒸気を導入し、還元反応前に脱炭反応をほぼ完了させた方が効率的に脱炭と還元を行える。

加熱帯に続く均熱帯では(5)に示される水素による酸化鉄の還元反応が生じる。式からも分かるように、還元反応により H_2O が生じる。上述のように、鉄粉充填層近傍の H_2O 濃度が高くなってしまうと還元反応の進行が遅滞する。そのため、水素を炉の出側から入側に向かって流すことで入側に向かう気流を生じさせ鉄粉充填層から発生した H_2O を速やかに加熱帯側へ排出させる。加熱帯に侵入した H_2O は脱炭反

Fig. 6 Finish reduction, crushing, classification and packaging process.

応促進に寄与したのち、炉外へと排出される。

冷却帯では鉄粉充填層の冷却が行われるとともに、(6)に示される脱炭反応が進行する。OやC同様、Nについても鉄粉の硬度を増加させ、これにより圧粉成形を困難とするため、本工程にて所定の含有量まで低減される。盛ら¹¹⁾による鋼板を用いた検討では、水素雰囲気での脱炭は700~720℃で最も進行するとされている。そのような点で、(6)の反応は、温度の高い加熱帯よりも、むしろ冷却の過程で鉄粉充填層の温度が700℃近傍となる、冷却帯にて進行すると考えられている。

還元熱処理炉を含む還元熱処理工程の概略図をFig. 6に示す。脱炭、還元および脱炭反応が終了し炉の出側から排出された鉄粉充填層は、加熱により焼結し粒子が凝集しているため、続く粉砕工程にて再度粉末化する。更に、粉砕工程で粉末化できなかった粗い凝集粉を篩分けにより除去して、粉末冶金に使用可能な高度に成分調整がなされた鉄粉が得られる。還元熱処理工程およびそれに続く粉砕工程は、鉄粉の粒子形状に影響を及ぼす。また、その後の分級工程で最終的な製品の粒度がほぼ決定する。そのような意味で、粉砕、分級を含む還元熱処理工程は、成分調整だけでなく最終的な鉄粉の粉体特性を決定する重要な工程であると言える。本工程後の鉄粉はそのまま粉末冶金用途やその他用途として出荷する場合もあるが、粉末冶金用の場合は後述の偏析防止処理を施して出荷されることが多くなっている。

2.5 真空還元工程

粉末冶金用の合金鋼粉は多様なニーズに応えるために様々な成分調整が行われる。その中で、水アトマイズ時の溶鋼の段階でMnやCrといった焼き入れ性の高い添加元素を加えている粉種が存在する。これらの元素は標準生成自由エネルギーが低い安定な酸化物を形成する¹²⁾ため、水アトマイズ時にこれらの酸化物が生成すると水素雰囲気中での熱処理では還元が難しい。そのため、合金鋼粉中に固溶させたCを還元剤とした真空還元を行う。

本還元処理について、例として還元剤をCとした場合のCr酸化物の還元反応を考える。本反応については炭化物を経由する詳細な反応式が提案されている¹³⁾が、簡略化したものを(7)に示す。

Crは高温では酸化しやすいため、本反応による還元を進めるためには前提として雰囲気中の酸素分圧が低いことが必要である。また、反応時に生成したCOガスの雰囲気中濃度

Fig. 7 The structure of vacuum reduction furnace.

が増加すると(7)の還元反応が遅滞する。そのため、真空排気と同時に熱処理を行うことで雰囲気中の酸素分圧低下と、生成ガスであるCOガスの排出の両方を達成でき、 Cr_2O_3 のような安定な酸化物の還元が可能となる。

上記のような還元処理を行う炉の例としてJFEスチールの真空還元炉の構造をFig. 7に示す。本炉の特徴は加熱室、均熱室、冷却室の3つから構成されるセミバッチ式の自動炉という点¹⁴⁾であり、これにより高い生産性を実現している。トレイに充填された原料粉はまず加熱室内に搬送され、加熱されながら減圧される。所定の加熱温度、真空度に到達した時点で扉を開放し、均熱室へと搬送される。均熱室内で所定の温度と時間保持されたのちに冷却室へと搬送され、ガス冷却された後に炉外へ排出される。排出された鉄粉は加熱によって焼結し粒子が凝集しているため、還元熱処理後と同様に粉砕および分級を行う。本工程後の鉄粉についても、水素中での還元熱処理後の鉄粉と同様にそのまま出荷する場合と後述の偏析防止処理を行う場合の2種類がある。

2.6 偏析防止処理工程

一般に粉末冶金用の鉄粉は焼結部品としたときの強度を高めるために黒鉛粉、銅粉及びその他合金粉末、プレス成形後の成形体の金型からの離型性を高めるために潤滑剤を混合して用いる。これらの粉末のうち特に鉄粉と黒鉛は大きく比重が異なるため、混合後長期間保管していると比重差に起因する重量偏析を生じる¹⁵⁾。また、黒鉛は比重が小さいため混合粉をハンドリングする際に発塵し易いという問題もある。これらの問題を解決するために混合の際に偏析防止処理を行うことがある。

偏析防止処理粉の粒子構造をFig. 8に示す。鉄粉粒子表面にバインダを介して黒鉛粉や銅粉等の合金粉末を付着させている。これにより、圧粉成形時に偏析に起因する部品の寸法や強度のバラつきが抑制され、更に発塵による粉末使用時の環境対策などが不要となる。このような偏析防止処理粉は鉄粉メーカー各社で商品化されている¹⁶⁻¹⁸⁾。

JFEスチールの偏析防止処理設備をFig. 9に示す。主原料である鉄粉と各種の添加剤が充填されたホッパーを有しており、そこから要求配合に応じて必要な量を一混合単位分ごとに精度良く切り出す。その後、ミキサーにて混合を行う。この時に、鉄粉表面にバインダを介して黒鉛などの添加剤が付着される。混合された粉末は排出された後にフレキシブルコンテナに梱包され、出荷される。

Fig. 8 Schematic description of the segregation-free pre-mixed iron powder.

Fig. 9 Manufacturing process of segregation-free pre-mixed iron powder.

粉末冶金の特徴は粉体を原料とすることで金属・非金属を問わず、さまざま原料を混合できる点にある。そのような特徴を生かし偏析防止処理工程では圧粉、焼結後の部品の切削性を改善する添加剤¹⁹⁻²²⁾や、圧粉体の強度を高めることで圧粉状態での加工が可能となる添加剤²³⁾が添加されることもある。また、混合粉末の流動性を改善することで複雑形状の金型へも均一に充填が可能な偏析防止処理粉等も提案されている^{24,25)}。

3 水アトマイズ法および還元法で得られる鉄粉の特徴

3.1 純鉄粉

JFE スチールが製造する代表的な水アトマイズ純鉄粉 JIP[®] 300A および還元鉄粉 JIP[®] 255M の化学成分および粉末特性

Table 2 Chemical compositions of water atomized and reduced iron powders²⁴⁾.

	mass%					
	C	Mn	Si	P	S	O
300A	0.004	0.080	0.020	0.004	0.008	0.100
255M	0.010	0.220	0.040	0.006	0.011	0.210

Table 3 Powder properties of water atomized and reduced iron powders²⁴⁾.

	Apparent density / Mg m ⁻³	Flow rate / s (50 g) ⁻¹	Median diameter / μm	Green density* / Mg m ⁻³	Particle size distribution / mass%				
					+106 μm	+75 μm	+63 μm	+45 μm	-45 μm
300A	2.95	26.0	77.0	6.86	27.8	23.7	9.6	14.9	24.0
255M	2.57	29.7	75.9	6.73	20.6	30.3	11.3	18.1	19.7

*Compaction pressure: 490 MPa

Fig. 10 Particle shapes of water atomized and reduced iron powders.

Fig. 11 Cross sections of particles of water atomized and reduced iron powders.

を比較したものを Table 2 および 3 に示す²⁶⁾。重量基準のメジアン径 D_{50} はほぼ同等であるが、見掛け密度は 300A の方が高い。また、成分に着目すると C はほぼ同等であるが O は 255M の方が高い。成形体の圧粉密度は 300A の方が高い。

上記のような特性差を理解するために、更に鉄粉粒子の形状と断面構造を比較したものを Fig. 10 および Fig. 11 に示す。鉄粉粒子の外観はいずれも不定形であり、300A と 255M で大きな差はみられない。一方でその断面の組織は大きく異なっており、300A が稠密であるのに対し、255M は多孔質となっている。このような多孔質構造が形成されるのは、酸化鉄の還元過程で鉄のウィスカーが生成、成長するためであると言われている²⁷⁾。そのため、255M の粒子内に存在する気孔の多くは表面と繋がっている開気孔となっている。金属粉の表面は大気と接することでわずかに酸化していると考えられ、そのため同じ粒子径であっても表面積が大きい 255M の方が O の含有量は高くなっていると考えられる。また、

Table 4 Characteristics of several alloying methods for sintered steels.

	Pre-alloyed steel powder	Partially-alloyed steel powder	Powder mixture with iron and alloying powder

Compressibility	$\Delta \sim \times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
Homogeneity of chemical composition and microstructure	$\bigcirc$	$\Delta \sim \bigcirc$	$\times$

気孔を含む組織となっているため、同一粒子径であっても255Mの方が低見掛密度かつ低圧粉密度となったと推定される。

以上代表的な水アトマイズ鉄粉および還元鉄粉の特性を比較したが、それぞれ成分と見掛密度を規定したいいくつかのグレードが存在し²⁸⁾、用途に応じてその中から適切な特性を有する水アトマイズ純鉄粉や還元鉄粉が選定される。例えば、還元鉄粉は多孔質であるということを利用して、気孔内に油を含浸させる含油軸受等に用いられる。また、成形時の粒子同士の絡み合いは見掛密度が低くなるほど強くなるため、還元鉄粉の方が水アトマイズ鉄粉よりもラトラ値と呼ばれる成形体の欠け性の指標が良好である²⁹⁾。そのため、焼結部品の中でも特に形状が複雑で割れや欠けが懸念される場合は、低見掛密度の還元鉄粉が用いられることがある。また表面積が大きい場合、化学反应用として用いる場合、還元鉄粉の方が反応は起こりやすい。

水アトマイズ鉄粉は稠密であるため、高密度、高強度が要求される焼結部品に用いられる。また、近年注目されているSMC (Soft Magnetic Composite) コア (圧粉磁心とも呼ばれる) として用いる場合、コア内の磁性体充填率が磁気特性に大きな影響を及ぼし、一般的に充填率の高いものが志向される。そのため、高密度の圧粉体を得られる水アトマイズ鉄粉が多く用いられている³⁰⁻³²⁾。

3.2 合金鋼粉

粉末冶金法で作製される鉄基焼結体の多くは強度を高めるために各種合金化元素が添加されている。その原料である鉄粉へ合金化元素を添加する方法は複数あり、それぞれの特徴をまとめたものを Table 4 に示す。

最も単純な手法は溶鋼へ合金化元素を添加し、アトマイズによって得られる鉄粉そのものを合金化してしまう手法である。このようにして得られた合金鋼粉は完全合金鋼粉と呼ばれる。完全合金鋼粉を用いて得られる焼結体は焼き入れ性が高く、均一な微視組織が得られる。その反面、粉末の時点で合金化してある程度硬質化しているため、プレス成形時に高密度の成形体を得るのが困難になってしまう。また、本手法はアトマイズ工程で合金化元素を添加するため、還元鉄粉に

は適用できない。CrやMoは完全合金化による粉末の圧縮性低下が比較的小さい³³⁾ので、完全合金鋼粉の合金化元素として多く用いられている^{34,35)}。

一方、純鉄粉と合金粉を混合後に熱処理を施して、鉄粉表面に合金粉を拡散付着させたものは部分合金鋼粉と呼ばれる。この手法はアトマイズ鉄粉、還元鉄粉問わず合金化が可能である。部分合金鋼粉は表面こそ合金化により硬質化しているものの、中心部は純鉄のままなので完全合金鋼粉と比べ圧縮性が高く、合金でありながら高い密度の成形体を得ることが出来る。一方で、焼結のみで合金を組織中に均一に拡散させるのは難しく、微視組織中に一部軟質な領域が残留してしまうのが難点である。部分合金鋼粉としてはFe-4Ni-1.5Cu-0.5Mo 部分合金鋼粉が知られている。本合金鋼粉は、Ni、CuおよびMoを純鉄粉表面に拡散付着させた合金鋼粉であり、圧縮性に優れ、NiとCuの比率を適正化することで焼結前後での寸法変化が小さいという特徴を有する³⁶⁾。一方で本合金鋼粉は合金添加量が多いため、添加量を削減しつつ強度特性を確保した合金鋼粉等の開発も進められている³⁷⁾。

また、合金粉末と純鉄粉を単純に混合して焼結後に合金化する手法もある。本手法は粉末の状態では一切合金化されていないため、高い圧粉密度が得られる。その反面、2.6で述べたような比重差に起因する重量偏析が生じる可能性がある。また、得られる焼結体の微視組織は部分合金鋼粉を用いた場合よりも更に不均一なものになってしまう。類似の手法で偏析防止処理と同様にバインダを用いて鉄粉表面に合金粉末を付着させる方法も存在する。

このように合金化の手法には長所と短所が存在し、目的に応じて種々の手法が選定される。また、上記の手法を組み合わせる場合もある。例としてJFEスチールが開発したハイブリッド型Mo系合金鋼粉AH4515を紹介する。AH4515 (Fe-0.6Mo) の粒子構造をFig. 12に示す。AH4515はMoを予合金と部分拡散合金で添加しており、その比率を調整することで成形時の高い圧縮性と、比較的均一な焼き入れ微視組織、更にはMoの表層濃化による焼結促進効果が得られ、硬質で面圧疲労強度の高い焼結体を得られる³⁸⁾。

Fig. 12 Schematic description of the hybrid alloyed steel powder AH4515.

Fig. 13 Schematic description of the particle shape controlled alloyed steel powder SIGMALOY 4MO.

近年では合金成分および添加形態の適正化に加え、粒子構造制御にまで踏み込んだ高特性化も検討されている。JFE スチールが開発した焼結-浸炭熱処理工程向けのNiフリー高靱性合金鋼粉FM1000Sは、ベース粉である拡散付着合金鋼粉シグマロイ® 4MO (Fe-0.4Mo) の粒子形状を不定形化 (Fig. 13) することで、Moの表層濃化および粒子比表面積増加による焼結促進効果が得られ、焼結後の気孔が微細化する。これにより従来のMo系合金鋼粉に比べて高い靱性と、更には引張強さの増加も実現している³⁹⁾。

4 おわりに

本解説では鉄粉の製造技術とその特徴について、粉末冶金用の水アトマイズ鉄粉と還元鉄粉を中心に紹介した。しかしながら冒頭でも述べたように、鉄粉はこのような粉末冶金用途に限らず、化学反应用途 (土壌浄化、海洋浄化、脱酸剤、カイロ等)、磁性材料用途 (ノイズフィルタ、インダクタ、モータコア、電磁弁等) 等、様々な所で使用されている。また、農業用、3Dプリンタ用等新しい用途も続々と開拓されている。用途によって求められる特性は異なるが、近年は構造物から機能材へ用途が徐々にシフトしているようにも感じ、それに応じて鉄粉に求められる品質も厳しくなっている。鉄粉メーカーとしては従来用途のお客様の満足度を向上させるとともに、新しい用途のニーズへ応えるために、従来にない特性を持つ鉄粉とその製造技術開発へと挑戦していきたい。

文 献

- 1) R. M. German: Powder Metallurgy of Iron and Steel, JOHN WILEY & SONS, INC. (1998) 30.
- 2) Japan Powder Metallurgy Association: 2018 Annual Report of JPMA, (2019) 4.
- 3) M. Kawamura, N. Okochi: Denki-Seiko, **80** (2009) 139-145.
- 4) T. Sawada, K. Yanagimoto: SANYO Tech. Rep., **9** (2002) 64-69.
- 5) T. Maetani, J. Ohta, M. Fujinaga: JFE Tech. Rep., **36** (2015) 45-50.
- 6) K. Otsuka, K. Higuchi, A. Sonobe: JFE Tech. Rep., **36** (2015) 51-56.
- 7) M. Nitta, K. Ogura, S. Saito, H. Sugihara: Kawasaki Steel Tech. Rep., **24** (1992) 290-295.
- 8) Y. Morioka: Nishiyama Memorial Seminar, ISIJ, **82-83** (1982) 11-38.
- 9) Y. Yamamichi: J. Japan Inst. Met. Mater., **26** (1962) 754-759.
- 10) T. Nishida: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **28** (1981) 1-7.
- 11) T. Mori, E. Ichise, Y. Niwa: Tetsu-to-Hagané, **58** (1972) 1264-1279.
- 12) K. Mukai: Kagakunetsurikigakunotsukaikata, Kyoritsu-syuppan, (1992) 49-50.
- 13) N. Yamato, K. Ogura, E. Hatsugai, Y. Maeda: Kawasaki Steel Tech. Rep., **18** (1986) 270-276.
- 14) K. Higuchi, K. Akaoka, Y. Yamamoto, K. Komamura: Kawasaki Steel Tech. Rep., **24** (1992) 285-289.
- 15) K. Ogura: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **44** (1997) 470-474.
- 16) Höganäs AB Catalog 0255HOGJP, (2012).
- 17) S. Nishida, F. Takayasu: KOBE Steel Eng. Rep., **59** (2009) 71-75.
- 18) T. Ono, Y. Ozaki: JFE Tech. Rep., **26** (2010) 60-54.
- 19) S. Furuta, Y. Taniguchi: KOBE Steel Eng. Rep., **59** (2009) 76-80.
- 20) T. Maetani, S. Unami, Y. Ozaki: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **59** (2011) 37-39.
- 21) S. Unami, T. Maetani, Y. Ozaki: Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, (2012) 62-70.
- 22) K. Nushiro, T. Maetani, T. Ono, Y. Ozaki: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **65** (2017) 129-131.
- 23) S. Unami, J. Hirayama: Abstract of Spring Meeting of the Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, (2017) 183.
- 24) Höganäs AB Catalog 0071HOGJP, (2012).
- 25) T. Ono, Y. Ozaki: JFE Tech. Rep., **36** (2015) 69-74.
- 26) T. Hayasaka: Nishiyama Memorial Seminar, ISIJ, **82-83** (1982) 43-65.
- 27) Y. Iguchi, S. Hayashi: Tetsu-to-Hagané, **79** (1993) 431-442.
- 28) JFE steel JIP Catalog J1J-001-03, (2015)
- 29) Y. Morioka: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **22** (1976) 247-256.
- 30) H. Hojo, N. Akagi, T. Sawayama, H. Mitani: KOBE Steel Eng. Rep., **60** (2010) 79-83.
- 31) T. Takashita, N. Nakamura, Y. Ozaki: J. Japan Inst. Met. Mater., **79** (2015) 315-323.
- 32) K. Nishi, Y. Aono, K. Okamoto, T. Imagawa, K. Souma: J.

- Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **63** (2016) 63-69.
- 33) S. Miura, K. Takagi: Funmatsuyakinnokagaku, Uchidaroukakuho, (1996) 254.
- 34) T. Maetani, S. Unami, T. Ono, Y. Ozaki, K. Ogura: J. Jpn Soc. Powder Powder Metallurgy, **61** (2014) 313-317.
- 35) S. Unami, Y. Ozaki, T. Ono: J. Jpn Soc. Powder Powder Metallurgy, **57** (2009) 140-142.
- 36) P. Lindskog: Powder Metallurgy, **56** (2013) 351-361.
- 37) O. Furukimi, K. Maruta, Y. Maeda: Kawasaki Steel Tech. Rep., **24** (1992) 273-278.
- 38) S. Unami, Y. Ozaki, T. Ushirozako, H. Tanino: J. Jpn Soc. Powder Powder Metallurgy, **57** (2010) 341-347.
- 39) T. Takashita, A. Kobayashi, T. Maetani, S. Unami: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **67** (2020) 27-29.