

トとヘマタイトとの中間体に属する不安定な状態のものであると判断しても概ね差支えないものと思われる。また 10min 還元後の試料に、ヘマタイトがマグネタイトの離溶組織として現出することに対しても、不安定ヘマタイトまたはマグヘマタイトがマグネタイトへ転換し、一部の  $Fe_2O_3$  を遊離するという、前記のごとき解釈が成立つものとする。そして還元時膨脹は、このヘマタイトのマグネタイトへの転換と、一部のヘマタイトの離溶特に後者の方に大きな関係を持つものとするのである。すなわち、ヘマタイトのマグネタイトへの転換により、結晶粒界の結合は弱まり、更にヘマタイトの離溶によりほとんど粒子間の結合は断ち切られると考えられる。更にいろいろの物理的な力、例えば熱膨脹の差などが加われば構成粒子が動き見掛け上の膨脹を起こすものではないかと思われる。因みに熱膨脹率はヘマタイト： $7.6 \sim 8.3 \times 10^{-6}$ 、マグネタイト： $9.54 \times 10^{-5}$ でマグネタイトの方がはるかに大きい。

還元時膨脹の原因をこのように考えると、某社製ペレットの還元時の膨脹については下記のように比較的容易に説明することができる。

1. 高温での再焼成により、膨脹を起さなくなるのは、不安定なヘマタイトが安定なヘマタイトに転ずるためであろう。

2. 還元時膨脹が急速還元の場合に起き易く、緩速の場合に起き難いのは、急速加熱によりマグネタイトへの転換とヘマタイトの離溶が急速に起こり、それにつれて物理的な力の影響が急激に現われるためと解釈できる。

3. ペレット原料にシリカ分を添加すると、スラグの結合が生成されるので上記の粒子間結合が弱まっても、スラグによる結合が崩壊を防止する。

4. 四三酸化鉄試薬を焼成したもので膨脹の起きたのは、この試薬が問題となつた、ペレット同様、極めて不安定な状態のものであるためである。

5. 水素によつては膨脹が起らないことに対する説明資料は今のところ不足であるが、水素の還元力が強いいため、前記の現象の起る以前に還元が進行するのではないかという推定は可能である。

#### 4. 結 言

以上顕微鏡観察結果をもとに、某社製ペレットの還元時膨脹現象を考察したが、現段階では資料も充分とはいえないので、推測の範囲を出ないが、今後の研究により充分な裏付けを行ない得るものとする。

#### 文 献

- 1) J. W. MELLOR: Inorganic and Theoretical Chemistry

## ペレットの品質におよぼす焼成条件の影響

国井和扶\*・西田礼次郎\*・鎌田靖男\*

原田久光\*\*・勝間田嘉和\*\*・野々村武\*\*・淡路光宏\*\*

### The Effect of Induration Condition on the Quality of Various Iron Pellets.

Kazuo KUNII, Reijiro NISHIDA, Yasuo KAMATA, Hisamitsu HARADA,

Yoshikazu KATSUMATA, Takeshi NONOMURA and Mitsuhiro AWAJI

#### 1. 緒 言

ペレットの高炉への使用についてはかなり以前から行なわれており、その製造方法と成品特性の関係についても2, 3の報告<sup>1)2)</sup>がみられるが、いずれも焼成温度が低い場合で、焼成温度の高い場合は明確でない。

ヘマタイト系の鉱石を主原料としてペレットを製造する場合にはかなり高温で焼成する必要があるといわれているので 1250~1350°C を主体にした比較的高温における焼成をとりあげ成品特性との関係を調べた。

本報告ではまず基礎的な研究として電気炉と焼成炉による焼成試験を実施し、焼成温度とペレットの成品特性との関係を調べとくにヘマタイト系の原料の場合には高温焼成が品質向上に効果のあることを認め、次いでグレートキルン式のペレット試験工場(能力20 t/day)にお

いてヘマタイト系の原料を含めて各種のものについて高温焼成操作を行ない、ヘマタイト系原料のみでも高炉用ペレットを製造することができることを確認した。

#### 2. 基礎的研究結果およびその考察

##### 2.1 $Fe_2O_3$ ブリケット試験

通常の鉄鉱石には不純物として  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  などの脈石成分を含有しているのでこれらの影響を除くため  $Fe_2O_3$  試薬を原料として使用した。

原料の粒度は  $-44\mu$  が 57.95% である。このように試薬を原料としたので大量に使用することができないためペレットの代りにブリケットで代用した。

\* 株式会社神戸製鋼所中央研究所

\*\* 株式会社神戸製鋼所神戸工場

生ブリケットは1個 2gの原料に約 15% の水分を添加し、径 10mm のダイスを用い約 300kg/30min の荷重速度で成型した。したがって生ブリケットは径が10 mm、高さが 9mm の均一な円筒形である。

焼成は大気雰囲気下で 980°C まで 17.8°C/min、いったん 980°C で 10min 保持したのち、8.5°C/min の速度で上昇せしめた。

所定の温度に到達後は予定した時間保持し、以後は炉中から取り出し大気中で冷却した。

Fig. 1 の試験結果によれば圧潰強度は焼成温度が 1350 °C までは温度の上昇、時間の延長とともに上昇する。しかし 1400°C 以上では逆に温度の上昇、時間の延長とともに低下する。この結果からペレットの圧潰強度を最高にするためには 1350°C で、ある時間（この場合 23 min）以上焼成する必要があることが判つた。

次に強度と密接な関係にあると予想される気孔率と焼成条件の関係を調べたところ Fig. 2 に示すとおり、Fig. 1 とまったく逆の傾向を示した。

さらに Fig. 3 に示すように 1350°C までの試料の気孔率と圧潰強度の間には高度の逆相関が認められた。

また各ブリケットの顕微鏡組織の観察結果によれば焼成温度の上昇、焼成時間の延長とともに空隙の減少がみられ、同時にヘマタイト粒子間の結合が進行する。1400 °C 以上ではマグネタイトの発生が認められた。

### 2.2 鉄石ペレット試験

次に脈石を含む実際の鉄石としてアフリカ、硫酸滓、ラップ、ゴアCおよびテマンガン鉄石を選びパン型ペレタイザーによつて径 15~17mm 程度の生ボールを作り電気炉によつてブリケットの場合と同じ速度で昇温し 1150~1450°C の間で焼成した。焼成後のペレットの径は 14~16mm の範囲である。

試験結果を Fig. 4 に示したがいずれの原料鉄石においても前述のブリケットと同様、焼成温度が上昇するに

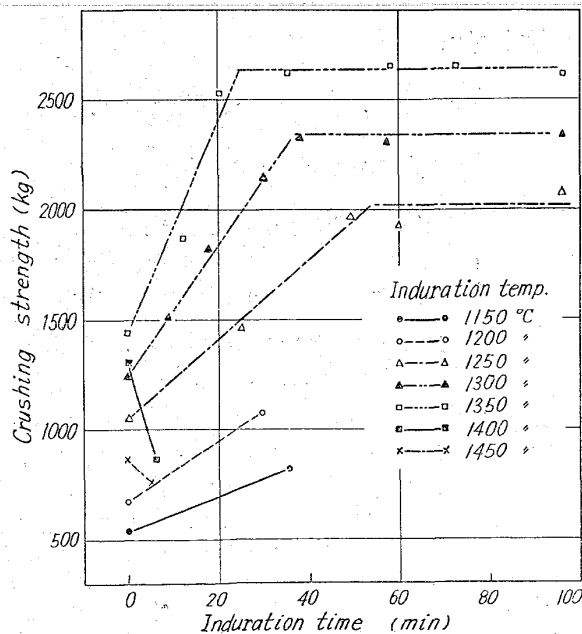


Fig. 1. Relation between crushing strength and induration time.

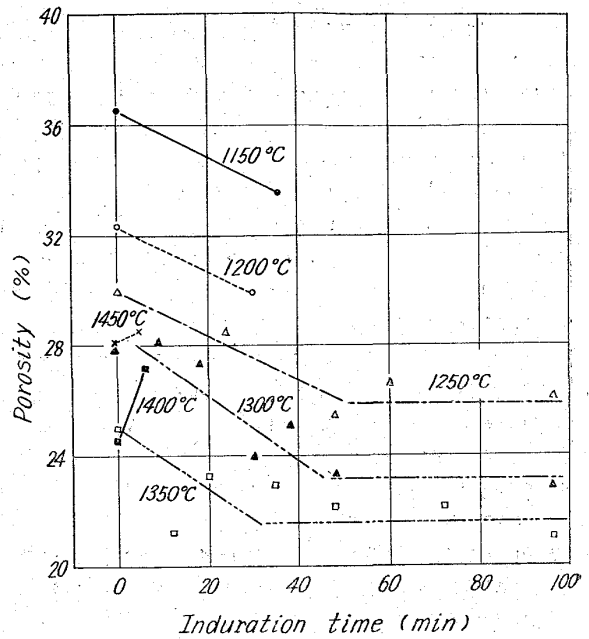


Fig. 2. Relation between porosity and induration time.

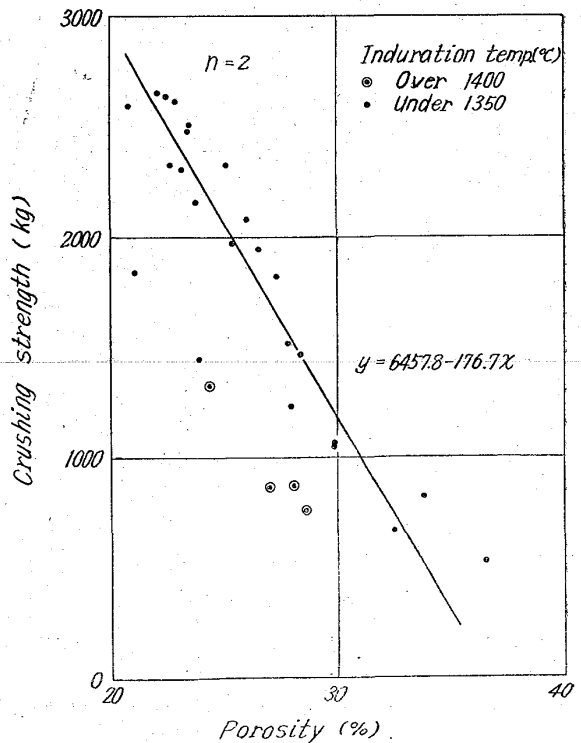


Fig. 3. Relation between crushing strength and porosity.

したがって圧潰強度は増加し 1350°C で最高に達する。しかし 1400°C 以上になると、焼成温度が上がれば逆に圧潰強度が低下することを確認した。

また原料がヘマタイトの場合には焼成温度の影響が大きく、マグネタイトの場合にはその影響が少ないが、これはヘマタイトでは焼成によつてボールが収縮すると同時に各鉄粒が接点において結合する。この現象は温度

Table 1. Properties of raw material and product.

| Remarks | Properties of raw material |        |                  |                                |        |                             | Properties of product |          |                             |              |         |                                  |      |     |                     |                     |
|---------|----------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------|-----------------------------|-----------------------|----------|-----------------------------|--------------|---------|----------------------------------|------|-----|---------------------|---------------------|
|         | Chemical composition (%)   |        |                  |                                |        | Particle size (-74 $\mu$ %) | Induration temp. (°C) | Dia (mm) | Crushing strength (kg/ball) | Porosity (%) | FeO (%) | Compression-Reduction test       |      |     |                     |                     |
|         | T.Fe                       | FeO    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    |                             |                       |          |                             |              |         | Particle size after Rd test (mm) |      |     | Reduction ratio (%) | Shrinkage ratio (%) |
|         | >10                        | 10~1.2 | <1.2             | >10                            | 10~1.2 |                             |                       |          |                             |              |         | <1.2                             |      |     |                     |                     |
| Africa  | 64.42                      | 0.41   | 3.70             | 1.59                           | <0.10  | 89.6                        | 1200                  | 18.4     | 260                         | 14.4         | 0.17    | 94.1                             | 5.5  | 0.4 | 37.5                | 12.6                |
|         |                            |        |                  |                                |        |                             | 1350                  | 17.3     | 827                         | 9.6          | 0.26    | 99.9                             | 0    | 0.1 | 34.0                | 7.5                 |
| Goa-C   | 54.63                      | 1.17   | 5.58             | 8.57                           | <0.10  | 94.8                        | 1200                  | 15.8     | 96                          | 23.7         | 0.13    | 72.7                             | 22.1 | 5.2 | 54.6                | 17.3                |
|         |                            |        |                  |                                |        |                             | 1350                  | 15.5     | 398                         | 15.5         | 0.26    | 99.2                             | 0.2  | 0.4 | 50.6                | 11.7                |
| Brazil* | 66.73                      | 0.80   | 2.00             | 0.48                           | tr     | 97.6                        | 1200                  | 12.6     | 69                          | 18.5         | 0.16    | 93.7                             | 4.6  | 1.5 | 45.4                | 29.0**              |
|         |                            |        |                  |                                |        |                             | 1350                  | 12.5     | 184                         | 14.3         | 0.18    | 94.2                             | 5.2  | 0.6 | 43.8                | 5.5                 |

\* ベントナイト 1% 添加

\*\* 還元後ペレットはかなり粘着性をおびて、数個づつつき合っていた。

Table 2. Properties of raw materials.

| Remarks | Kind of raw materials   | Chemical composition (%) |       |                  |                                |      | Particle size (-44 $\mu$ %) |
|---------|---|--------------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|-----------------------------|
|         |   | T.Fe                     | FeO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  |                             |
| Jedway  | Jedway  | 61.77                    | 25.48 | 5.81             | 1.13                           | 4.36 | 64.3                        |
| Mozan   | Mozan   | 59.60                    | 23.32 | 15.54            | 0.48                           | 0.76 | 59.0                        |
| J.R.G.  | Jedway 1/3, Rompin 1/3, Goa SK 1/3                                  | 62.69                    | 10.80 | 3.58             | 2.07                           | 1.49 | 64.3                        |
| B.R.G.  | Brazil 1/3, Rompin 1/3, Goa SK 1/3                                  | 64.90                    | 2.50  | 1.88             | 2.01                           | 0.10 | 51.7                        |
| MX-7    | Goa SK 40%, Brazil 20%, Rompin 10%<br>Sannicolas 15%, Ironstone 15% | 62.94                    | 7.57  | 2.89             | 2.19                           | 0.37 | 51.7                        |

Table 3. Results of test operations.

| Re-<br>marks | Indu-<br>ration<br>temp.<br>(°C) | Dia<br>(mm)   | Cru-<br>shing<br>stre-<br>ngth<br>(kg) | Porosity<br>(%) | FeO<br>(%) | Tumbling<br>test of<br>products.<br>(mm) |      | Reduction test<br>(GAKUSHIN)   |                                |       | Compression-Reduction test <sup>3)</sup> |              |             |                                |                                |
|--------------|----------------------------------|---------------|--|-----------------|------------|--|------|--------------------------------|--------------------------------|-------|--|--------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
|              |                                  |               |  |                 |            | +0.5                                     | +5   | Redu-<br>ction<br>ratio<br>(%) | Tumbling test<br>after Rd test |       | Particle size after<br>Rd test (mm)      |              |             | Redu-<br>ction<br>ratio<br>(%) | Shrin-<br>kage<br>ratio<br>(%) |
|              |                                  |               |  |                 |            |  |      |                                | (mm)                           | (mm)  | >10                                      | 10~1.2       | 1.2>        |                                |                                |
|              |                                  |               |  |                 |            | +1                                       | +3   | >10                            | ~1.2                           | 1.2>  |  |              |             |                                |                                |
| Jedway       | 1265                             | 13.9          | 596                                    | 20.39           | 2.30       | 97.4                                     | 97.0 | 75.7                           | 98.96                          | 98.84 | 95.1                                     | 4.4          | 0.5         | 57.2                           | 6.7                            |
|              | 1300                             | 13.8          | 696                                    | 17.64           | 1.95       | 98.2                                     | 98.0 | 73.9                           | 99.28                          | 99.20 | 97.8                                     | 1.8          | 0.4         | 40.8                           | 3.1                            |
| Mozan        | 1300                             | 13.8          | 390                                    | 15.91           | 0.90       | 97.7                                     | 97.9 | 62.2                           | 98.83                          | 98.97 | 99.9                                     | 0.1          | tr          | 61.3                           | 7.2                            |
| J.R.G.       | 1350                             | 13.4          | 478                                    | 13.21           | 0.37       | 98.8                                     | 98.4 | 74.4                           | 98.81                          | 98.99 | 94.7                                     | 4.9          | 0.4         | 35.3                           | 6.9                            |
| B.R.G-1      | 1330                             | 14.0          | 231                                    | 22.74           | 0.87       | 94.3                                     | 92.5 | 63.2                           | 98.40                          | 98.32 | 93.5                                     | 5.7          | 0.8         | 52.7                           | 13.0                           |
|              | 1360                             | 14.4          | 285                                    | 21.75           | 1.16       | 94.6                                     | 93.7 | 60.3                           | 98.96                          | 98.84 | 94.1                                     | 4.8          | 1.1         | 47.8                           | 11.0                           |
| B.R.G-2*     | 1335                             | 14.6          | 323                                    | 20.82           | 1.04       | 94.4                                     | 93.8 | 73.4                           | 98.80                          | 98.76 | 95.6                                     | 3.9          | 0.5         | 64.6                           | 7.0                            |
|              | 1350                             | 14.5          | 356                                    | 18.97           | 0.96       | 94.3                                     | 94.0 | 72.8                           | 99.12                          | 99.24 | 95.8                                     | 3.7          | 0.5         | 48.0                           | 7.5                            |
| MX-7         | 1350                             | 14.8          | 377                                    | 17.72           | 1.58       | 97.2                                     | 96.8 | 76.6                           | 99.23                          | 99.38 | 94.4                                     | 5.1          | 0.5         | 51.5                           | 6.4                            |
| Marcona      | —                                | 14.2          | 212                                    | 27.10           | 0.09       | 93.4                                     | 93.2 | 80.7                           | 84.72                          | 83.68 | 90.5                                     | 6.7          | 2.8         | 52.4                           | 15.4                           |
| Erie         | —                                | 11.3<br>~13.0 | 156<br>~288                            | 18.76           | 0.27       | 92.1<br>~97.3                            | —    | 83.4<br>~74.2                  | 98.28                          | 98.24 | 88.8<br>~89.5                            | 10.8<br>~9.0 | 0.4<br>~0.5 | 50.8<br>~47.3                  | 7.2<br>~5.4                    |

\* Using a auxiliary burner.

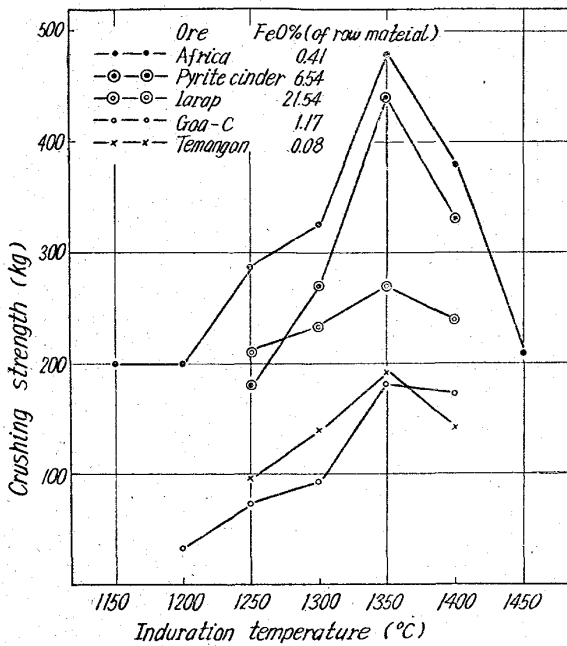
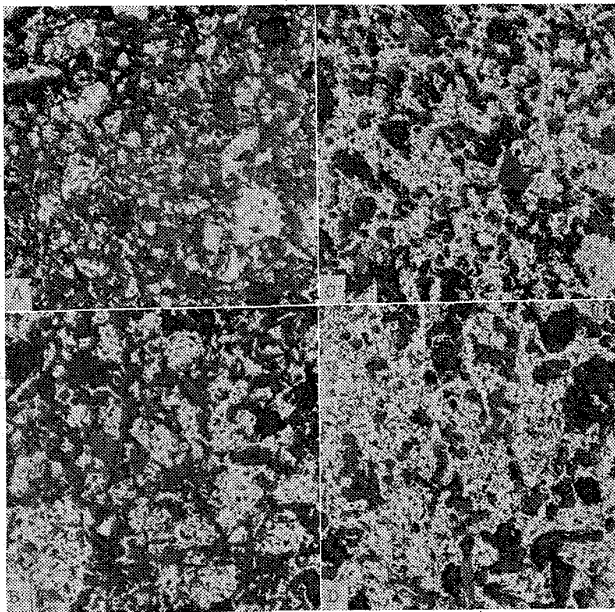


Fig. 4. Effect of induration temp. on crushing strength.



Induration temp. (°C)  
A: 1200 B: 1250 C: 1300 D: 1350  
Photo. 1. Microstructure of goan pellet.  
×100 (1/2)

の上昇とともに活発になるのみであるに反し、マグネタイトの場合は焼成中にマグネタイトがヘマタイトに再結晶する際に強固な結合<sup>3)</sup>ができるためである。

Photo. 1 に一例としてゴアCペレットの焼成温度と顕微鏡組織の関係を示したが、焼成温度が上昇するにしたがい空隙は減少し  $Fe_2O_3$  粒子も収縮し、緻密となりその後、隣接の粒子同志が接触、結合、成長し  $Fe_2O_3$  粒子の強固な網状組織を形成する。脈石部分も低温ではほとんど反応していないが高温になるにしたがいスラグ化し酸化鉄粒子と結合していくようである。

### 2.3 焼成炉による試験

電気炉による焼成試験においては圧潰強度の高い緻密なペレットの製造条件が判明したので次に3種類のヘマタイト鉱を対象として2)と同様パン型ペレタイザーで生ボールを作り、次に20kg/chargeの焼成炉によつて焼成した。焼成は  $C_3H_8$  と  $O_2$  を用い完全燃焼するように注意しながら、1000°Cまで16°C/min、以後目標温度までは18°C/minで上昇せしめ、到達後は1200°Cの場合は40min、1350°Cの場合は10min保持する。冷却は燃焼を止め空気を吸引して行なつた。

成品ペレットは圧潰強度の測定のみならず、圧縮一還試験も行なつた。

Table 1 に使用原料の化学成分、粒度および試験結果を示した。

焼成温度が1200°Cの場合、圧潰強度は低く、圧縮率と還元後ペレットの破壊度合は高く、この値では概して高炉での使用は望ましいものではないと予想している。

これに反し焼成温度を1350°Cまで上昇せしめると圧潰強度は高くなり、収縮率と還元後試料の破壊度合も低くなる。一方還元率は若干低下し、その上焼成後ペレットのFeO含有量もわずかに増加するが、高炉での使用に堪えるものと考えられる。

### 3. 試験工場における操業結果

以上の基礎試験結果からヘマタイトを含む各種の鉱石を原料として高炉用ペレットを製造しうる見通しを得たので試験工場で操業試験を行なつた。

対象とした原料はTable 2に示したようにマグネタイトからヘマタイトまでの広範囲にわたっている。いずれの場合もベントナイトを0.5%添加した。

試験に当つては各原料とも粉碎—脱水—造粒—焼成—一貫した操業を約2昼夜続けた。

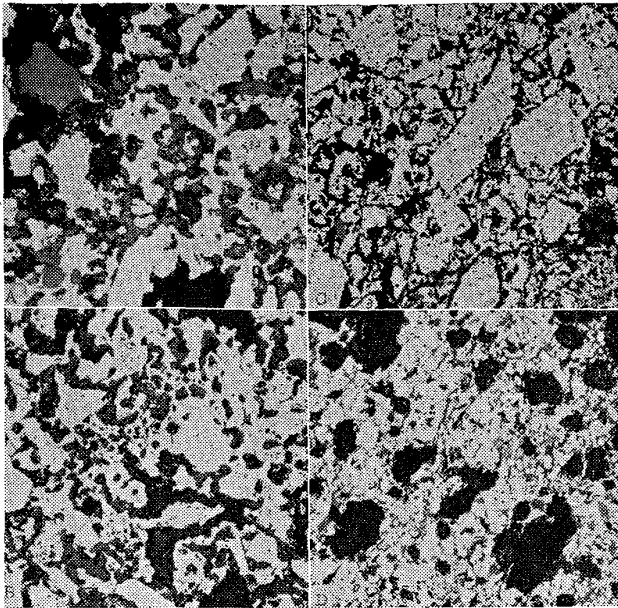
これらの試験結果をTable 3に示す。なお当所で入手したMarconaとErieペレットの試験値も参考のため表示した。またJedwayとB·R·Gペレットでは焼成条件を変化せしめその影響を調べた。

Table 3の試験結果からB·R·G-1ペレットを除けば圧潰強度、FeO、成品の回転強度、還元試験(学振法)後の試料の回転強度、圧縮一還元試験における還元率、試験後試料の粒度分布および圧縮率などは、参考値として示したMarcona、Erieペレットと同等か、またはそれ以上の値が得られた。ここでB·R·G-1ペレットは補助バーナーを使用していないため熱量不足となり、十分焼成されなかつたため、同一原料の補助バーナーを使用したB·R·G-2ペレットはこれに比べ各特性値とも向上を示している。

Photo. 2にヘマタイトを主原料とする4種類のペレットの顕微鏡組織を示したが、いずれも良好な結合状態を示している。

このようにマグネタイトから多少褐鉄鉱を含有するといわれる南方系赤鉄鉱まで、いかなる鉱石においても適当な操業条件を見出せば高炉用ペレットが得られることが判明した。

なお、この試験操業においても焼成温度の影響を調べるために2, 3の実験を行なつたがTable 3に見られ



A: BRG-1, B: BRG-2, C: MX-7, D: J.R.G

Photo. 2. Microstructure of various pellet.  
×100 (1/2)

るよう焼成温度の上昇によつて圧潰強度は上昇し、空隙率と両還元試験における還元率などは低下している。

還元試験(学振法)と圧縮還元試験における還元率は、ペレットによりかなり傾向が異なつてゐる。これは還元ガスは同じであるが温度、還元時間が異なり前者が

温度は 900°C 一定で 3hr, 後者は 2kg/cm<sup>2</sup> の荷重を掛けながら 200°C から 1000°C まで 16min かけて昇温しているためである。

このように還元方法によりその傾向が異なつてくるので高炉装入物の評価方法としての還元試験法を確立するには今後かなりの検討が必要とならう。

しかしながら以上の試験結果からマグネタイトから全ヘマタイト原料まで、いずれの原料においても焼成条件さえ注意すれば優良なペレットが製造されることがわかる。

#### 4. 結 言

ペレットの製造試験として電気炉による Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のブリケットの焼成試験より、グレートキルン式試験工場(20 t/day) の試験にわたり一貫した試験を行ない、あらゆる原料鉱石、特に全ヘマタイト原料についても焼成条件を注意すれば、工場規模で優良なペレットを製造しうることが判明した。

#### 文 献

- 1) 佐々木, 岸高, 春, 小笠原: 鉄と鋼, 50(1964), 3, p. 325~327
- 2) 森永, 池野, 岩崎: 鉄と鋼, 50 (1964), 5, p. 743~752
- 3) 神戸製鋼所提出(高尾善一郎): 學術振興会第54委員会報告, No. 667
- 4) COOKE and BAND: Trans AIME 193 (1952) p. 1223~1230

## 鉄鉱石, 焼結鉄, ペレットの膨脹, 荷重軟化 および粉化について

渡 辺 正次郎\*・○大 竹 康 元\*

### Thermal Expansion, Softening and Degradation Behaviours of Ore, Sinter and Pellet.

Dr. Shōjiro WATANABE and Yasumoto ŌTAKE

#### 1. 緒 言

鉄鉱石, 焼結鉄およびペレットの熱間における挙動に関し, 第1報の熱間耐圧強度の測定<sup>1)</sup>に引続き, 還元気流中における膨脹, 荷重軟化および粉化性について報告する。

#### 2. 実験試料および実験方法

使用した実験試料は鉄鉱石4種類, ペレット3種類, 焼結鉄2種類の合計9種類でありその化学成分はTable 1のごとくである。

膨脹および荷重軟化試験は, 充填層試料による荷重軟化試験装置(Fig. 1)を使用し, 膨脹試験では押棒の代りに外径 8mm の石英管を挿入してその膨脹を, 荷重

軟化試験は 1kg/cm<sup>2</sup>, 2kg/cm<sup>2</sup> および 5kg/cm<sup>2</sup> の荷重下の膨脹および収縮を測定し膨脹曲線および軟化曲線を求めた。

試料は 10~15mm 粒度のもの 500g(焼結鉄300g)を使用し常温より 300°C までは N<sub>2</sub> 5l/min を流し 300°C より 1100°C までは, 還元ガス(CO(30%)+N<sub>2</sub>(70%), 15l/min)を使用した。

反応管は二重式で内部の内径 50mm のステンレス反応管中の試料層高は 90~130mm である。

高温における粉化性については Linder の回転還元試験装置を使用し, すでに報告の試験条件<sup>2)</sup>にて実施した。

\* 住友金属工業株式会社中央技術研究所