論 説

0.5tリアクターによるDRI溶解

杉浦三朗*, 出向井登**

DRI Melting Using 0.5t Reactor

Saburo Sugiura and Noboru Demukai

Synopsis

Daido Steel has been developing a new non-electric scrap melting furnace using carbon powder and oxygen, which is named Reactor.

DRI test melting was performed in the 0.5t/h reactor, from the stand point of expansion of ferro-material sources.

This paper describes the optimum operational conditions of DRI melting in the reactor with regard to the heat efficiency and iron yield. The experimental results are as follows.

- (1) For the DRI mixing ratio up to 30%, the thermal efficiency of melting is comparable to that of scrap melting (40%).
- (2) The FeO contained in the DRI is reduced to Fe during the melting period, and the metal yield in case of DRI mixing is not lowered comparing with scrap melting.

1. 結 言

鉄鋼業においては鉄原料を多様化して、操業のフレキシビリティを増すことは重要な課題である。

特に、電気炉製鋼法では市中スクラップ発生量の増大にともない、スクラップ中の不純物の問題が顕在化しつつあり新たな鉄原料の活用技術が待たれている。

還元鉄(以下 DRI と称する)は除去しにくい Cu や Sn 等の不純物が少なく高純度鉄原料として優れているが、電気炉製鋼においては DRI 配合率を

増すと歩留の低下や電力原単位の悪化などの問題がある^{1),2)}。

他方、大同特殊鋼が開発中の、炭材と酸素をエネルギーとする脱電力溶解炉(リアクター)では、酸化鉄の熔融還元も可能であり上記の問題点を軽減できる可能性がある。

以上の背景のもとに、出湯速度0.5t/hのリアクターにて100%スクラップ溶解と対比して行った DRI 配合溶解試験結果について報告する。

2. リアクター炉体構造および溶解方法

Photo. 1 に実験に用いたリアクターの正面外観を示す。その構造については Fig. 1 に模式図を示す。

炉体は下部の溶解炉と上部の予熱室に分割されており、鉄原料は溶解炉排ガスにより予熱された

昭和62年 5 月 6 日受付

*大同特殊鋼研究開発本部, 工博

**大同特殊鋼研究開発本部

Photo. 1. Experimental reactor.

Fig. 1. Schematic illustration of the experimental reactor.

後、溶解炉に装入される。

溶解炉の炉底部側壁には2本の羽口が設置しており、酸素および炭粉を溶鋼中に吹き込みCOガスを連続的に発生する。溶解炉上部にはCOガスの2次燃焼のための酸素羽口が設けられており、炉内での2次燃焼比率($\text{CO}_2/\text{CO} + \text{CO}_2$)を0.5以上の高レベルに保つことができる。この炉内2次燃焼が溶鋼の主たる加熱源となる。

Fig. 2に上吹酸素比率と炉内2次燃焼比率の関係を示す。上吹酸素比率が増えるに従って2次燃焼比率が増大するが、あまりにも上吹を多くすると、スラグ中のFeOが増えスラグが泡立ちやすくなる。

スラグ泡立ちが激しい場合はスロッピングにより操作が困難となるから上吹酸素比率を適正範囲内に制御して実験を行った。ちなみに標準条件では下吹酸素流量を $0.4\text{Nm}^3/\text{min}$ 、上吹酸素流量を $0.8\text{Nm}^3/\text{min}$ としており、この時の $\text{CO}_2/\text{CO} + \text{CO}_2$ 比は0.5~0.6であった。

なお、鉄原料の装入についてはハンドリングを迅速に行うため、予熱室の上部に予備室を設けて、ダンパー操作のみでスクラップを装入できるよう

Fig. 2. Effect of the upper blowing oxygen ratio on the post combustion ratio.

にした。ダンパーはそれぞれの役割をになったものを都合4ヶ有しており、気密状態が保てるため送酸しつつ鉄原料を装入できる。

なお既報³⁾で問題になったスクラップのダンパーへの粘着については、排ガス流路の変更によりほぼ解決した。すなわち、下部溶解炉から発生す

る排ガスは燃焼塔にて残留COの燃焼を行った後予熱室へ上部から導入し、スクラップとの熱交換を終えた後、予熱室下部側面から排気する。したがって予熱室下部ダンパー部は比較的低温に保てることから、この部分にスクラップが粘着しない。

3. DRI の 特 性

Photo. 2 に実験に用いた DRI をスクラップとともに示す。DRI は Fior のホットブリケットであり長径約90mm である。

DRI の特性を Table 1 に示す。

Fe 含有率および金属化率は DRI としては標準的な値と考えられる。また見掛け密度は $5.1\text{g}/\text{cm}^3$ でありペレットに比べてきわめて高密度である。

そこで、本 DRI はリアクター溶解に際して、予熱可能と期待できたので酸化特性を予備的に調査した。Fig. 3 に大気加熱炉で DRI を加熱・冷却した際の温度推移を示す。

昇温速度は比較的速く、リアクターでの短時間(5分以内)予熱でも有効に加熱できると思われる。この大気加熱を行った DRI の重量変化から Fe の酸化量を調べたところ Fig. 4 のようになった。1000℃を越えると Fe 酸化が急に増えることがわかる。したがって800℃以下程度の予熱が DRI には適していると考えられる。

4. 溶解実験条件

4.1 実験パターン

実験パターンを Fig. 5 に示す。

リアクターは本来連続操作を行うものであるから、その溶解特性は炉体が充分蓄熱した状態で評価する必要がある。このため種湯0.5tを装入した後、炉体蓄熱のための溶鋼保持期間を約1時間設け、さらに第1溶解期にて0.3tの鉄原料を溶解して炉の熱的条件を極力一定化した。0.3tの溶鋼を出鋼し炉内残湯を0.5tとしてから2回目の溶解

Photo. 2. Ferrous raw materials used in the experiment.

Table 1. Characteristics of the DRI.

a) Composition (%)

T-Fe	M-Fe	Metallization	FeO	C	S	P	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃
91.30	82.27	90.11	8.15	1.36	0.018	0.128	2.03	0.03	1.00

b) Density (g/cm³)

Apparent	Bulk
5.1	2.7

Fig. 3. Change of the tested DRI temperature.

Fig. 4. Relationship between the DRI temperature and the Fe oxidation.

を行い、この区間でのエネルギー原単位および熱効率を評価した。なお、2回の出鋼で得られた鋼塊および地金の重量を測定してFe歩留を算出した。

Fig. 5. Experimental melting pattern.

Fig. 6. Boiling intensity of the bath just after the DRI addition.

4.2 DRI 配合条件

本格的な試験に先立ち、予備溶解実験にてDRIの適正配合条件を検討した。

DRIにはFeOが約8%含まれており、約3%のCを含む鉄浴に装入する際に急激なボイリング現象が発生する。ボイリング反応は次式であらわされる。

発生するCOガス量はDRIの装入量と比例し、定性的に整理するとFig. 6のようになった。ボイリングがあまりにも激しい場合は炉体の上下接続部等の隙間から火炎の吹出しが多くなり実験遂行上問題となるので1回の装入当りのDRI配合量を20kg以下とした。なお、DRIを25kg装入した際のガス組成をFig. 7に示す。DRI装入前には燃焼塔下流におけるCOガスはほぼ0%であるが、DRI装入直後に急激に増えていることがわかる。この現象は逆にいえばFeOの還元が急速に起こっていることを意味し、従来のアーク炉でのDRI操業に比べてFe歩留が良くなることが期待できる。

Fig. 7. Change of the exhaust gas compositions during the DRI melting.

次に、DRI 溶解実験における予熱効果について DRI 配合率の影響を検討した。リアクター予熱室の内径は360mm 中であり高さは500mm である。予熱効率を良くするためには鉄原料の充填高さを許容範囲内でできるだけ高くすることが望ましい。ところが DRI の嵩比重は2.7とスクラップに比べて大きく、DRI 配合率を増すほど充填高さが低くなる。そこで、それぞれの鉄原料の嵩比重およびボイリングに関する DRI 配合重量の制約を考慮して、DRI 配合率を50%以下とした。配合内容は Table 2 に示す。

5. 溶解実験結果

5.1 熱 効 率

前述のように2回目の溶解期において熱効率およびエネルギー原単位を評価した。熱効率 η は次式で定義する。

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_C} \times 100 (\%)$$

Q_M : 溶解期における溶鋼含熱増分 (Mcal)

Q_C : 溶解期に消費した C の完全燃焼相当熱量 (Mcal)

なお、C の消費量は溶鋼中での増減および装入黒鉛(99% C)量の両方を加味して求め、その発熱量は7.83Mcal/kg とした。

Fig. 8 に溶解期における DRI 配合率と熱効率の関係を示す。DRI 配合率が30%以内では熱効率はほぼ一定であるが、50%配合においては熱効率がやや低下する。この熱効率低下の原因は次のように考えられる。

Table 2. Charging condition of the ferrous raw materials in the pre-heating room.

Heat No.	DRI (%)	Charging weight (kg/batch)				Charging height (mm)
		DRI	Heavy pipe	Light pipe	Total	
1	0	—	70	—	70	400
2	0	—	—	50	50	430
3	20	12	—	48	60	450
4	20	10	—	40	50	370
5	30	18	—	42	60	410
6	50	15	—	15	30	170
7	50	20	—	20	40	300

Fig. 8. Relationship between the DRI mixing ratio and the thermal efficiency.

(1) DRI 中には FeO が約 8 % 含まれており、この還元熱 (1.13Mcal/Fe kg) を必要とする。

(2) DRI は嵩密度が大きく、配合率が多いと予熱室での鉄原料充填高さが低くなり予熱効率が低下する。

そこで、DRI 中の FeO 還元熱も必要熱と見なし、溶鋼含熱増分に加算し、この Total を有効熱と考えてみた。有効熱の効率と予熱室内での鉄原料充填高さの関係を Fig. 9 に示す。同図から有効熱効率は充填高さが高いほど大きいことがわかる。またスクラップのみの場合と DRI 配合の場合で有効熱効率は本質的には変わらないと考えられる。

Fig. 9. Effect of the charging height of the ferrous raw materials in the pre-heating room on the thermal efficiency.

5.2 エネルギー原単位

溶解用 C 原単位を次式で定義する。

$$A = \frac{321(\text{Mcal/t}) \times 100}{\eta \times 7.83(\text{Mcal/kg})}$$

A: 溶解用 C 原単位 (kg/t)

η : 溶鋼含熱増分に対する熱効率 (%)

321Mcal/t: 1500°C の溶銑の含熱量⁴⁾

7.83Mcal/kg: C 1 kg 当りの発熱量

Fig. 10 に DRI 配合率と溶解用 C 原単位の関係を示す。DRI 配合率が50%の場合 C 原単位が増えているが、これは前述の熱効率低下の影響である。

次に、酸素原単位の定義を次式に示す。

$$B = A \times \alpha$$

B: 酸素原単位 (Nm³/t)

A: 溶解用 C 原単位 (kg/t)

α : C 1 kg を消費するために炉に供給した酸素量であり、各実験の炉内 2 次燃焼比率によって若干変化する数値 (Nm³/kg)

Fig. 11 に DRI 配合率と酸素原単位の関係を示すが、C 原単位と同様の傾向にある。

5.3 溶解速度

溶解速度は鉄原料を溶解し、かつ1500°Cまで昇温する際に要する時間を考慮して次式で定義する。

$$V = \frac{Q}{321(\text{Mcal/t})}$$

V: 溶解速度 (t/h)

Fig. 10. Relationship between the DRI mixing ratio and the carbon consumption.

Fig. 11. Relationship between the DRI mixing ratio and the oxygen consumption.

Q : 溶鋼含熱増加速度 (Mcal/h)

Fig. 12 に DRI 配合率と溶解速度の関係を示す。本実験では送酸速度を一定 (上吹0.8Nm³/min, 下吹0.4Nm³/min) としているため溶解速度は熱効率にはほぼ対応する。ちなみに、スクラップのみの場合の溶解速度は0.4~0.5t/hである。

5.4 Fe 歩留

リアクターでは溶鋼中の C 濃度が 2~4% の範囲に変化するので、C をのぞいた純 Fe 分の歩留を評価対象とした。DRI 中の Fe としては未還元 Fe も含めた Total Fe の重量値を用いている。

Fig. 12. Relationship between the DRI mixing ratio and the melting rate.

Fig. 13 に実験全体を通じての DRI 配合率と Fe 歩留の関係を示す。同図から DRI 配合率を増しても Fe 歩留は悪化しないことがわかる。すなわち、リアクターでは DRI 中の FeO が還元できることを意味する。

6. 結 言

出湯速度 0.5t/h のリアクターを用いて DRI 溶解試験を行い以下の結論を得た。

(1) 本試験に用いたホットブリケット DRI は耐酸化性に優れており、スクラップと同様に予熱できる。

(2) 溶解期間中の熱効率は DRI 配合率 30% 以下ではスクラップと同等であり 30~40% の効率である。この時の溶解速度は 0.4~0.5t/h、溶解用 C 原単位は 120kg/t、酸素原単位は約 160Nm³/t である。ただし、DRI 配合率を 50% まで高めた場合熱効率が悪化する。その理由は次のようである。

(3) DRI は嵩密度が大きいため、予熱室での鉄原料充填高さが低くなり予熱効率が悪くなる。こ

Fig. 13. Relationship between the total DRI mixing ratio and the Fe yield.

のため熱効率が悪化する。すなわち、高 DRI 配合に適した改善（例えば予熱室径の縮小など）が必要と思われる。

(4) DRI 中の FeO はほぼ完全に還元され、DRI 配合による Fe 歩留悪化は見られない。

おわりに、本試験を推進するにあたり、新鉄源開発㈱をはじめとし、関係各位の御協力を得ましたことを感謝いたします。

(文 献)

- 1) 日本鉄鋼協会共同研究会，第13回電気炉部会：大同特殊鋼（1979）
- 2) 日本鉄鋼協会国際シンポジウム：スクラップリサイクリングの諸問題（1981）
- 3) 湯浅，杉浦，出向井：電気製鋼，56（1985）1，4
- 4) 「溶鉄・溶滓の物性値便覧」日本鉄鋼協会発行