
操業管理指数の導入による焼結鉱品質制御技術の向上

Quality Control of Sinter With New Operational Indexes

渡辺 実(Minoru Watanabe) 老山 太輔(Daisuke Oiyama) 竹原 亜生(Tsuguo Takehara) 篠崎 佳二(Keiji Shinozaki) 国分 春生(Haruo Kokubu) 佐々木 晃(Akira Sasaki)

要旨：

銑鉄コストの低減策の一つとして、焼結鉱の低 SiO₂ 低 FeO 化が行われている。一方、この対策は、最近の減産とあいまって、焼結鉱品質、特に還元粉化性の感化を招いており、還元粉化性制御技術の確立が重要な課題となっている。そのため還元粉化性の変動原因調査を原料および焼成条件の両面から進めてきた。その結果、原料面では、鉱石粒度別化学成分の還元粉化性に対する重回帰分析から求めた指数 Rpoint を、また焼成条件面では、単位風速あたりの燃焼前線進行速度 FFS/Q を見出し、実操業での還元粉化性の制御に役立っている。

Synopsis：

SiO₂ and FeO contents in sinter have been decreased to lower the production cost of pig iron. However, a low production rate of sinter results in deteriorating Reduction Degradation Index (RDI) of sinter. In consequence, it has become necessary to establish controlling measures to keep RDI at a low level. For this purpose, the cause of fluctuation of RDI has been investigated from the viewpoints of raw material properties and sintering operation, and two indexes, Rpoint and FFS/Q, have been newly found to be applicable for practical operation. The value of Rpoint which indicates the effect of each material on RDI, is calculated from the multiple regression analysis on the effect of the chemical compositions of raw material with a definite particle size range. The index "FFS/Q", the flame front speed at unit suction gas velocity, means the effect of the content and size of coke in sinter mix on RDI.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

渡辺 実^{*2} 老山 大輔^{*3} 竹原 亜生^{*4} 篠崎 佳二^{*5} 国分 春生^{*6} 佐々木 晃^{*7}

Quality Control of Sinter with New Operational Indexes

Minoru Watanabe, Daisuke Oiyama, Tsuguo Takehara, Keiji Shinozaki, Haruo Kokubu, Akira Sasaki

要旨

鉄鉄コストの低減策の一つとして、焼結鉱の低 SiO_2 、低 FeO 化が行われている。一方、この対策は、最近の減産とあいまって、焼結鉱品質、特に還元粉化性の悪化を招いており、還元粉化性制御技術の確立が重要な課題となっている。そのため還元粉化性の変動原因調査を原料および焼成条件の両面から進めてきた。その結果、原料面では、鉱石粒度別化学成分の還元粉化性に対する重回帰分析から求めた指数 R_{point} を、また焼成条件面では、単位風速あたりの燃焼前線進行速度 FFS/Q を見出し、実操業での還元粉化性の制御に役立てている。

Synopsis:

SiO_2 and FeO contents in sinter have been decreased to lower the production cost of pig iron. However, a low production rate of sinter results in deteriorating Reduction Degradation Index (RDI) of sinter. In consequence, it has become necessary to establish controlling measures to keep RDI at a low level. For this purpose, the cause of fluctuation of RDI has been investigated from the viewpoints of raw material properties and sintering operation, and two indexes, R_{point} and FFS/Q , have been newly found to be applicable for practical operation. The value of R_{point} which indicates the effect of each material on RDI, is calculated from the multiple regression analysis on the effect of the chemical compositions of raw material with a definite particle size range. The index " FFS/Q ", the flame front speed at unit suction gas velocity, means the effect of the content and size of coke in sinter mix on RDI.

1. 緒 言

近年、高炉プロセスにおけるスラグ比の低減、ガス利用率の向上、および焼結プロセスにおける副原料使用量の低減を目的として、焼結鉱中の SiO_2 と FeO の低減が行われている。しかし、この対策は最近の減産とあいまって、焼結鉱品質、特に還元粉化指数（以下 RDI と呼ぶ）を悪化させており、焼結操業における RDI 制御技術の確立が重要な課題となっている。そのため千葉製鉄所では原料および焼成条件の両面から RDI の変動原因に関する調査と対策を進めてきた。これらの調査から、RDI 制御に有効な指数が得られ、それを実操業に適用して良好な結果を得たので、以下に報告する。

2. 最近の操業条件と焼結鉱品質の推移

Fig. 1 に千葉第 4 焼結工場における最近の生産率と焼結鉱品質の推移を示した。

焼結鉱中の SiO_2 は、最近では 5.4% まで低下させている。

FeO は、Fig. 2 に示すように、高炉内での焼結鉱の被還元性と負の相関にあるため、低 FeO 焼結鉱の製造が指向されている。しかし、Fig. 1 に示した FeO は同一水準ないし若干上昇傾向にある。これは RDI の悪化に対し焼成熱量を増加させたためである。

焼結鉱の常温強度を示す落下強度 S. I. は、Fig. 1 に示すよう

に、 SiO_2 の低下にもかかわらず、高水準で推移している。これは、生産率の低下に合わせて焼結機上原料の高層厚化あるいは高充填密度化などにより、焼結層の高温保持時間を延長させ、 SiO_2 の低下にともなう溶融結合量の低下を抑制したためである。

高炉内での低温域（500～700℃）における焼結鉱の還元粉化性を示す RDI は、Fig. 1 に示すように、生産率の低下および SiO_2 の低下とともに悪化傾向を示している。還元粉化は、焼成過程の後半すなわち冷却過程で形成される特異な形態をもつヘマタイト（微晶状 2 次ヘマタイトと称される）が、マグネタイトに還元される際に生じる体積歪みに起因するといわれている^{1,2)}。したがって、前述のように、減産時に原料充填密度の上昇などの対策をとった場合には、冷却速度の低下を招き、RDI が悪化すると考えられている³⁾。また、RDI は、落下強度と同様に、溶融結合量の低下によっても悪化するため、最近の低 SiO_2 操業は RDI を悪化させる方向に作用している。

以上のような理由から、RDI 制御技術の確立が従来以上に重要になってきた。

3. RDI の変動原因調査

3.1 原料銘柄に関する調査

従来、原料面からの RDI 制御方法として、

*1 昭和 58 年 3 月 3 日原稿受付

*2 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室

*3 千葉製鉄所製鉄部原料処理課課長補

*4 千葉製鉄所製鉄部原料処理課課長

*5 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室主査（課長）

*6 技術研究所第 1 研究部製鉄研究室

*7 東京本社資源調査室主査（課長）

- (1) 化学成分 (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 など) の調整
- (2) RDI に悪影響を及ぼす鉱石の配合比制限
- (3) 蛇紋岩、転炉滓など副原料の粒度または配合比の調整などが行われている。

例えば、化学成分では、Fig. 3 に示すように、 SiO_2 含有量の

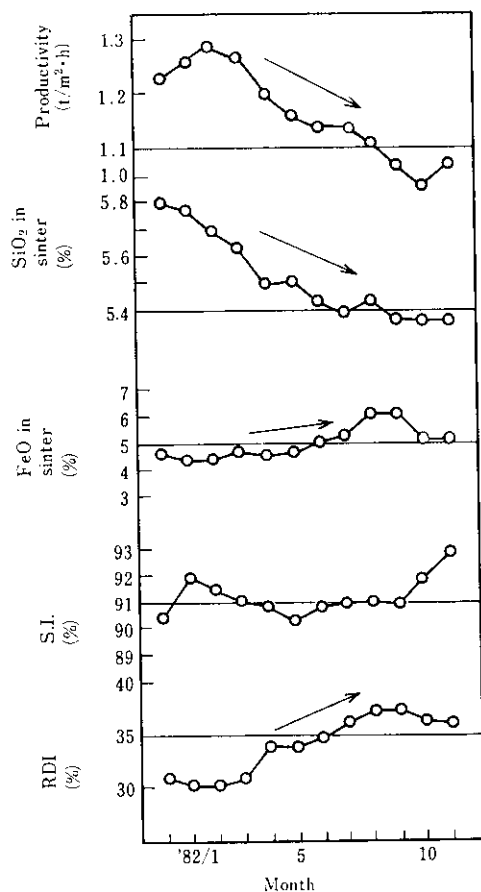


Fig. 1 Changes of productivity and quality of sinter at Chiba No. 4 sintering plant

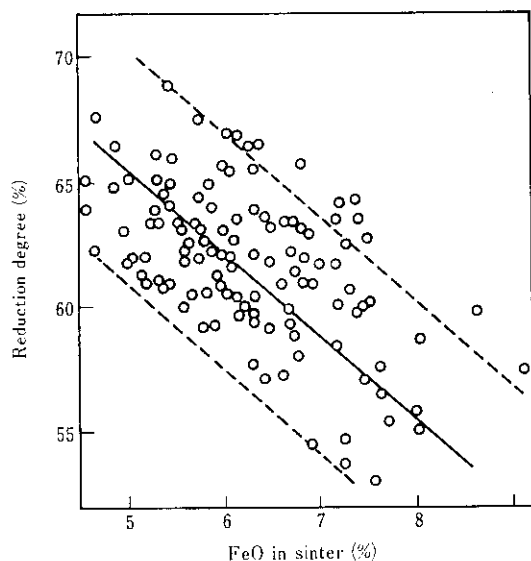


Fig. 2 Relation between FeO in sinter and reduction degree in BF

上昇とともに RDI が改善される。また、Fig. 4 に示すように、イスコール鉱石が RDI に悪影響を及ぼす鉱石であること、さらに副原料では、Fig. 5 に示すように、転炉滓配合比と RDI との間に負の相関があることなどが知られている。

このように、原料特性が RDI に影響を及ぼすため、RDI を低値に安定させる原料配合方法を見出す必要がある。しかし、これらの制御方法のうち焼結鉱化学成分の調整は、鉄鉄成分や高炉滓の物理的性質など高炉操業面からの制約があり、調整手段としての自由度が小さい。一方、鉱石銘柄あるいは副原料の種類と RDI の関係については、単相関式で表されている場合が多

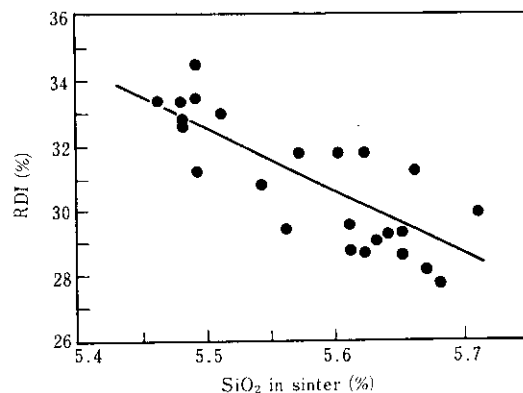


Fig. 3 Relation between SiO_2 in sinter and RDI at Chiba No. 4 sintering plant

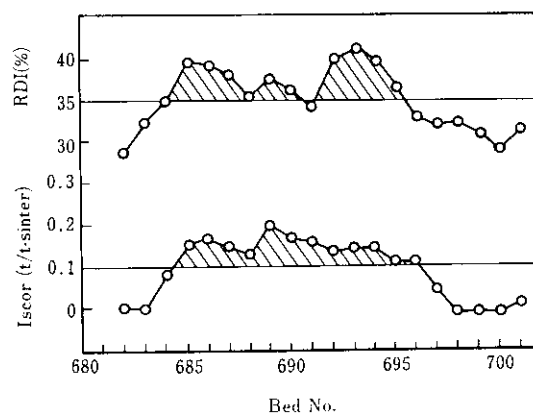


Fig. 4 Relation between RDI and Iscor ore blending ratio at Chiba No. 3 sintering plant

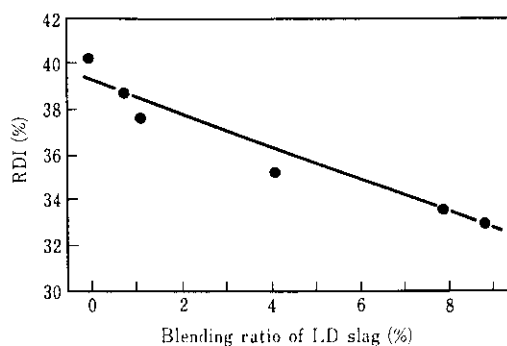


Fig. 5 Effect of LD slag on RDI at Chiba No. 4 sintering plant

く、いまだ鉱石銘柄などの原料特性の影響を統一的に把握できるまでに至っていない。

そこで著者は、代表的な焼結原料鉱石37種について粒度別化学成分を求め、それらを配合した混合原料の化学成分の平均値とRDIの関連を重回帰分析により調査した。その結果、細粒(−250 μm)中のSiO₂含有量および中間粒(2 mm~250 μm)中のAl₂O₃含有量が有意性の高い因子として抽出された。そこで新たにこれら2因子を説明変数とするRDIに関する重回帰式を求め、計算を簡略化するため定数項を除いた指数、 R_{point} を(1)式のように定めた。

$$R_{point} = -6.41 \cdot (-250 \mu\text{SiO}_2) + 2.55 \cdot (2 \text{ mm} \sim 250 \mu \text{ Al}_2\text{O}_3) \quad (1)$$

ここで

(−250 μSiO₂) : −250 μm 粒子中 SiO₂ 量の全重量に占める割合 (wt %)

(2 mm~250 μAl₂O₃) : 2 mm~250 μm の粒子中 Al₂O₃ 量の全重量に占める割合 (wt %)

R_{point} の小さい銘柄ほど RDI は小さくなる。

Table 1 に一部の原料銘柄についての R_{point} を示す。 R_{point} の小さい、つまり RDI の値を小さくする銘柄としては副原料では蛇紋岩、転が滓、また鉱石ではマウントニューマン、キャロルレークなどが挙げられる。一方、 R_{point} の大きい、つまり RDI の値を大きくする銘柄としてイスコール、MBR などの鉱石を挙げることができる。この R_{point} による原料鉱石の評価は経験上の評価とも良く一致しており、 R_{point} が原料鉱石評価指数として有効であることがわかる。

Table 1 R_{point} of ores

Ore	−250 μSiO ₂ (%)	2 mm~250 μ Al ₂ O ₃ (%)	R_{point}
Mt. Newman	3.1	0.9	−17.5
Carol Lake	2.6	0.04	−16.7
Hamersley	1.4	0.9	−6.7
MBR	0.2	0.2	1.0
Iscor	0.2	0.6	0.3
Serpentine	6.0	0.6	−36.8
LD slag	4.1	0.9	−23.8
Dolomite	0.1	0.2	−0.4

3・2 焼成条件に関する調査

焼成条件面では、従来から、焼成過程の熱履歴に直接影響する焼結原料中のコークス量、および粒径の調整によって RDI を制御してきた。Fig. 6 と Fig. 7 に、それぞれ同一配合原料使用時の原料中カーボン量ならびにコークス粒径と RDI との関係を示す。RDI は原料中カーボン量の増加あるいはコークス粒径の増大により改善される。

以上のようなコークス量およびコークス粒径の RDI に及ぼす影響を焼結層内熱履歴の面から明らかにするために、コークス量、粒径および吸引風速を変化させた焼結鍋試験を行った。

Fig. 8 に試験装置の概略を、Fig. 9 に同装置における焼結層内熱履歴の代表例を示す。データの解析にあたっては、(2)~(4)式に基づいて、焼結層の中下部の情報から層内の最高温度 T_{max} 、冷却速度 V_{cool} ならびに燃焼前線進行速度 FFS を算出した。

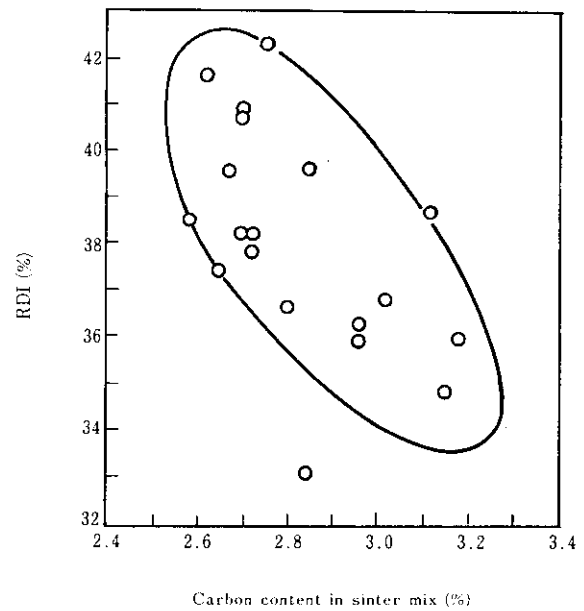


Fig. 6 Relation between carbon content in sinter mix and RDI at Chiba No. 4 sintering plant

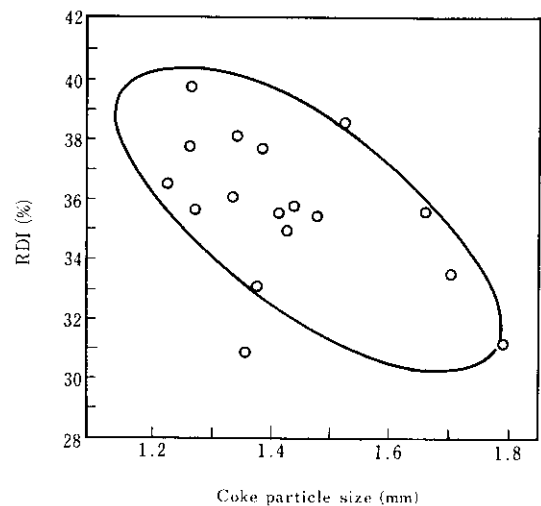


Fig. 7 Relation between coke particle size and RDI at Chiba No. 4 sintering plant

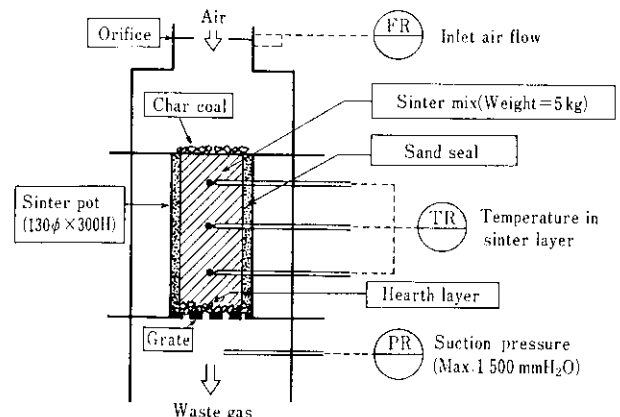


Fig. 8 Apparatus for sintering test

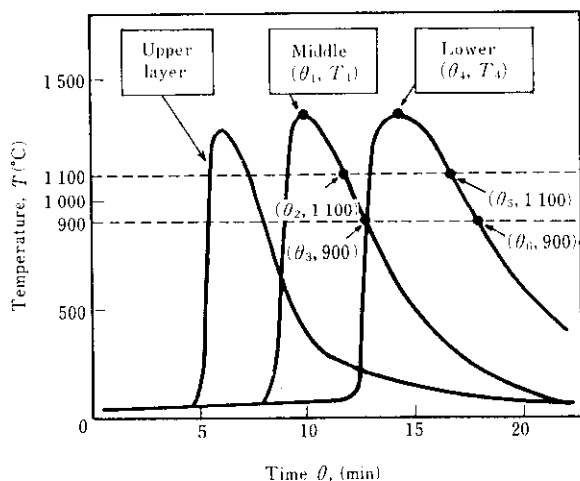


Fig. 9 Typical temperature profile in sintering pot

$$T_{\max} = \frac{1}{2}(T_1 + T_4) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$V_{\text{cool}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1100 - 900}{\theta_3 - \theta_2} + \frac{1100 - 900}{\theta_6 - \theta_5} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{FFS} = \frac{\Delta H}{(\theta_4 - \theta_1)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

T_1, T_4 : 焼結層の中, 下部における最高温度

θ_1, θ_4 : 最高温度到達時刻

θ_2, θ_5 : 降温過程における1100°C通過時刻

θ_3, θ_6 : 降温過程における900°C通過時刻

ΔH : 焼結層の中部~下部測定点間の距離

実験結果を Fig. 10 に示す。コークス量の増加は主に層内最高温度 $T_{\max}$ を上昇させ、コークス粒径の増大は冷却速度 V_{cool} を上昇させることによって、いずれも RDI を改善することが明らかになった。しかし、吸引風速を上昇させても RDI は改善されなかった。これは冷却速度 V_{cool} の上昇にもかかわらず、層内最高温度 $T_{\max}$ が低下し、両者の RDI に対する効果が相殺されたためである。

一方、この実験から上述したコークス量およびコークス粒径の RDI に対する影響を統一的に説明できる指数として、単位風速あたりの燃焼前線進行速度、FFS/Q を導入した。FFS/Q は燃焼前線進行速度と吸引風速とを関係づける指数であり、コークス添加の条件によってほぼ決定される。すなわち、Fig. 11 に示すように、FFS/Q はコークス量およびコークス粒径の増加により減少するが、吸引風速によっては変化しない。また、Fig. 12 に示すように、FFS/Q が小さいほど RDI は改善される。

以上のように、コークス量およびコークス粒径の RDI に対する影響は、焼成過程の熱履歴を特徴づける層内最高温度と冷却速度によっても説明されるが、コークスの燃焼特性を示す指数 FFS/Q によっても説明可能である。これは、燃焼特性指数 FFS/Q がコークスの量、粒径などの存在状態と風速分布を介して熱履歴を説明できる指数であるためと考えられる。

4. 実操業への適用

4.1 原料評価指数 R_{point} の適用

前章で、各原料銘柄ごとの R_{point} が経験上の鉱石評価と良く

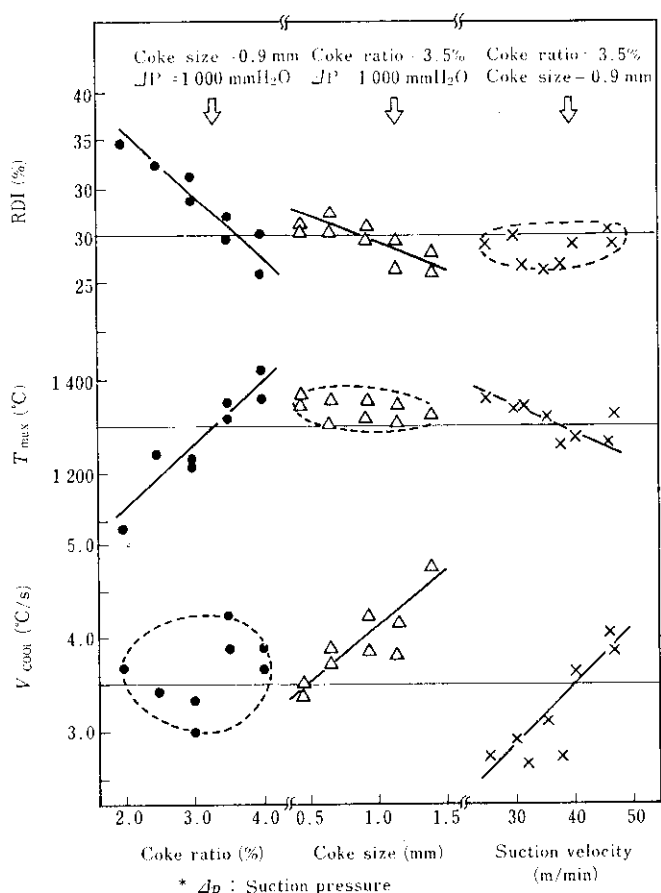


Fig. 10 Effect of coke ratio, coke size and suction velocity on RDI and heat pattern indexes at pot tests

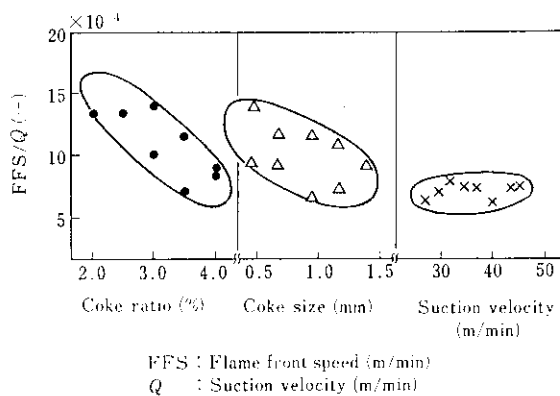


Fig. 11 Changes of FFS/Q with coke ratio, coke size and suction velocity at pot tests

一致すると述べた。実操業では、原料配合計画段階で、各銘柄ごとの R_{point} を加重平均して求めた配合原料の R_{point} を用いることにより、RDI の変化を予測し、かつ修正することができる。

Fig. 13 に、千葉第4焼結工場における配合原料の R_{point} および実績 RDI の推移を示す。両者は良く対応している。現在、千葉製鉄所では原料配合に起因する RDI 変動を抑えるため、RDI の値を大きくする鉱石の使用制限、あるいは転炉滓などの副原料の適正な配合を行い、配合原料の R_{point} をほぼ一定に管理している。Fig. 13 に示すように、千葉第4焼結工場では、1981年6月以降 R_{point} を -6~-8 の範囲(図中の斜線領域)で管理している。

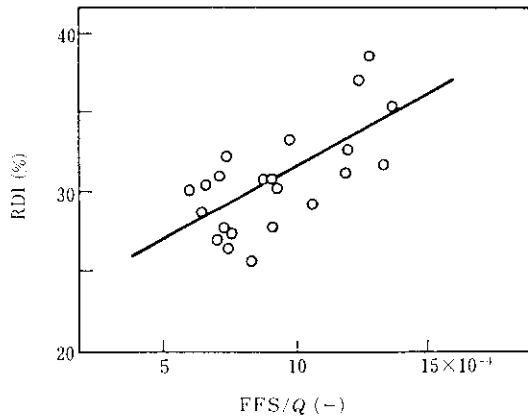


Fig. 12 Relation between FFS/Q and RDI at pot tests

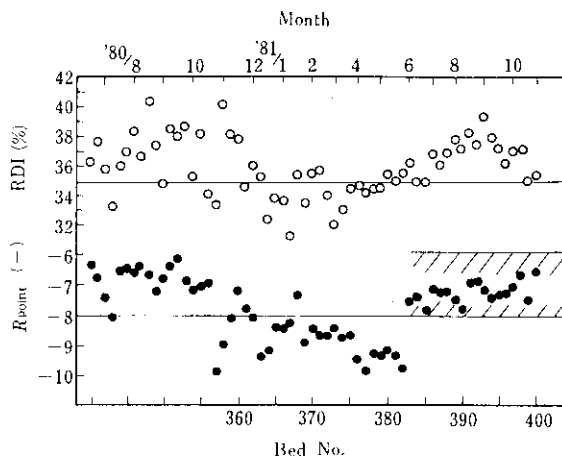


Fig. 13 Relation between RDI and R_{point} at Chiba No. 4 sintering plant

4.2 燃烧特性指数 FFS/Q の適用

4.2.1 数式モデルによる FFS/Q の推定

実操業での FFS/Q を厳密に求めるためには、鍋試験と同様に、焼成過程の熱履歴ならびに吸引風速を測定する必要がある。しかし以下に述べる風速分布モデル⁵⁾を用いることにより、熱履歴を測定せずに FFS/Q が推定できる。

本モデルの基礎式は(5), (6), (7), (8)である。(5)式に示すように、FFS/Q は未知定数 XKF として定義されている。

$$FFS = dy_F/dt = XKF \cdot Q \quad \dots(5)$$

$$FBS = dy_B/dt = XKB \cdot Q \quad \dots(6)$$

$$y_B \cdot R_{SHO} + (y_F - y_B) \cdot R_{NEN} + (H - y_F) \cdot R_{GEN} = \Delta P / Q^n \quad \dots(7)$$

$$R_{SHO} = m \cdot R_{NEN} \quad \dots(8)$$

FFS: 燃焼前線 (Flame front plane) 進行速度

FBS: 燃焼後線 (Flame behind plane) 進行速度

y_F, y_B : 焼結層表面から燃焼前線, 燃焼後線までの距離

t : 時間

XKF, XKB: 燃焼特性指数 (未知定数)

Q : 吸引風速

$R_{SHO}, R_{NEN}, R_{GEN}$: 焼結帯, 燃焼帯, 原料帯の通気抵抗指数 (未知定数)

H : 層厚

ΔP : 吸引負圧

n : レイノルズ数で決まる定数

m : 定数 (仮定値)

上記(5)~(8)式から得られる風速分布関数に焼結機長方向4点の吸引風速値を代入することにより、本モデルの未知定数の一つであるXKF, すなわち FFS/Q を求めることができる。

現在、本モデルは千葉第4焼結工場の計算機に入力されており、Fig. 14と同様の計算結果がCRT上に表示される。Fig. 14の上図は燃焼帯分布形状を、下図は吸引風速分布を示している。なお図中の□印はウインドボックス部での風速測定値を示している。

4.2.2 実操業への適用例

実操業試験時に求めた FFS/Q と配合原料中カーボン量ならびにコークス粒径との関係を Fig. 15 に示す。また、FFS/Q と RDI の関係を Fig. 16 に示す。鍋試験と同様に、FFS/Q は、原料中のカーボン量の増加あるいはコークス粒径の増大とともに低下し、RDI は FFS/Q の低下時に改善されることを確認できた。

Fig. 17 に、FFS/Q による RDI の制御例を示す。これは、たまたま配合原料中に細粒のコークスが混入した時の事例である。Fig. 17 の a) 図は、30分毎の FFS/Q を、b) 図は8h 毎の RDI (図中の□印) を示す。なお、b) 図中の×印は、各 RDI (図中の□印) の分析判明時点を示す。細粒コークスの混入とともに FFS/Q が上昇したため、RDI 分析結果を待たずに、コークスの増量

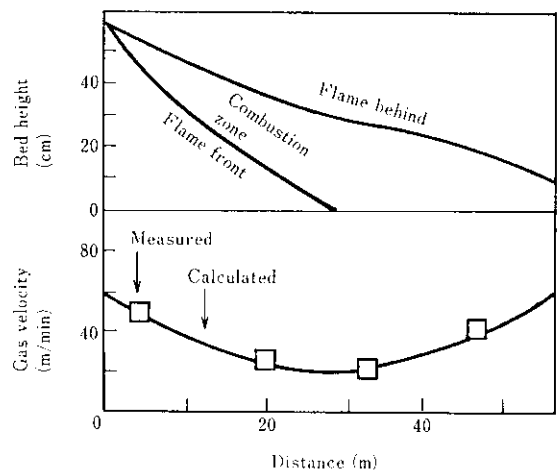


Fig. 14 Calculated gas flow distribution

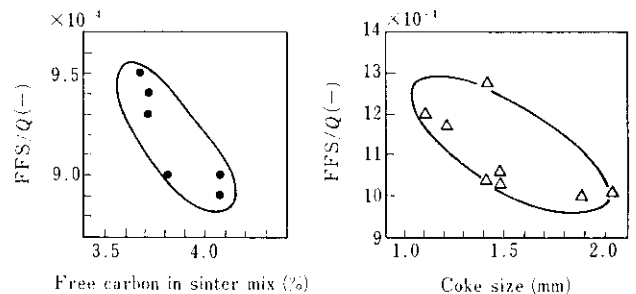


Fig. 15 Changes of FFS/Q with free carbon in sinter mix and coke size at Chiba No. 4 sintering plant

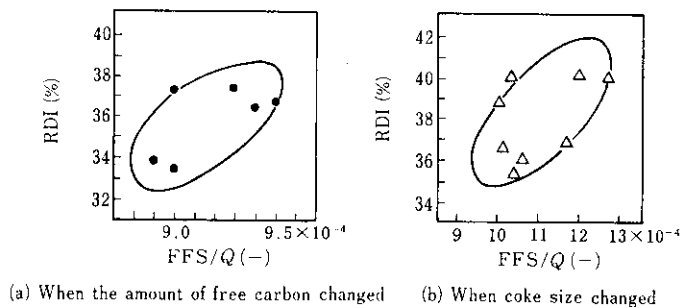


Fig. 16 Relations between FFS/Q and RDI at Chiba No. 4 sintering plant

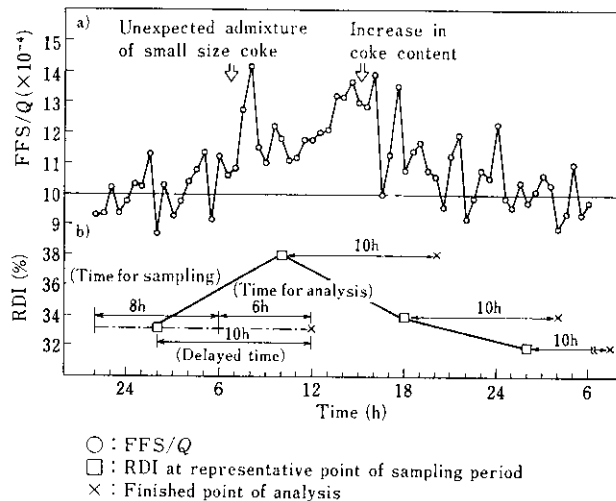


Fig. 17 An example of RDI-control by using FFS/Q at Chiba No. 4 sintering plant

操作を行い、FFS/Qを低下させた。その結果、一時的に上昇したRDIを、短時間で元の水準まで戻すことができた。通常、RDI分析には約6hを要するため、8h毎のサンプリング代表点から分析結果が判明するまでには約10hの遅れがある。従来は、分

析結果を待ってRDI制御を行っていたため、対策の遅れを招くことが多かったが、現在では、Fig. 17の事例に示したように、迅速かつ適切な処置をとれるようになっている。

以上のように、FFS/Qは焼成条件のRDIに対する影響を説明できるだけでなく、RDI制御の迅速化にも役立つ。特に、最近の操業においては、焼結鉱製造コスト低減を目的としてカーボン源が多様化しており、結果的にコークスの量や粒径などの変動を引き起こしている。こうした状況下において、両者の効果を迅速かつ統一的に評価できる指数をFFS/Qは、RDI制御に有効である。

4.3 操業改善結果

Table 2に、過去5年間のRDI規格達成率ならびに操業条件の推移を示した。

生産率の低下および焼結鉱 SiO_2 の低下などのRDI悪化要因があるにもかかわらず、RDI規格達成率の上昇が顕著にみとめられる。特に、1981年以降は98%程度まで向上している。これは、原料ならびに焼成条件の両面について、RDIの統一的評価指数を導入し、実操業に適用してきたことによる総合効果と考えている。

5. 結 言

焼結鉱の還元粉化指数RDIの変動原因に関する調査を原料および焼成条件の両面から行った。その結果、原料面では、鉱石粒度別化学成分のRDIに対する重回帰分析から求めた指数 $R_{\text{point}} = -6.41 \cdot (-250 \mu\text{SiO}_2) + 2.55 \cdot (2 \text{ mm} \sim 250 \mu \text{Al}_2\text{O}_3)$ を、また、焼成条件面では、焼結原料中のコークス量と粒径のRDIに対する影響を統一的に評価できる指数として、単位風速あたりの燃焼前線進行速度FFS/Qを見出した。この2つの指数を、実操業でのRDI制御手段として活用し、1981年以降、RDI規格達成率98%という好結果を得た。

Table 2 Changes of RDI and other operational factors at Chiba No.4 sintering plant

Year	Productivity (t/m ² ·h)	SiO ₂ in sinter (%)	FeO in sinter (%)	S.I. (%)	RDI (%)	Achievement ratio of RDI* (%)
1978	1.41	6.18	6.77	89.6	36.9	82.7
1979	1.46	5.94	5.91	89.6	34.7	89.0
1980	1.51	5.84	5.74	89.9	34.3	92.9
1981	1.27	5.68	5.59	91.2	35.0	97.8
1982	1.15	5.49	5.10	91.5	34.2	98.1

* Technical standard of RDI-control: RDI ≤ 40.0%

参 考 文 献

- 菅原欣一、佐藤勝彦：鉄と鋼，55(1969)13, 1107
- 川辺正行、稲角忠弘、品田功一：「自溶性焼結鉱の応用鉱物学的研究」，日本学術振興会，52巻1585
- 川崎製鉄(株)千葉製鉄所：日本鉄鋼協会共同研究会第53回製鉄部会53-8-共，(1978)
- 新日本製鉄(株)八幡製鉄所，生産技術研究所：日本鉄鋼協会共同研究会第58回製鉄部会58-1-共，(1981)
- 国分春生、佐々木晃、渡辺実、三木克之、竹原重生、大島位至：鉄と鋼，68(1982)4, S40