

Fig. 1. Set position of vertical probe.
(Muroran No. 4 B. F.)

2.2 垂直ゾンデの構造

室蘭製鉄所においては、これまでに非水冷のフレキシブル型垂直ゾンデ (管径 10.5 mmφ)¹⁴⁾、ファイバースコープを搭載した水冷式の剛体型垂直ゾンデ (管径 114.3 mm)¹⁵⁾ など、各種の垂直ゾンデを開発してきた。今回開発した装置は、それらの技術を応用して専ら装入物の炉内反応試験用として新に製作した非水冷の剛体型垂直ゾンデである。Table 2 に本ゾンデの設備仕様を、Fig. 2 にゾンデの構造を示す。ゾンデは管径 46.8 mmφ、全長 17.7 m である。ゾンデ本体上部にはシース熱電対 (CA, 3.2 mmφ) とガスサンプリング管 (13.8 mmφ) の挿入孔およびゾンデ引上げ時に焼結鉬の冷却促

進を図るための窒素ガスの導入孔が設けてある。ゾンデ内部のシース熱電対とガスサンプリング管の先端はゾンデ最先端に位置する。

ゾンデ最先端には、Fig. 3 に示す試料カプセルがネジ止めされている。試料カプセルのA室は炉内に挿入した焼結鉬が充填荷重および降下過程での摩擦、さらには

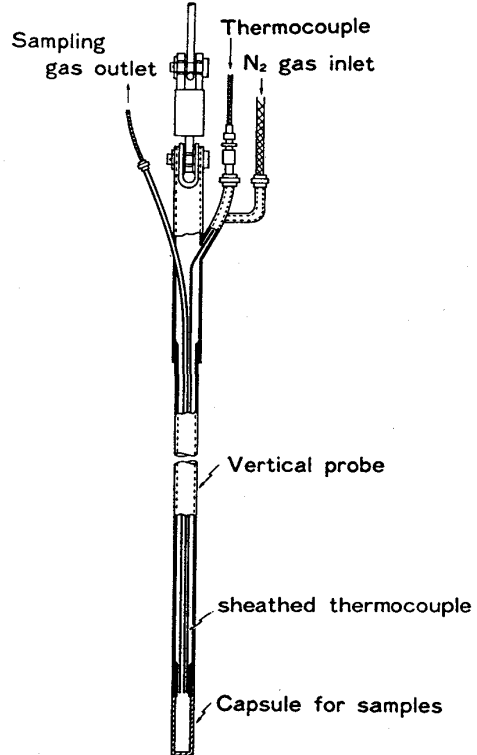
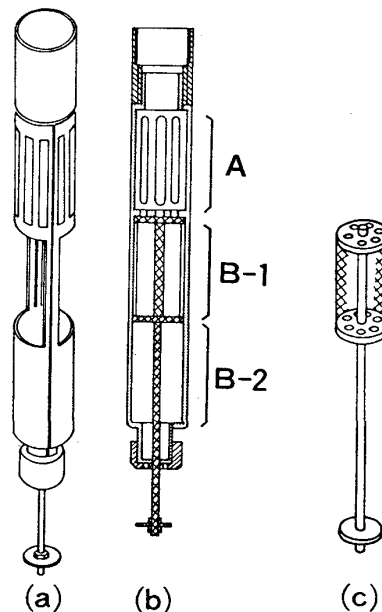


Fig. 2. Schema of apparatus.

Table 2. Specification of vertical probe.

Item	Specification
Winch	Ability 3 ton Wire diameter 18 mm Rise and fall speed 8 m/min (13.3 cm/s) Motor power 5.5 kW 6P 200V Set position 11FL (GL+49.75 m)
Probe	48.6 φ × 17 700 mm STPT 42 (Sch 40)
Capsules for samples	A 48.6 φ × 80 mm SUS 304 TP (Sch 40)
	B-1 48.6 φ × 80 mm SUS 304 TP (Sch 40)
Data obtained from probe	Gas composition (CO, CO ₂ , H ₂) Temperature, reduction degree and degradation degree of samples.



(a) Appearance
(b) A cross section
(c) Vessel (B-1)

Fig. 3. Capsules for samples.

Table 3. Properties of samples.

Samples No.	RDI (%)	JIS Reduction index (%)	Chemical composition (%)							
			T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	$\frac{CaO}{SiO_2}$
1	31.0	76.2	57.67	5.36	76.49	9.04	5.57	1.85	1.22	1.62
2	33.9	79.0	57.76	3.40	78.81	8.95	5.68	1.94	0.51	1.58
3	37.3	74.7	57.93	4.67	77.63	8.74	5.24	2.03	1.37	1.76
4	37.8	73.9	57.76	5.53	76.43	8.37	5.44	2.16	1.09	1.54
5	39.3	77.4	57.72	4.91	77.06	9.00	5.28	1.65	1.51	1.73
6	42.6	71.2	55.98	5.43	74.00	10.43	5.44	1.86	1.63	1.92
7	48.3	81.1	57.67	3.33	78.75	8.87	5.50	1.84	1.23	1.61
8	52.4	67.4	58.92	5.33	78.32	7.38	5.01	2.06	0.92	1.47

ゾンデ引き上げ時の機械力などによつて粉化しないように、カプセル側面の開孔部（スリット）の幅を6mmと狭くしてある。これに対して、カプセルのB-1室はカプセル側面の開孔部を広くし、炉内降下過程で水平方向の荷重が焼結鉄に直接かかる構造になっている。ゾンデ降下時は開孔室であるB-1室に試料は留まっている。しかし、ゾンデ引き上げ時には、最下端に取り付けた円板が装入物に引っかかつて、外筒が先に上がり、試料層は密閉室であるB-2室に移動する。このため試料は引き上げ時の機械力を受けて粉化することはない。したがつて、この試料カプセルを用いることにより、高炉内での焼結鉄の粉化率に及ぼす還元の影響と降下過程における水平荷重の影響を同時に測定することができる。

なお、試料回収を容易にして取り出しの際の粉化を防ぐために、カプセル本体は縦割り2分割方式とし、また下部からもガスが入るように、カプセル底面には6mmφ孔6個が開けてある。焼結鉄は1mm網目（ワイヤー太さ0.1mm）のカゴ（38mmφ×80mm^l、材質SUS304）に入れ、カプセルの各試料室に格納する。

2.3 ソンデ試験要領

本ゾンデによる試験要領は次のとおりである。

試料を格納したカプセルを先端に装着した垂直ゾンデをゾンデ挿入口より炉内原料堆積面まで機械的に押し込む。その後はゾンデ吊り下げワイヤーを緩め、装入物と共に自然降下させ、所定の深さに達した時点で、ゾンデ上部より窒素ガスを吹き込み、冷却を促進しながらインチによりゾンデを引き上げる。

なお、ゾンデは一気に炉外へ引き上げず、試料カプセルが挿入口直下に達したところでいつたん止め、カプセル温度が約60°Cになった時点で炉外へ引き上げ、ゾンデ本体から試料カプセルをはずし、カプセル内試料を回収する。

3. ソンデによる焼結鉄還元粉化状況調査

今回開発した垂直ゾンデを用いて炉外試験で測定される還元粉化指数RDIと高炉内の還元粉化量との関係を定量的に把握することを試みた。

なお、本垂直ゾンデにより採取した焼結鉄の粉化率を従来の水平ゾンデ[†]により採取した焼結鉄の粉化率と比較するため、水平ゾンデによる試料採取も垂直ゾンデ試験期間内の休風時に行つた。

3.1 供試焼結鉄

RDIが31~53%範囲の焼結鉄8種類を選び供試した。供試焼結鉄の粒径は15~20mm、組成はTable 3に示すとおりである。なお、焼結鉄の装入重量はカプセルA室、B-1室各100gとした。

各焼結鉄の組織の特徴を調べてみると、低RDI焼結鉄である試料番号1, 2の焼結鉄は未同化の赤鉄鉱系鉄石が分解したような斑状ヘマタイトと微針状あるいは針状のカルシウム・フェライトが主体であつた。一方、中~高RDI焼結鉄である試料番号3~8の焼結鉄は融体から生成した骸晶状あるいは蚕食状^{†2}のヘマタイトと柱状、板状カルシウム・フェライトが主体の組織であつた。

3.2 試験結果

3.2.1 炉内状況

試験は、Table 4に示す高炉操業条件下で行つた。炉内に挿入したゾンデは8~9cm/minの降下速度でストックライン下10mまで降下した。この間の炉内温度とガス利用率 $\left(\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO + CO_2} \times 100\right)$ の推移をFig. 4に示す。図から試験期間中、室蘭4高炉炉壁周辺部に

[†] ゾンデ内径100mm、挿入深さ3m、空冷方式、試料採取：ストックライン下11m、休風中。

^{†2} 一度融体から生成したヘマタイトが高塩基度の融液と包晶反応を起こして、蚕食状に分解しつつあるヘマタイト。包晶反応による柱状カルシウム・フェライトとの共存が特徴である。

Table 4. Operating conditions during test of Muroran No. 4B. F..

Productivity	2.27 t/m ³ ·d
Fuel ratio	497 kg/t·pig
Blast volume	1.202 Nm ³ /t·pig
Blast temp.	964°C
Top pressure	2.035 kgf/cm ²
Sinter ratio	76.5%

は、少なくともストックライン下 10 m あたりまで低温熱保存帯¹⁶⁾ (500~700°C) が存在していたと判断される。

3.2.2 回収焼結鉱の外観

Photo. 1 に炉内より回収した試料カプセルおよびカプセルより取り出した焼結鉱の外観を示す。写真からわかるようにA室より取り出した焼結鉱の大半は原形を保っていた。一方、B-2室に移動した試料層のカゴ側面(Photo. 1 (II))には水平荷重を受けて生じた凹凸が多数見られ、カゴより取り出した焼結鉱の壊れ方もA室の焼結鉱に比べ激しく(Photo. 1 (IV))炉内の水平荷重によつて粉化が増大することを示している。

3.2.3 回収焼結鉱の組織

還元によるき裂の発生状況を試料カプセルのA室(以下A法と記す)より回収した焼結鉱の組織から観察した。Photo. 2 に各回収焼結鉱の組織を示す。写真に示すようにいずれの焼結鉱中にもき裂が見られるが、き裂形態は低 RDI 焼結鉱と高 RDI 焼結鉱とは異なつて

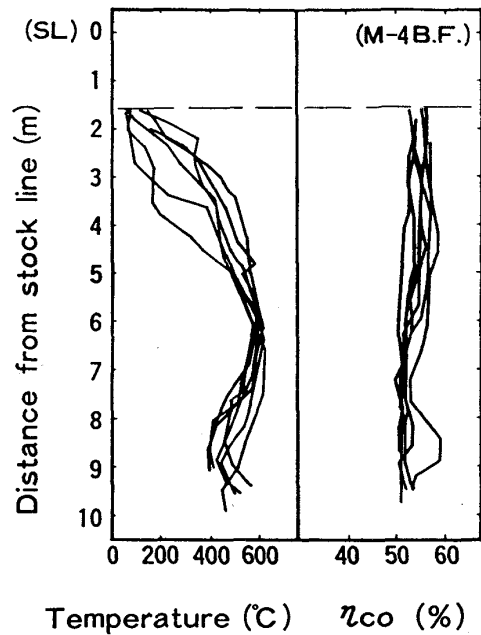


Fig. 4. Temperature distribution and η_{CO} in blast furnace during the test.

いる。

すなわち、試料番号 1 と 2 の低 RDI 焼結鉱の場合は、組織をブロック状に分断する直線状き裂が主体であり、き裂の数は比較的少ない。一方、試料番号 3~8 特に 7, 8 の高 RDI 焼結鉱の場合には、組織を微細に分断する放射状き裂が多数認められる。

これらのき裂形態は装入前の焼結鉱の組織と対応している。直線状き裂は斑状ヘマタイトと(微)針状カルシ

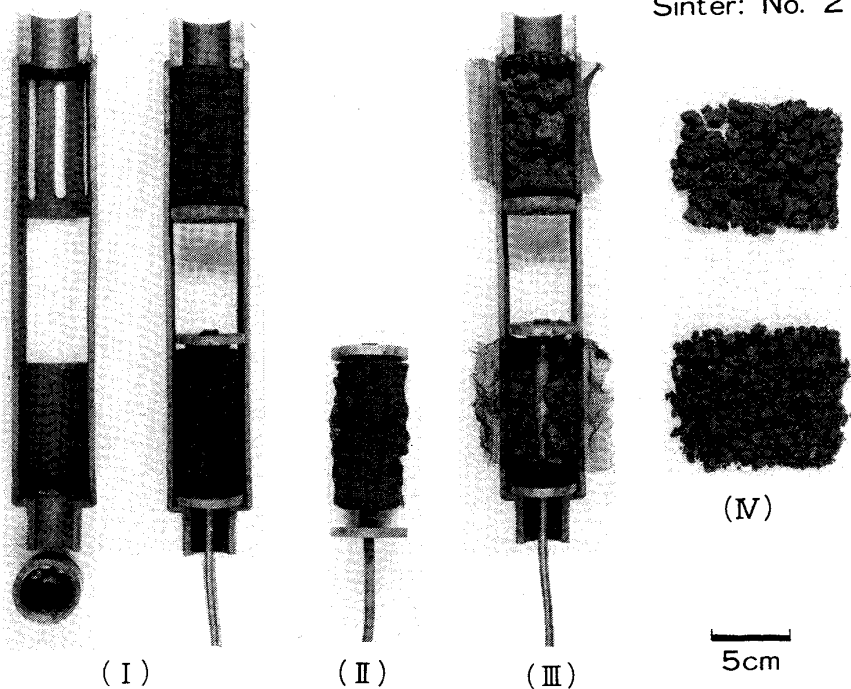


Photo. 1. Appearance of capsules taken out from blast furnace.

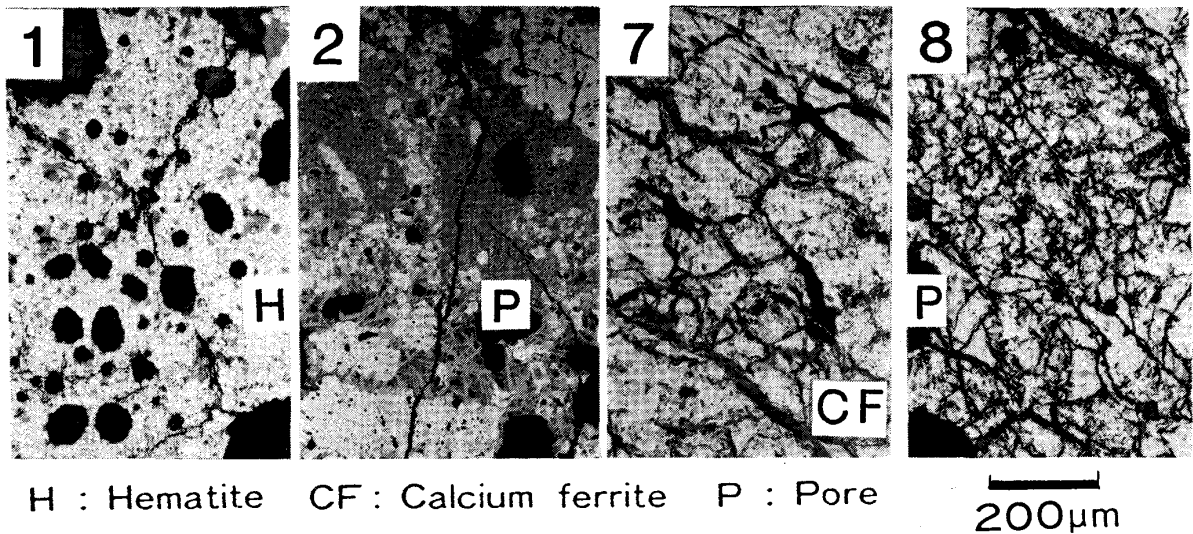


Photo. 2. Microstructure of sinter taken out from blast furnace.

ウム・フェライトを主体とする共存組織部に主として発生しており、放射状き裂は骸晶状へマタイト、蚕食状へマタイトと柱状および板状カルシウム・フェライト共存組織部に多く観察される。このように、還元に伴って焼結鉄中に発生するき裂には、少なくとも二つのタイプのあることがわかる。

3.2.4 RDI と高炉内粉化率の関係

Fig. 5 にA法により回収した焼結鉄の粉化率と RDI の関係を示す。高炉から回収後、静かに篩目を通した^{†3}

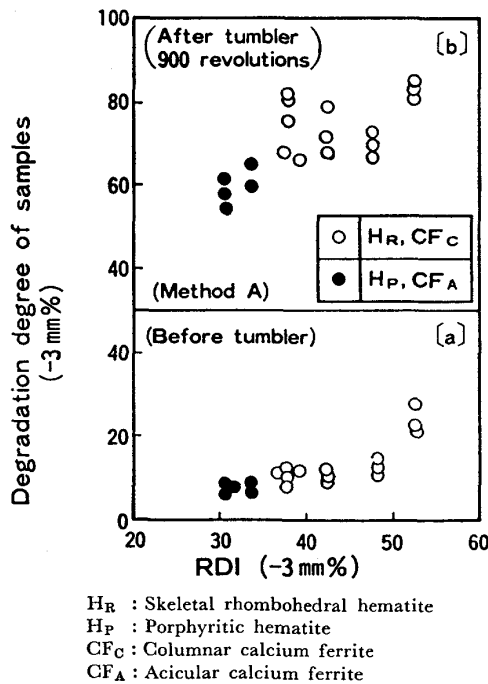


Fig. 5. Relation between RDI and degradation degree of samples.

^{†3} 回収したカプセル内の金網カゴを縦方向に開き、その中から焼結鉄を壊れないよう1個ずつ慎重に取り出し、各篩目の上に静かに置き、篩目通過の判定を行った。

時点での粉化率 (Fig. 5 [a]) は高 RDI 焼結鉄ほど高く、RDI と粉化率是对應することがうかがえる。

静かに篩目を通した焼結鉄を RDI 試験のタンブラーに装入して回転した場合の回転後粉化率 (Fig. 5 [b]) でみても、ほぼ同様の傾向が認められる。

この結果は、高 RDI 焼結鉄ほど高炉内での低温還元に伴う脆化が著しく、また機械力を受けると容易に粉化することを示している。

高炉内で装入物に働く機械力の一つとして水平荷重、が考えられる。

そこで、試料カプセル B-2 室 (以下B法と記す) より回収した焼結鉄の粉化率を測定し、次の四つの数値の比較から高炉内の粉化率と RDI 値の妥当性について考察した。なお、供試試料としては、本試験実施時に高炉で使用した焼結鉄と同一ロッドから採取した試料番号2 (RDI=33.9%) を用いた。Fig. 6 に試験結果を示す。

- ① RDI 値は 33.9%.
- ② A法 (焼結鉄に外力の加わらない状態) での粉化率は 5~8%.
- ③ B法 (焼結鉄に外力の加わる状態) での粉化率は 30~33%.
- ④ 水平ゾンデにより回収した焼結鉄 (Fig. 7) の粉化率は 40~50%.

Fig. 6 より、③の値は②と④のほぼ中間にあり、炉内粉化率として、ほぼ妥当な値を表していると考えられる。①の RDI 値 (33.9%) は③の値に近い。

さらに、RDI の異なる焼結鉄について RDI と B法粉化率の関係を調べてみると Fig. 8 のような関係がみられる。このことから、RDI の値は低温熱保存帯が長く存在する条件下での高炉内粉化率から著しくかけ離れ

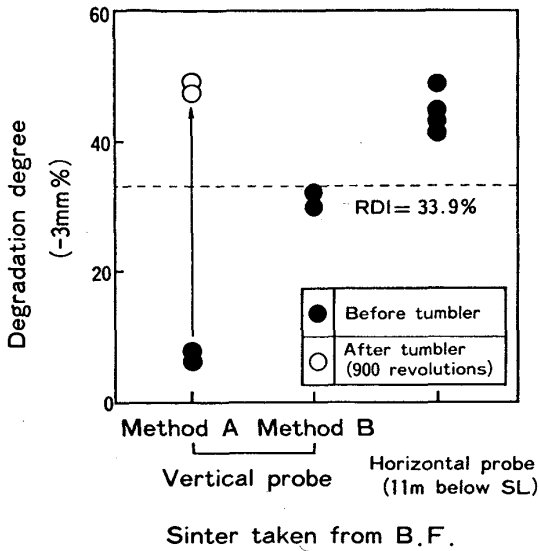


Fig. 6. Comparison of RDI with degradation degree of sinter taken out from B. F..

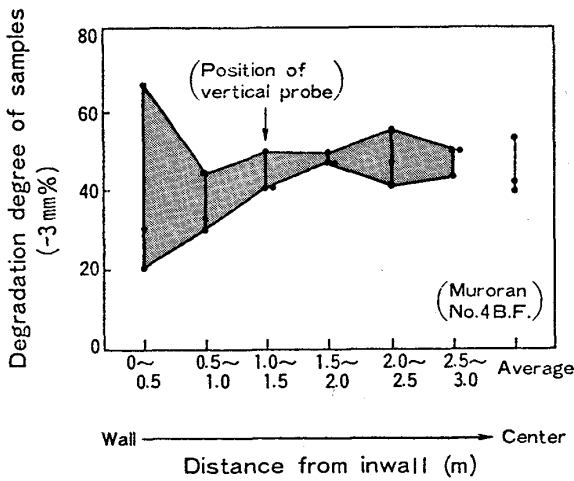


Fig. 7. Degradation degree of sinter along radius at 4 floor level. (Horizontal probe, 11 m below stock line)

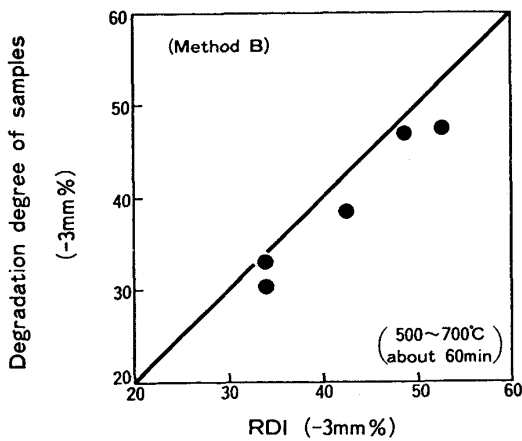


Fig. 8. Comparison of RDI with degradation degree of sinter taken out from B. F..

てはないと判断される。

これまで、RDI と高炉内焼結鉄の粉化率との関係については必ずしも明確ではなかつたが今回の試験において、高炉から回収した焼結鉄の粉化率と RDI との間に明らかな対応関係が認められ、少なくとも低温熱保存帯に長時間滞留した場合 (本試験では約 60 min 間) の焼

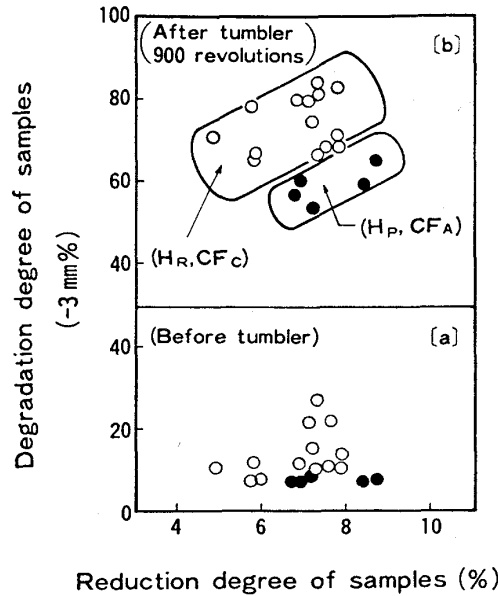


Fig. 9. Relation between reduction degree and degradation degree of samples.

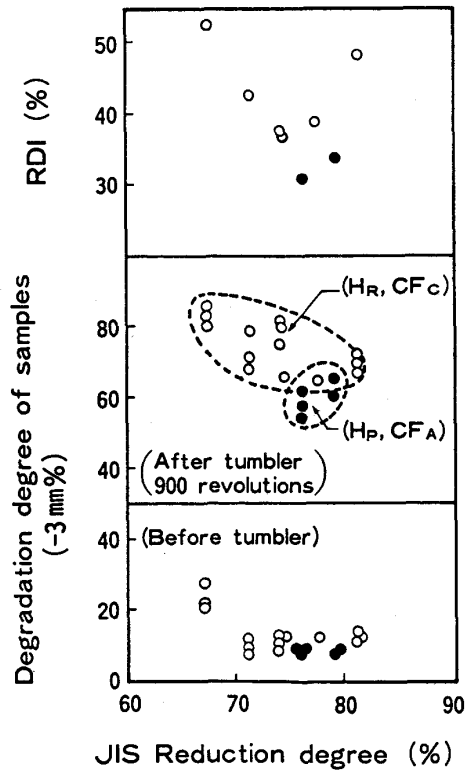


Fig. 10. Relation between JIS reduction degree and degradation degree of samples, RDI.

結鉄の粉化率を表す尺度として、RDI は意味ある指数といえることができる。

3.2.5 還元率と粉化率の関係

Fig. 9 にA法で回収した焼結鉄の還元率（化学分析値より計算）と粉化率の関係を示す。高炉内から回収後、静かに篩目を通した時点での粉化率 (Fig. 9 [a]) と還元率の関係は明瞭ではないが、粉化率にタンブラー試験後の値 (Fig. 9 [b]) をとると、明らかに相関が認められる。

これらの関係は焼結鉄組織によつて層別され、骸晶状ヘマタイト、蚕食状ヘマタイトと柱状カルシウム・フェライト主体の焼結鉄の方が斑状ヘマタイトと（微）針状カルシウム・フェライト主体の焼結鉄よりも同一還元率で比較した場合粉化率は大きい傾向にある。

なお、今回の試験では Fig. 10 に示すように JIS 還元率と粉化率および RDI 間に相関関係は認められなかった。これは、JIS 還元率が還元粉化の起こりにくい温度域 (900°C) での試験であるためと思われる。

4. 結 言

1) 装入物を高炉内に装入し、その後回収可能な新型の垂直ゾンデを開発した。本ゾンデ (B法) によれば、従来ゾンデでは不可能であった測定時の外力の影響をも評価できるので稼動中高炉での装入物の還元粉化状況を、実際に近い状態で直接的に把握することができる。

2) 同ゾンデを用いて、RDI の異なる数種の焼結鉄を高炉内に挿入後、回収し、その還元粉化状況を調査して次の結果を得た。

①回収焼結鉄の粉化率は、高 RDI 焼結鉄ほど高く、RDI と炉内粉化率は相関関係を示す。

②RDI 値は、炉内荷重を受けた回収焼結鉄 (B法)

の粉化率に近い値を示しており、少なくとも低温熱保存帯に長時間滞留する条件下での焼結鉄の粉化率を表す尺度として意味ある指数といえる。

文 献

- 1) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1606
- 2) 伊沢哲夫, 里見弘次, 福島 勤, 古川 武, 小松修: 鉄と鋼, 64 (1978), S 110
- 3) 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976), S 56
- 4) 江崎 澁, 阿部幸弘, 岩月鋼治, 今田邦弘, 高崎誠, 井上展夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 50
- 5) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平山信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 6) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊藤孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 580
- 7) 成田貴一, 出口幹郎, 森 利治, 笹原茂樹, 前川昌大, 山本吉弘, 佐藤健一, 横江寛治: 鉄と鋼, 66 (1980), S 35
- 8) 菅原欣一, 稲垣憲利, 野宮好堯, 持田順二: 鉄と鋼, 67 (1981), S 52
- 9) 金森 健, 森下紀夫, 白川充祉: 鉄と鋼, 67 (1981), S 717
- 10) 稲垣憲利, 浅井謙一, 川岡浩二, 竹岡昭治: 鉄と鋼, 69 (1983), S 88
- 11) 高田 司, 相馬英明, 入田俊幸, 神坂栄治, 木村春男, 磯山 正: 鉄と鋼, 70 (1984), S 86
- 12) 山口英俊, 森 利治, 金山宏志, 前川昌大, 吉田康夫, 上原輝久: 鉄と鋼, 70 (1984), S 96
- 13) 九島行正, 有野俊介, 柴田 清, 浜田雅彦, 川本敬雄: 鉄と鋼, 70 (1984), S 97
- 14) 入田俊幸, 磯山 正, 阿部哲也, 長谷川順三, 奥野嘉雄: 鉄と鋼, 68 (1982), S 107
- 15) 奥野嘉雄, 入田俊幸, 須沢昭和, 松岡 宏, 磯山正, 南外 孝, 沢 雅明: 鉄と鋼, 69 (1983), S 84
- 16) 田村健一, 林 洋一, 彼島秀雄, 山本崇夫: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2287