

# JFE スチール 鉄粉工場概要

## Outline of Iron and Steel Powder Plant in JFE Steel

大塚 和弘 OTSUKA Kazuhiro JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 鉄粉部鉄粉技術室 主任部員(課長)  
樋口 和男 HIGUCHI Kazuo JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 鉄粉部長  
園部 秋夫 SONOBE Akio JFE スチール 鉄粉セクター部 主幹職(部長)

### 要旨

JFE スチールは、1966年に日本で初めて粉末冶金用還元鉄粉の一貫製造を始めて以来、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉を製造する日本で唯一の総合鉄粉メーカーとして、幅広い産業に貢献している。製造している鉄粉製品は品揃えが広く、お客様が用途に応じて選択可能である。自動車向けを主体とする粉末冶金用鉄粉は、生産量全体の70%を占めており、中でも偏析防止プレミックス鉄粉(JIP<sup>®</sup>クリーンミックス<sup>®</sup>)は年々増加してきている。本報は、JFE スチールの鉄粉製造設備と製造方法について概説する。また、アジアの自動車生産台数の増加に伴い鉄粉需要は拡大することが見込まれていることから、最近の能力向上対策の事例を紹介する。

### Abstract:

JFE Steel started to produce reduced iron powders firstly in Japan in 1966. The company has been the sole manufacturer to produce both reduced iron powders and atomized steel powders in Japan, and contributing to the development of the wide range of industries. Customers can select the most suitable product for their application from the company's wide-range product line-up. Iron and steel powder product for automobile sintered parts accounts for 70% of its total production. Among those, pre-mixed iron powders for preventing segregation (JIP<sup>®</sup> Cleanmix<sup>®</sup>) increases year after year. This paper describes production facilities and method of JFE Steel iron and steel powders and the recent case of capacity improvement activities to accommodate increasing demand in Asia due to escalation of automobile production.

## 1. はじめに

JFE スチールは、1966年に日本で初めて還元鉄粉の一貫製造設備を東日本製鉄所(千葉地区)内に建設し、製造販売を開始した。続いて1978年にはアトマイズ鉄粉製造設備を建設し、還元鉄粉とアトマイズ鉄粉の両方を製造販売する日本で唯一の総合鉄粉メーカーとなった<sup>1)</sup>。その後、自動車部品の高機能化に対応するため、1984年にはCrやMnなどを含有する合金鋼粉を、1988年には純鉄粉の粒子表面にNi, Cu, Moなどの合金元素を拡散付着させる部分拡散合金鋼粉を、さらに1989年には黒鉛粉、銅粉、潤滑材などの偏析防止を図ったプレミックス鉄粉(JIP<sup>®</sup>クリーンミックス<sup>®</sup>)の製造設備を建設し、それらの製造販売を開始した<sup>2)</sup>。

このように、自動車生産台数の増加および高機能化に伴い、自動車向けを主体とする粉末冶金用鉄粉の生産を増加させるための設備増設を行ない、お客様の種々のご要望にお応えした新しい製品を開発してきた。

図1に鉄粉生産量推移を示す。JFE スチールの鉄粉生産量は、2007年まで順調に増加し続けた。一旦、2008年に発

生した世界的金融危機の影響で鉄粉生産量が減少したものの、今後アジアの自動車生産台数の増加に伴い鉄粉需要は拡大することが見込まれている。

本報告は、JFE スチールの鉄粉製造設備と製造方法について述べる。また、最近のプロセス改善、能力増強の事例として、仕上還元炉の生産性向上、JIP<sup>®</sup>クリーンミックス<sup>®</sup>製造設備の増強を紹介する。

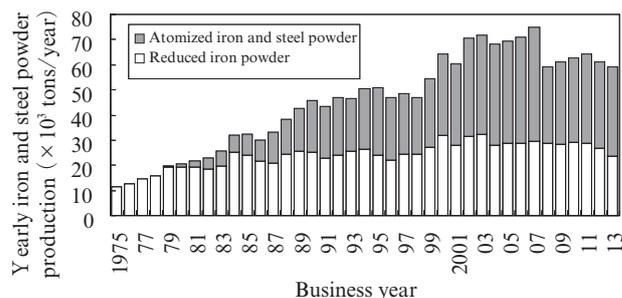


図1 JFE スチールの鉄粉生産量推移

Fig. 1 Trends in iron and steel powder production of JFE Steel

2015年1月30日受付

## 2. 鉄粉の製造方法

鉄粉製品は、原料、製造工程により、大きく還元鉄粉とアトマイズ鉄粉に分類される。図2に鉄粉工場全体の製造工程を示す。還元鉄粉は、原料であるミルスケールを粗還元した後、粉碎、仕上還元を経て製品化する。一方、アトマイズ鉄粉は、溶鋼を高圧水でアトマイズした後、仕上還元を経て製品化する。また、これらを原料鉄粉として、各種添加材の混合付着処理を行ない、JIP<sup>®</sup>クリーンミックス<sup>®</sup>として製造販売している。2.1節以降に各製造工程の詳細について述べる。

また、図3に千葉地区内の鉄粉工場配置図を示す。工場は、上記のプロセスにより、3ヶ所に分かれている。各工場間の物流は、トラックで行なっている。

### 2.1 還元鉄粉の粗還元工程

JFE スチールは、ミルスケールの直接還元法により還元鉄粉を製造している。図4に粗還元工程と粉碎工程を示す。

圧延工程で発生する高純度の酸化鉄であるミルスケールと、還元材としてのコークス粉、脱硫材としての石灰石粉を耐熱容器に充填し、粗還元炉（トンネル炉）へ装入する。トンネル炉では約1100℃で5日間程度かけてミルスケールを粗還元する。この粗還元鉄を海绵鉄と呼ぶ。トンネル炉

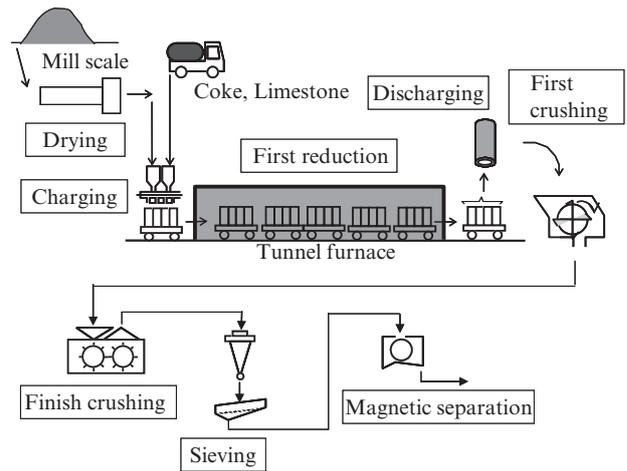


図4 粗還元工程と微粉碎工程

Fig. 4 First reduction and crushing process

は予熱帯、焼成帯、冷却帯からなり、均熱温度と滞留時間を管理することで還元率を決めている。その後、銘柄によって異なる所定の見掛け密度に調整しながら150 μm以下の粒度まで粉碎機で粉碎し、磁選機にかけ非鉄不純物を除去後、仕上還元工程に送られる。この段階の還元鉄粉を海绵鉄微粉碎粉と呼ぶ。

### 2.2 アトマイズ工程

JFE スチールは、高純度の転炉溶鋼を原料とし、水アトマイズ法によりアトマイズ鉄粉を製造している。図5にアトマイズ工程を示す。

転炉で精製された高純度溶鋼を取鍋に受け、要求特性に応じて合金元素を添加するなど所定の成分に調整した後、取鍋からダンデッシュを経由して溶鋼流としてノズルから落下させ、これに10~20 MPaの高圧水を吹き付けて噴霧することにより溶鋼の微細化と凝固を行ない、鉄粉を製造する<sup>3)</sup>。水と鉄粉のスラリーは、湿式磁選機、真空脱水機で水分を除去した後、スチームドライヤーで乾燥し、篩い分け後に、仕上還元工程へ送られる。このときできた鉄粉をアトマイズ

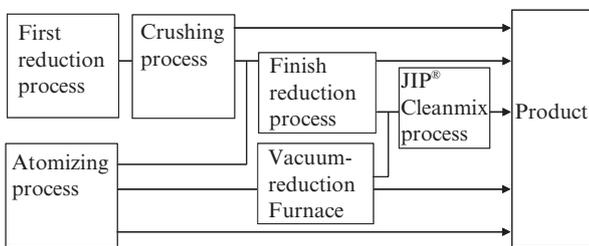


図2 鉄粉工場全体の製造工程

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

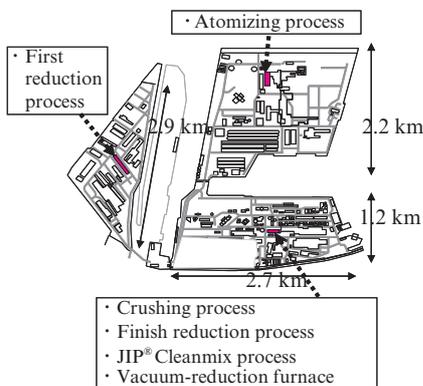


図3 東日本製鉄所（千葉地区）内の鉄粉工場配置図

Fig. 3 Arrangement plan of iron and steel powder plant in East Japan Works (Chiba District)

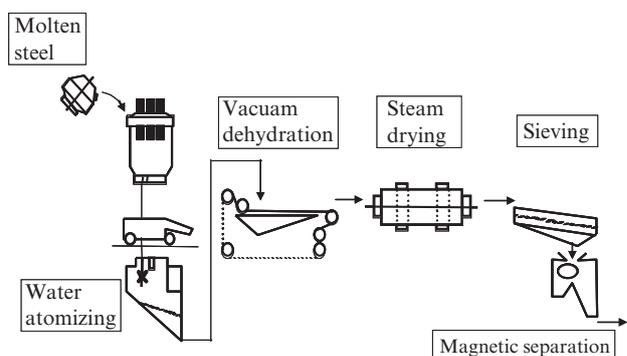


図5 アトマイズ工程

Fig. 5 Atomizing process

生粉と呼ぶ。

### 2.3 仕上還元工程

海綿鉄微粉碎粉とアトマイズ生粉は、ともに、化学成分と粉体特性の点で、そのまま粉末冶金用としては使用できない。そこで、次工程の仕上還元炉にて、脱炭、還元（脱酸）、脱窒、焼鈍、および粒子同士の焼結を行なう。図6に仕上還元炉の構造を示す。

仕上還元炉は、原料鉄粉を厚み数十ミリメートル程度の層状にステンレスベルトに乗せ搬送しながら、鉄粉層上下の加熱装置で鉄粉を加熱処理する。加熱帯で、蒸気を投入し、原料鉄粉に含まれている炭素が除去（脱炭）され、加熱均熱帯後半では、炉出側から投入している水素により、原料鉄粉に含まれている酸素が還元され（脱酸）、焼鈍も進行する。さらに、冷却帯ではH<sub>2</sub>雰囲気中で窒素が除去（脱窒）される。それぞれの化学反応式を以下に記す。

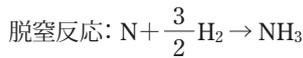
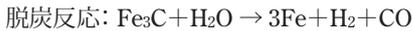
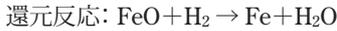


図7に仕上還元、解砕、篩分け、梱包工程を示す。

仕上還元炉にて、炉内のヒートパターン、水蒸気量、水素量、鉄粉の層厚、ベルト速度を、要求特性に応じて所定の条件に設定して、目的に応じた鉄粉を製造している。

その後、ハンマーミルで解砕、磁選機で不純物を除去し、

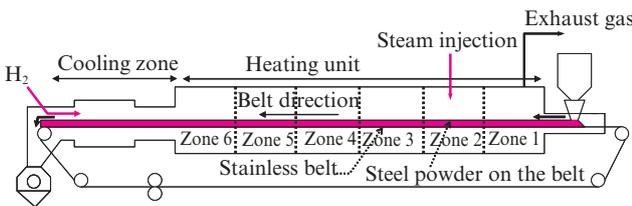


図6 仕上還元炉の構造

Fig. 6 The structure of finish reduction furnace

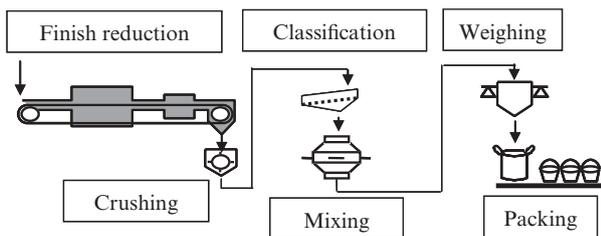


図7 仕上還元、解砕、篩分け、梱包工程

Fig. 7 Finish reduction, crushing, classification, and packaging process

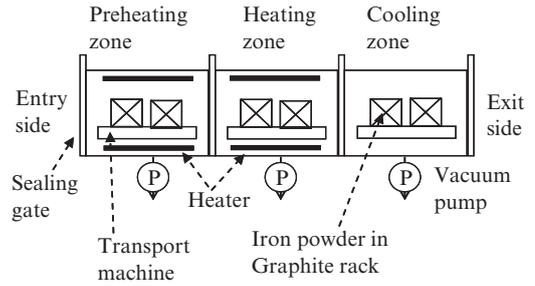


図8 真空還元炉の構造

Fig. 8 The structure of vacuum reduction furnace

篩いで粒度調整した後、ミキサーで混合し製品化している。

### 2.4 真空還元炉工程

鉄系焼結部品の高強度化ニーズに応えるため、JFE スチールはMn, Cr, Ni, Moなどの各種合金を添加したアトマイズ合金鋼粉を製造している。その中でも比較的安価なCr成分を1~3%含有したCr系合金鋼粉は高強度、耐摩耗性を有し、自動車エンジン部品などに使われている。Cr系合金鋼粉は溶鋼にフェロCrなどを添加した後、水アトマイズされるが、この段階で得られた鉄粉粒子の表面は酸化によりCr酸化物を有しているため、前述のH<sub>2</sub>による仕上還元では還元できず、真空還元法により還元している。アトマイズ時にCrとともにCを添加し、真空還元炉にて高温、高真空下で熱処理することにより、以下の反応で自己脱炭、脱酸させて製造する<sup>4)</sup>。

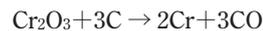


図8に真空還元炉の構造を示す。真空還元炉の特長は、予熱室、加熱室、冷却室の3室をもつ連続式自動炉で、各室は扉で完全に密閉され、独立した加熱、冷却パターン、圧力パターンならびに各種ガスの投入・排気パターンを任意に設定することができることである。そのため、品質面と生産性に優れた真空炉であり、その製造能力は1.2千トン/年を有する。

### 2.5 JIP®クリーンミックス® 製造工程

一般に、鉄系焼結部品は、鉄粉に黒鉛粉、銅粉、その他合金粉末および潤滑材を混合して、プレス成形後に焼結することにより、高強度化、高機能化が図られている。比重の異なる鉄粉と黒鉛粉などを混合するため、偏析や発塵の問題があった。その問題を解決したのがJIP®クリーンミックス®であり、鉄粉とバインダーおよび黒鉛粉、銅粉、潤滑材などの添加材をミキサーで混合しながら一定温度で加熱することにより、鉄粉粒子表面に、黒鉛粉、銅粉などの添加元素を付着させることで偏析の少ない混合粉（偏析防止粉）

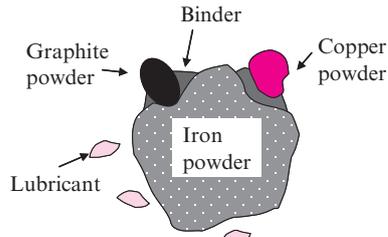


図9 偏析防止粉の基本構造

Fig. 9 Schematic description of the segregation-free pre-mixed iron powder

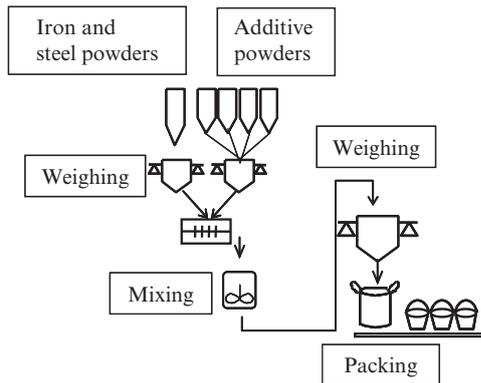


図10 クリーンミックス® 製造工程

Fig. 10 Manufacturing process of JIP® Cleanmix

としたものである<sup>5)</sup>。図9に偏析防止粉の基本構造を示す。バインダーにより、鉄粉粒子に添加剤が付着している。

図10にJIP®クリーンミックス®製造工程を示す。ホッパーに貯蔵している主原料の鉄粉と、添加剤ごとに有したホッパーに貯蔵している添加剤から、要求配合量に応じて必要量を切り出し、一混合単位分を精度良く計量し、ミキサーで混合、付着処理した後、フレキシブルコンテナに梱包し製品化する。

### 3. 製造プロセスの改善および能力増強

図11に世界の鉄粉需要予測を示す（自動車生産台数予測と自動車一台当たりの鉄粉使用量で算出した）。アジアを中心とした自動車生産台数の増加に伴い、鉄粉の今後の需要も高まると予想している。そのため、JFE スチールは生産性向上および新規設備導入による製造能力増強に取り組んでいる。以下に最近の能力向上事例を紹介する。

#### 3.1 仕上還元炉の生産能力向上<sup>6)</sup>

鉄粉仕上還元炉は、前述したように、還元、脱炭、脱窒、および焼鈍を行なっている。

還元ガスであるH<sub>2</sub>の他に、反応によって生成する水蒸気、CO、NH<sub>3</sub>が共存している。それぞれの反応生成ガスであるH<sub>2</sub>O、CO、NH<sub>3</sub>は、雰囲気ガスであるH<sub>2</sub>に比べて比重が

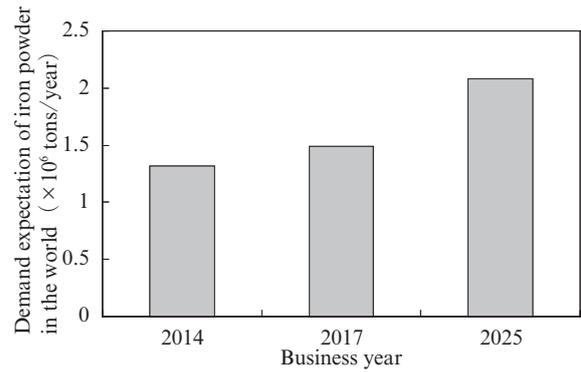


図11 世界の鉄粉需要予測

Fig. 11 Demand expectation of iron powder in the world

重く、鉄粉層上にこれらが滞留することで、水素による還元反応と脱窒反応、水蒸気による脱炭反応の進行を妨げている。そこで、これらの反応生成ガスを効率的に除去するために、数値解析技術を用いた仕上還元炉内のガス流れシミュレーションを行なって、ガスの流速分布、ガス分圧（ガス濃度）分布を計算し、還元反応、脱炭反応、脱窒反応促進させるための最適炉内構造を検討した。

#### 3.1.1 数値解析（シミュレーション）

仕上還元炉について、炉内温度、H<sub>2</sub>ガス流量、水蒸気流量、およびベルト速度をパラメータとして、汎用熱流体解析ソフトFluentを用いて炉内ガス流速分布、炉内ガス分圧（ガス濃度）分布を計算した。

図12に仕上炉のガス流れシミュレーション結果を示す。なお、図の中の矢印は濃い色であるほど低速であることを示している。鉄粉層直上のガス流速は0 m/sに近く、反応により生成したガスがベルト上に滞留していることを示している。

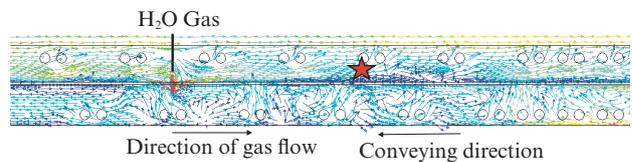


図12 仕上炉のガス流れシミュレーション結果

Fig. 12 Simulation result of gas flow distribution in the finish reduction furnace

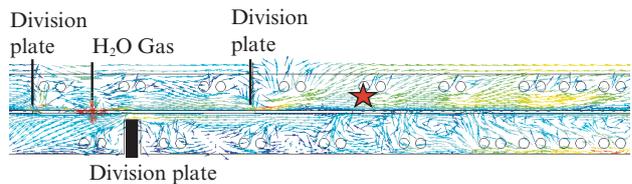


図13 仕切板設置後の仕上炉のガス流れシミュレーション結果

Fig. 13 Simulation result of gas flow distribution in the finish reduction furnace with division plates

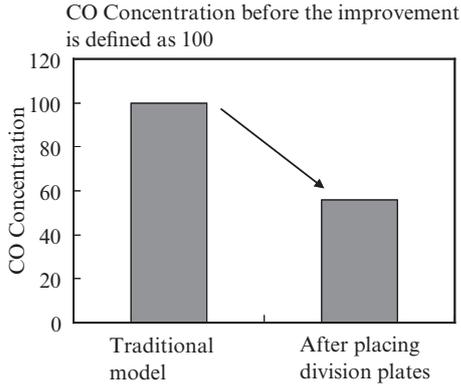


図 14 仕切板設置前後の仕上炉内星印位置の CO 濃度

Fig. 14 CO Concentrations before/after placing division plates on the iron powder surface at the point of a star depicted in Figs. 12 and 13

そこで、鉄粉層上部の空間に仕切板を設置し、流速に与える影響を確かめるシミュレーションを行なった。

図 13 に仕切板設置後の仕上炉のガス流れシミュレーション結果を示す。鉄粉層上のガス流速が仕切板設置前より増大しており、鉄粉層上にガスが滞留していないことを示している。

図 14 に仕切板設置前後の仕上炉内星印位置 (図 12、図 13 の★印部) の CO 濃度を示す。なお、仕切板設置前の CO 濃度を 100 として評価した。仕切板設置前後で CO 濃度は 100 から 58 となり、反応の進行を阻害する成分 CO 濃度が減少していることが判った。

これにより、仕切壁の設置が鉄粉表面にて発生している反応生成ガスを除去し、還元反応、脱炭反応、脱窒反応の効率向上に有効であると推定される。

### 3.1.2 仕上還元炉の改善結果

このシミュレーション結果をもとに、鉄粉仕上還元炉の実機に仕切板を設置した。図 15 に仕上炉ゾーンごとの鉄粉表面 CO 濃度を示す。なお、仕切板設置前 1ゾーンの鉄粉層

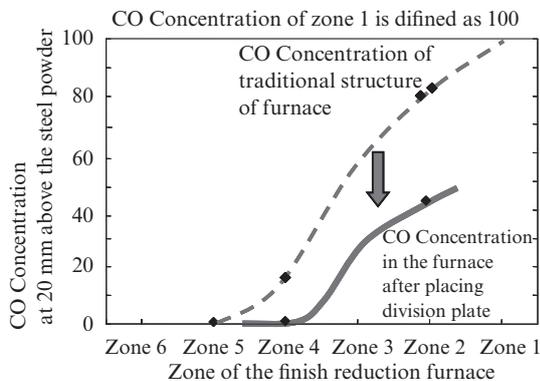


図 15 仕上炉ゾーンごとの鉄粉表面 CO 濃度

Fig. 15 CO Gas concentrations on powder surface at each zone in the reduction furnace

から 20 mm の高さの CO 濃度を 100 として評価した。仕切板設置後は、ベルト上の反応生成ガスである CO 濃度が仕切板設置前と比較しておよそ 1/2 となり、ベルト上のガス流速が増加し、CO ガスの除去が促進されたことが明らかとなった。仕切板設置により、仕上還元炉内の、還元、脱炭、脱窒反応が促進され、炉内滞留時間を短縮することができ、生産性は 6% 向上、生産量は約 0.2 万トン/年向上した。また、付随効果として、仕切板により鉄粉層上の H<sub>2</sub> 流速が早くなったことで、炉内に投入する水素原単位を、約 13% 削減することができた。

## 3.2 設備新設による生産能力増強

### 3.2.1 クリーンミックス® 製造設備の増強

高機能品を有する JIP® クリーンミックス® の割合は、2010 年度の 43% から、2013 年度には 48% に増大し、今後もその需要は増加することが見込まれる。図 16 に JIP クリーンミックスの生産量推移と能力を示す。

2015 年夏に、クリーンミックス製造設備一式を No. 2 クリーンミックス製造設備として新設し、生産能力を増強した。

No. 2 クリーンミックス単独の能力は、0.7 万トン/年で、既設設備とあわせた合計製造能力は 2.8 万トン/年から、3.5

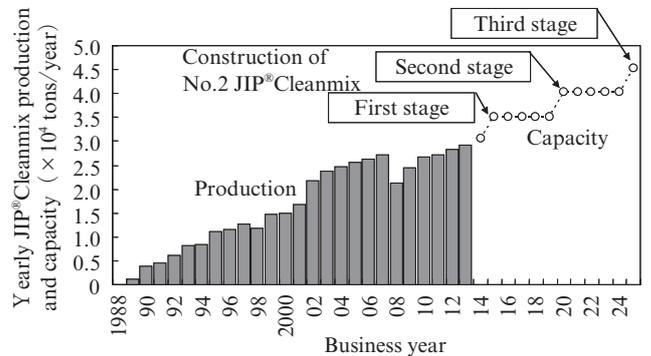


図 16 JIP® クリーンミックス® 生産量推移と能力

Fig. 16 Trends in JIP® Cleanmix production and capacity

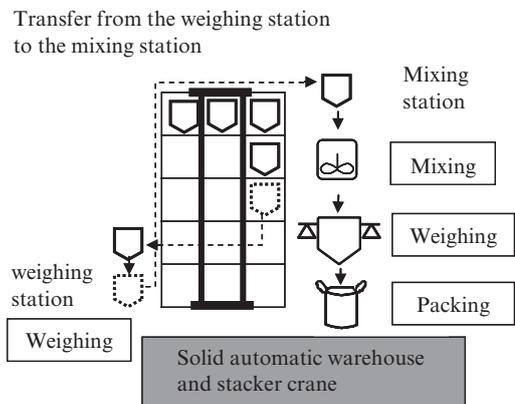


図 17 No. 2 JIP® クリーンミックス® 製造設備フロー

Fig. 17 No. 2 JIP® Cleanmix process flow

万トン/年へ増加した。今後さらに、第二期+0.7万トン/年、第三期+1.3万トン/年の能力増強を需要の伸びに応じてタイムリーに実施する計画である。

既設のクリーンミックス製造設備は、原料鉄粉および添加材を所定量計量し、それらをコンベアで搬送し、混合ミキサーに投入し、偏析防止処理を行なっている。

図 17 に、No. 2 クリーンミックス製造設備フローを示す。今回新設の No. 2 クリーンミックス製造設備では、原料鉄粉、添加材を貯蔵したコンテナを立体倉庫に配置し、スタッパークレーンにより、それらを取り出し、計量ステーションにて所定量を計量し、計量した材料を再度スタッパークレーンでミキサー直上の混合ステーションまで搬送して投入する移動コンテナ方式を採用した。これにより、コンベアが不要となるため、コンベアでの製品ロス削減、清掃箇所の削減などの合理化、作業性改善などの効果が得られた。

#### 4. おわりに

鉄粉の世界的需要は、アジアの自動車生産増加に伴い、今後さらに伸びていくことが予想される。JFE スチールでは、その需要増加に対応するため、JIP<sup>®</sup>クリーンミックス<sup>®</sup>製造

設備をはじめとする各製造ラインの能力増強を進めるとともに、お客様のニーズに応える各種機能材料用鉄粉とその製造技術の開発に努め、粉末冶金分野をはじめとする各種産業分野の発展に貢献していく。

#### 参考文献

- 1) 川崎製鉄社史編纂委員会編纂、川崎製鉄五十年史、2000。
- 2) 小倉邦明、川崎製鉄技報、2000, vol. 32, no. 3 p. 245。
- 3) 新田稔, 小倉邦明, 齊藤滋之, 杉原裕, 川崎製鉄技報、1992, vol. 24, no. 4 p. 290。
- 4) 樋口和男, 赤岡和夫, 山本博行, 駒村宏一、川崎製鉄技報、1992, vol. 24, no. 4 p. 285。
- 5) 峰岸俊幸, 牧野来世志, 杉原裕, 前田義昭, 高城重彰, 桜田一男、川崎製鉄技報、1992, vol. 24, no. 4 p. 262。
- 6) 尾花勲, 中村尚道、平成 26 年度春季講演会大会概要集、粉体粉末冶金協会、p. 94。



大塚 和弘



樋口 和男



園部 秋夫