

Manufacturing Process of Cr-Alloyed Steel Powders by Vacuum Reduction



樋口 和男
Kazuo Higuchi
千葉製鉄所 鉄粉部 鉄
粉溶材技術室



赤岡 和夫
Kazuo Akaoka
千葉製鉄所 設備技術
部機械技術室



山本 博行
Hiroyuki Yamamoto
千葉製鉄所 設備技術
部機械技術室 主査(課
長)



駒村 宏一
Kouichi Komamura
千葉製鉄所 鉄粉部長

1 結 言

鉄系焼結部品は、近年、自動車エンジンの高性能化と低コスト化を目指し、高強度化が進められてきた。その原料鉄粉の一つとして、当社では千葉製鉄所鉄粉工場に生産能力 100 t/月を有する真空還元炉を設置し、安価な Cr 元素を使用した 1~3% の Cr 含有合金鋼粉を製造、供給してきた。

真空還元法により製造される Cr 系合金鋼粉は、従来の H₂ ガス還元比べ C, O および N 含有量が低く¹⁾、圧縮性、成形性などの粉体特性に優れ、またその焼結部品は高強度で耐摩耗性を有しているため、自動車エンジンの動弁系部品やオイルポンプを中心に、その需要を徐々に伸ばしてきた。当社ではその需要増加に対応するため、1991 年 7 月生産能力 200 t/月を有する No. 2 真空還元炉を稼働させた。この No. 2 真空還元炉は No. 1 真空還元炉と同形式の予熱室、加熱室、冷却室を有する 3 室セミバッチ式の炉を採用したが、1 室の処理量を従来の 2 倍とすることで 200 t/月の能力を実

要旨

千葉製鉄所鉄粉工場では耐熱、耐摩耗性に優れる 1~3%Cr 含有合金鋼粉を製造しているが、その需要増加に対応するため、No. 2 真空還元炉を建設し、1991 年 7 月に稼働を開始した。No. 2 真空還元炉の設計にあたっては、伝熱解析により予熱温度、および鋼粉の充填厚みが還元反応時間に及ぼす影響について検討した。その処理能力は No. 1 真空還元炉の 2 倍とし、2.67 h のサイクルタイムで 200 t/月の生産能力を有する。また鋼粉の供給および製品の処理などの真空還元炉の前後の処理作業全般を自動化し、一貫した自動処理システムを完成させた。この No. 2 真空還元炉で製造した 1%Cr 合金鋼粉 (KIP 4100V) は圧粉体密度 7.07 Mg/m³ (成形圧力 686 MPa) を示す。

Synopsis:

Kawasaki Steel is producing 1 to 3% Cr-alloyed steel powders, that are characteristic of high wear and heat resistance. For the purpose of responding to the increasing demand, No. 2 vacuum reduction furnace was newly constructed and its operation began in July 1991. The authors investigated the effects of the pre-heating temperature and thickness of packed Cr-alloyed steel powders on the reduction time by the heat transfer analysis. No. 2 vacuum reduction furnace has a producing capacity of 200 t/month at an operation cycle of 2.67 h, which is twice as much as that of No. 1. Moreover, such a fully-automated manufacturing system, including the automatic feeder of raw alloyed steel powders, automatic conveyors of powders and reduced alloyed steel powders was provided on this line. The 1% Cr-alloyed steel powder (KIP 4100V) produced by No. 2 vacuum reduction furnace shows a green density of 7.07 Mg/m³ (compacting pressure: 686 MPa).

現させた。またこの No. 2 真空還元炉の特徴の一つは、鋼粉を黒鉛製台車に積込む作業および還元された鋼粉 (還元ケーキ) を取り出す作業を自動化して、大幅な省力化を図ったことである。

本稿ではこの No. 2 真空還元炉の設計段階で、生産性向上を目的として行った伝熱解析結果と実際の設備、プロセスおよび Cr 系合金鋼粉の品質について紹介する。

2 真空還元法概要

2.1 製造プロセス

Fig. 1 に Cr 系合金鋼粉の製造工程を示す。千葉製鉄所内で発生する純度の高いスクラップを原料とし、アーク炉で溶解、精錬後、Cr, Mn, C を予合金化する。この溶鋼を水アトマイズ法で噴霧し

* 平成 4 年 8 月 5 日原稿受付

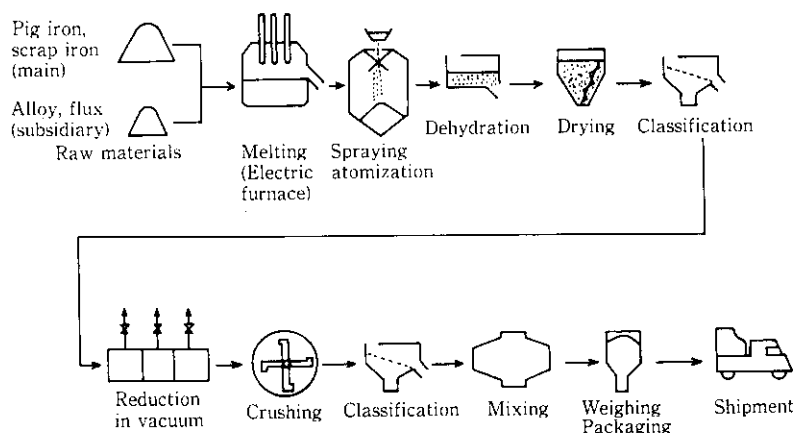
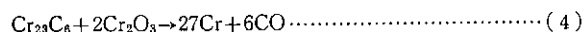
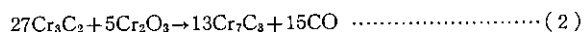
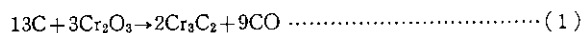


Fig. 1 Manufacturing process of Cr-alloyed steel powder

た後、真空還元炉で還元・焼鈍して製品としており、真空還元炉はこの工程の主要設備である。

2.2 真空還元反応

Cr と C を予合金化した鋼粉を加熱すると、次の (1)~(4) の反応が起こる。



このときの還元機構概念図を Fig. 2 に示す。加熱により粒子内の C が拡散し、粒子表面の Cr_2O_3 等を還元する。還元生成ガスである CO は、粒子表面から鋼粉の外へ抜ける。温度、炭素活量の一定の条件下では、この CO ガスを真空排気ポンプで排気して炉内を減圧することで、難還元性酸化物の還元が起こりやすくなることは、熱力学的に説明される¹⁾。

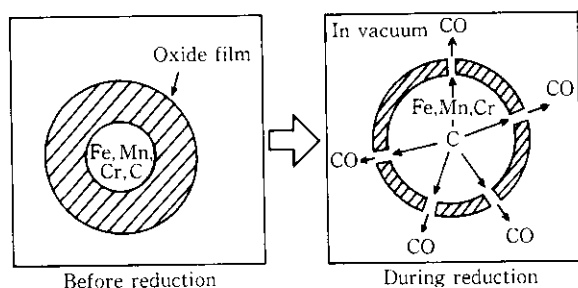


Fig. 2 Schematic illustration of reduction process in vacuum

3 真空還元炉の伝熱解析

3.1 予熱温度の影響

今回の No. 2 真空還元炉の設計にあたり、鋼粉の処理時間を短縮し、生産性を向上させる必要性から予熱温度を変更し、鋼粉の昇温速度に及ぼす影響について検討した。

真空還元炉では、Fig. 3 に示すような黒鉛製台車に、ステンレス容器に入れた鋼粉を積載して通炉している。そこで、Fig. 4 に示すようにこの黒鉛製台車を幅方向に 2 分割した左右対称断面の 2 次元伝熱モデルを考え、直接差分法を用いて黒鉛製台車の各段に積載

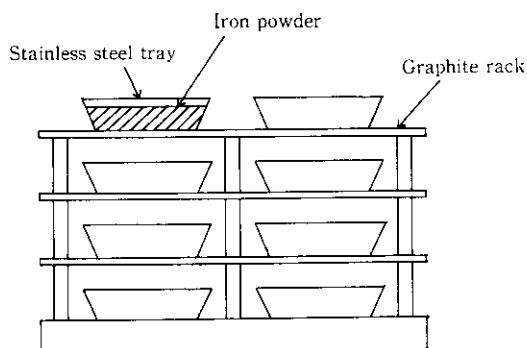


Fig. 3 Structure of graphite rack used No. 2 vacuum reduction furnace

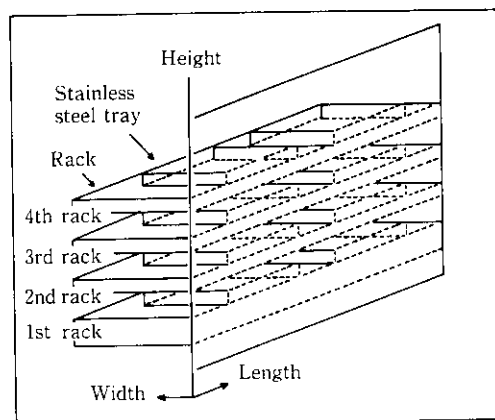
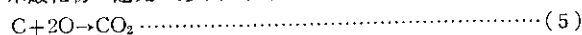


Fig. 4 Illustration of 2-dimensional heat transfer model

した鋼粉充填層中央部の温度履歴について計算した。Fig. 5 は予熱室保持温度 750°C と 800°C の場合の計算結果であり、実測値とは $\pm 20^\circ\text{C}$ の精度で一致することを確認した²⁾。Fig. 5 の結果から、予熱室での黒鉛製台車の鋼粉の昇温速度は、予熱温度を 50°C 上げることによって約 17% 速くなることが明らかとなった。また、このとき予熱室の復圧状態から、予熱室でも反応が生じ、還元反応を予熱室に取り込むことができることも確認した。この予熱室での反応は、標準生成エネルギー温度線図³⁾ から主として還元されやすい Fe 系酸化物の還元であり、以下に示す反応が生じている。



これにより加熱室での還元反応時間を短縮でき、約 14% の生産性向上が可能となる。

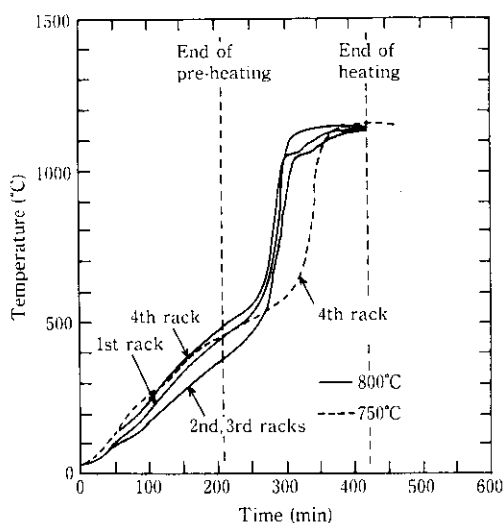


Fig. 5 Simulation results of heating behavior for packed Cr-alloyed steel powders on a graphite tray

3.2 鋼粉充填厚みの影響

真空還元においては、ヒーターからの輻射熱が鋼粉充填層表面に伝わり、鋼粉内部へと伝達していく。このことから還元反応時間は鋼粉充填厚みに影響されると考えられ、今回、処理時間の短縮を目的として、鋼粉充填表面と内部の温度差について検討し、鋼粉充填厚みが還元反応時間に及ぼす影響について調べた。

黒鉛製台車の段数を8段として鋼粉充填厚みを従来の4段の場合の1/2とし、1台車あたりの鋼粉の総積載量を変えずに鋼粉充填厚みを変えたときの鋼粉の温度を、前述したシミュレーションモデルを用いて計算した。また、黒鉛製台車の棚板の材質を従来のグラファイト焼成品から炭素繊維強化材に変更し、多段化すると同時に軽量化し、台車頭熱を22.6%低減させた場合について熱効率を計算した。Fig. 6には、一例として鋼粉充填厚みを1/2とした場合の昇温時の鋼粉温度の計算結果を示す。この結果から、予熱時の昇温速度はFig. 5の予熱温度800°Cの場合よりさらに大きくなり、さ

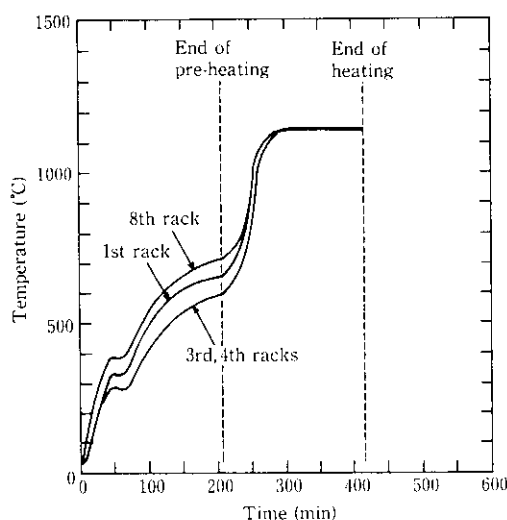


Fig. 6 Simulation results of heating behavior for packed Cr-alloyed steel powders on a carbon reinforced new material tray

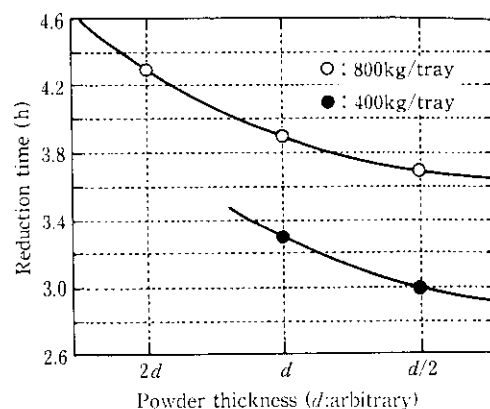


Fig. 7 Effect of thickness of packed Cr-alloyed steel powders on reduction time in vacuum reduction furnace

らに昇温時には各段に生じる温度差が、加熱均熱時には低減された。また鋼粉充填層表面と内部の温度差は、加熱室の加熱開始時点で500°Cであったものが100°Cへとより均一化されることが明らかになった。この温度の均一化は、台車頭熱を低減できたことおよび鋼粉充填厚みが薄くなったことで鋼粉内の伝熱が向上したことに起因している。

つぎに実際に真空還元炉で鋼粉充填厚みを変更して通炉した。その時の還元反応時間をFig. 7に示す。鋼粉充填厚みを従来の1/2にすることで、還元反応時間を約9%短縮できた。

No. 2 真空還元炉では、以上のような検討を踏まえ、予熱室の最高温度を800°Cとした。また、黒鉛製台車は炭素繊維強化材の棚板を採用して台車頭熱を低減させたが、段数については後述する自動化を達成すること、および早期立上げを実現するという観点から4段として1段の有効スペースを十分にとるようにした。

4 No. 2 真空還元炉設備の概要

4.1 設備レイアウト

Fig. 8にNo. 2 真空還元炉とその付帯設備のレイアウトを示す。

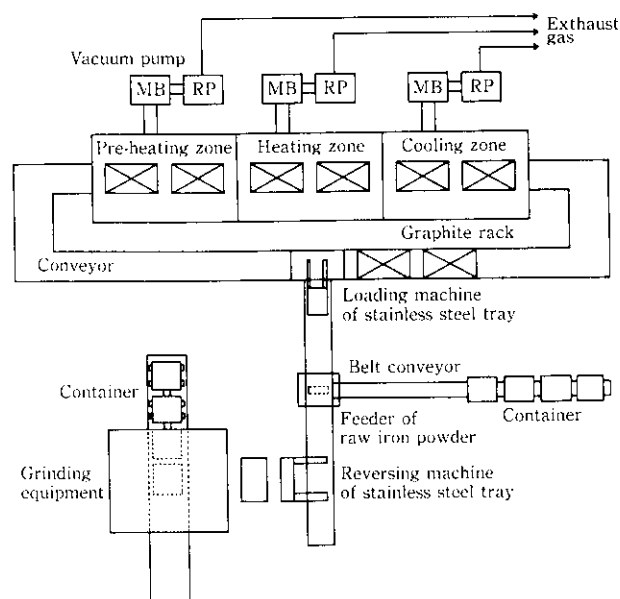


Fig. 8 Layout of No. 2 vacuum reduction equipment

真空還元炉の周囲には搬送コンベアーが配置され、鋼粉を積載した黒鉛製台車がこの上を移動する。搬送コンベアー横には積替機、反転機、供給装置および粉碎設備が設置され、これらの付帯設備により黒鉛製台車への鋼粉の積み込み、積卸しならびに還元ケーキの処理が自動的に行われる。

4.2 処理フロー

Fig. 9 に真空還元炉設備の処理フローを示す。真空還元炉で処理された黒鉛製台車は、搬送コンベアーで積替機まで運ばれる。黒鉛製台車は 8 枚のステンレス容器が積載されており、ステンレス容器は積載機で 1 枚ずつ積卸され、さらに反転機によって還元ケーキが取り出される。この還元ケーキは、粉碎設備によって粉碎されて中間製品となる。一方、空になったステンレス容器にはコンテナから切り出された還元前の鋼粉が供給装置から充填され、さらに積替機によって再び黒鉛製台車に積込まれる。このように、鋼粉の供給から通炉、還元ケーキの取り出しおよび粉碎まで一貫した自動処理設備となっている。真空還元炉の処理時間は 1 室 2.67 h (サイクルタイム) である。

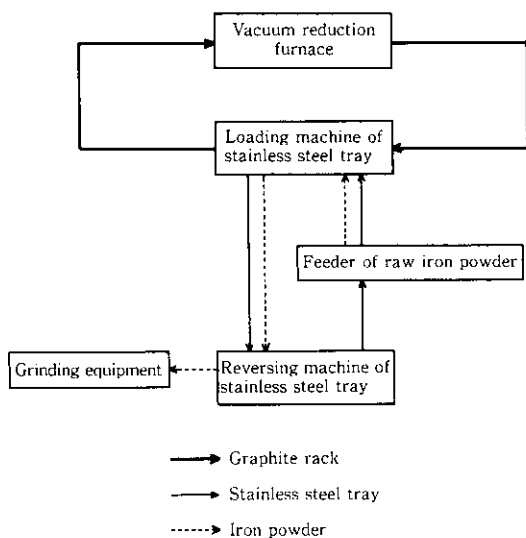


Fig. 9 Flow of vacuum reduction process

4.3 真空還元炉の構造

真空還元炉本体の側面図を Fig. 10 に、その外観を Photo 1 に示す。真空還元炉は、予熱室、加熱室および冷却室を有する 3 室セミバッチ式の炉であり、それぞれ装入扉、中間扉および抽出扉で完全に密閉することができる。真空排気系統は各室にそれぞれ設置されており、また、予熱室および加熱室には個別のヒーターが設置されているので、各室に完全に独立したヒートパターンと圧力パターンを設定できる。No. 1 真空還元炉では 1 室当たり黒鉛製台車 1 台を装入して処理していたが、No. 2 真空還元炉では 1 室当たり黒鉛製台車 2 台を装入し、同じ処理時間で従来の 2 倍の処理能力を実現させた。また、各室間の搬送はキャリッジフォークにより 2 台車同時に行い、キャリッジフォークの材質には耐熱鋼を使用するとともに、変形が生じにくい構造として 2 台車同時搬送の信頼性を向上させた。炉の基本仕様については No. 1 真空還元炉とほぼ同じであるが、処理量が 2 倍となるため、排気能力は No. 1 真空還元炉の 2 倍、ヒーター容量は 2 倍以上とした。

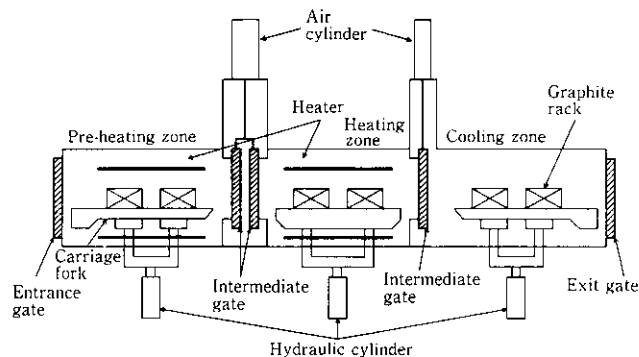


Fig. 10 Vertical sectional view of No. 2 vacuum reduction furnace

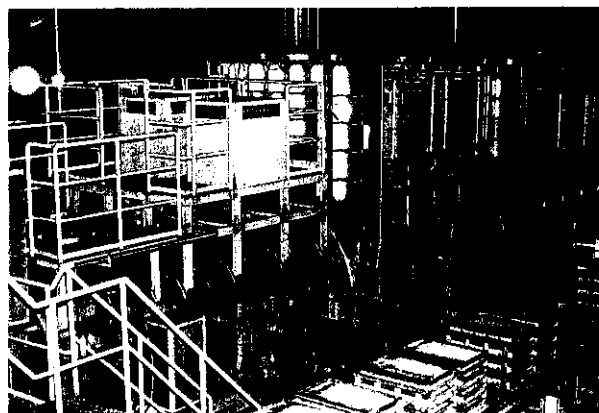


Photo 1 Appearance of No. 2 vacuum reduction furnace

4.4 ヒーター容量の決定

No. 2 真空還元炉では 200 t/月の能力を実現するため、伝熱シミュレーションモデルおよび実際の鋼粉の温度測定結果から、2.67 h/サイクルのヒートパターンを決定した。このときの熱計算結果を Table 1 に示す。2.67 h/サイクルとするためには予熱室および加熱室での昇温時間をそれぞれ 1.08 および 0.67 h とする必要がある、それに見合うようヒーター容量を決定した。

Table 1 Heat balance of No. 2 vacuum reduction furnace

		Pre-heating zone	heating zone
Heat up period (h)		1.08	0.67
Requisite calorie (kWh)	Graphite rack	143	131
	Iron powder	111	79
	Stainless steel tray	12	11
	Heat of reaction	—	29
	Total	266	250
Requisite output of heater (kW)		246	373
Radiation calorie (kW)		52	116
Heater capacity (output 85%) (kW)		351	575

4.5 付帯設備の自動化

4.5.1 積替機

黒鉛製台車へのステンレス容器の積み込み、積卸しを Fig. 11 に示

Table 2 Chemical composition and powder characteristics of Cr-alloyed steel powder

	Chemical composition (wt %)								Apparent density (Mg/m ³)	Green density (Mg/m ³)	Rattler value (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	O			
No. 1 VRF	0.012	0.02	0.74	0.018	0.011	1.10	0.30	0.182	2.82	7.05	0.48
No. 2 VRF	0.008	0.02	0.76	0.018	0.012	1.12	0.31	0.156	2.80	7.07	0.46

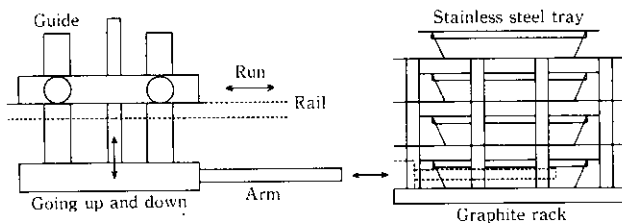


Fig. 11 Loading machine of stainless steel tray

すような積替機によって行っている。すなわち積替機のアームを黒鉛製台車内に挿入し、ステンレス容器を1枚ずつ持ち上げて積卸しを行う。また、積込む場合はその逆の動作を行う。

4.5.2 反転機

反転機は Fig. 12 に示すように、ステンレス容器の縁をつかんで反転させるアームと還元ケーキを受けるテーブルから成る。ステンレス容器から還元ケーキを取り出す際、テーブルのようなフラットな面では還元ケーキが完全に取り出せないことが、試験機を用いたテストで判明したため、テーブル上に設けたスラブでステンレス容器の縁を受け、還元ケーキをその内側に落とすようにした。これにより、還元ケーキがステンレス容器に焼結によって付着している場合でも 100% 取り出すことができる。

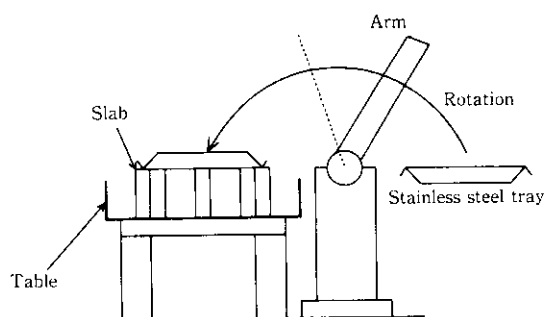


Fig. 12 Reversing machine of stainless steel tray

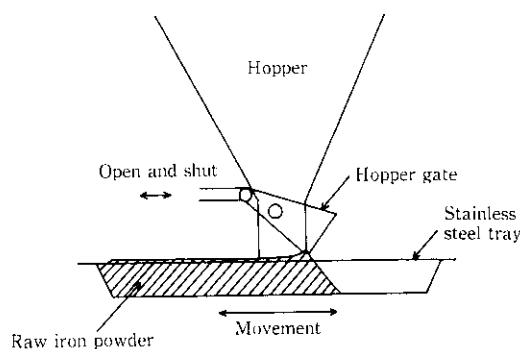


Fig. 13 Feeder of raw iron powder

4.5.3 供給装置

鋼粉の供給はステンレス容器内に鋼粉を均一な厚みで充填するため、Fig. 13 に示すように、ホッパーゲートを開いた状態でステンレス容器を移動させる方式を採用した。この方法は、供給時に振動を与える必要がないので、粉塵の発生がない。

5 操業と品質

5.1 操業状況

No. 2 真空還元炉は 1991 年 7 月に稼働し、設備能力としてはサイクルタイム 2.67 h、生産能力 200 t/月を有する。操業成績は No. 1 真空還元炉に比べて電力原単位は 76%、作業人員は 67% まで削減できた。

5.2 Cr 系合金鋼粉の品質

Table 2 に今回建設した No. 2 真空還元炉ならびに No. 1 真空還元炉で製造される 1% Cr 系合金鋼粉、KIP 4100 V の品質特性を示す。No. 1 および No. 2 真空還元炉の基本性能はほぼ同じであるが、No. 2 真空還元炉製品の方が C、O の値が低く、圧粉体密度も若干向上している。これは No. 2 真空還元炉では昇温が速く、高温での還元、焼鈍時間が No. 1 真空還元炉に比べ、より長く確保できているためと推察される。また、還元後の C、O のバランスを調整することで、C=0.005%、O=0.133% で圧粉体密度 7.10 Mg/m³(成形圧力 686 MPa) が得られている。

6 結 言

千葉製鉄所鉄粉工場に新たに稼働させた、No. 2 真空還元炉の設備概要と製品品質を紹介した。まとめを以下に示す。

- (1) No. 2 真空還元炉は 1 室の処理量を従来の 2 倍とし、生産能力 200 t/月を有する。
- (2) 従来人力で行っていた真空還元炉前後の処理作業を自動化し、鋼粉の供給から通炉および還元ケーキの粉碎まで一貫した自動処理システムとした。
- (3) 本設備により製造される 1% Cr 含有合金鋼粉 (KIP 4100 V) は従来品と同等かそれ以上の圧粉体密度を示し、成形圧力 686 MPa で平均 7.07 Mg/m³ が得られている。

参 考 文 献

- 1) 大和宣介, 小倉邦明, 初谷栄治, 前田義昭: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 3, 32
- 2) 赤岡和夫, 田村 望, 國部秋夫, 駒村宏一, 矢埜浩史: 粉体粉末冶金協会講演概要集, (1990), 18
- 3) 大谷正康: 「鉄冶金熱力学」, (1971), 103 [日刊工業新聞社]
- 4) 赤岡和夫, 田村 望, 駒村宏一, 矢埜浩史: 粉体および粉末冶金, 38 (1991) 1, 3