## 仙台電気炉の通電パターン改善によるスクラップ溶解能率 向上

### Improvement of Scrap Melting Efficiency through Enhancement of Power Supply Pattern for Sendai Electric Arc Furnace

松田	樹人	MATSUDA Takehito	JFE スチール	棒線事業部	仙台製造所	製鋼部	製鋼技術室	圣長
形部	文規	KATABE Fuminori	JFE スチール	スチール研究	的 製鋼研究	宅部 主任	E部員	
高橋	浩一	TAKAHASHI Koichi	JFE スチール	棒線事業部	仙台製造所	製鋼部	製鋼工場	副工場長
三輪	善広	MIWA Yoshihiro	JFE スチール	スチール研究	空所 製鋼研究	铅部 主任	E研究員	

### 要旨

世界的なカーボンニュートラルの実現に向けて,高炉法よりも CO<sub>2</sub> 排出量の少ない電気炉法が注目されている。 しかし電気炉は高炉に比較して生産能率は低位であること,また電気炉における CO<sub>2</sub> 排出の多くは電力源によるも のであることから,処理時間の大部分を占めるスクラップ溶解時間の短縮(溶解能率向上)と電力使用量削減が求 められる。JFE スチールでは,スクラップの溶鋼浸漬・溶解進行を模擬したラボ試験により,スクラップ・溶鋼界 面での凝固シェル生成に及ぼす溶鋼温度・溶解時間の影響を調査し,仙台製造所電気炉の通電パターンを適正化し た。

### Abstract:

In order to achieve global carbon neutrality, the electric arc furnace (EAF) method, which emits less  $CO_2$  compared to the blast furnace method, is gaining attention. However, EAF has lower production efficiency compared to blast furnaces, and a significant portion of  $CO_2$  emissions in EAFs come from the electricity source. Therefore, it is necessary to reduce the scrap melting time (improve melting efficiency) which account for a large part of the processing time, and reduce electricity consumption.

JFE Steel has conducted laboratory test simulating scrap steel immersion and melting processes to investigate the influence of steel temperature and melting time on the formation of solidification shell at scrap-steel interface. Based on these findings, JFE Steel has optimized the power supply pattern at Sendai Works EAF.

### 1. はじめに

仙台製造所は2008年,電気炉にECOARC<sup>™</sup>(以下「エ コアーク」)を導入した。エコアークは、シャフトよりスク ラップを投入することにより通電を止めることなくスクラッ プを連続投入でき、かつ排ガスとの熱交換によるスクラップ 予熱が可能なエネルギー高効率型電気炉である。

エコアークの操業概要を図1に示す。スクラップは、Skip 台車と呼ばれるスクラップ搬送台車を使用し、シャフトより 1回約12tを1chあたり12回投入する。シャフト内で電気 炉からの排ガスによって予熱後、スクラップを炉内に押し込 み、溶鋼へ浸漬して溶解が進行する(フラットバス操業)。 スクラップ溶解の熱源はアーク放電を主としており、補助熱 源およびスラグフォーミング材として炭材を利用し、溶解期 中は酸素の吹き込みにより炭材燃焼を促進している。炭材燃 焼による CO ガス発生および CO ガスの2次燃焼により排ガ ス温度が上昇し,排ガス顕熱の一部がシャフト内のスクラッ プと熱交換し,スクラップを予熱している。溶解完了後,C 濃度と溶鋼温度を目標範囲に調整したのちに出鋼し,ホット ヒール(残鋼)を60-80 t/ch残して次 chのスクラップ溶解 に使用する。以上が仙台電気炉操業の1サイクルである。

仙台電気炉の通電パターンを**図2**に示す。溶解期初期・ 中期・後期,それぞれ下記の方針で操業している。

- ①溶解期初期:アークの安定性確保および炉体耐火物保護の ため、低電圧から通電開始する。
- ②溶解期中期:スクラップ溶解促進のため、高電圧で操業を 行う。合わせて炭材を投入し、酸素を吹込 む。
- ③溶解期後期:高電圧を維持し溶け残り防止を図りつつ、中期より電圧を低下して溶鋼温度の均一化と脱リン反応を促進する。

<sup>2024</sup>年9月17日受付



Fig. 1 Operation overview of Sendai ECOARC<sup>TM</sup>





前述のとおり,エコアークではスクラップを溶解炉内に連 続投入するが,実操業においてはシャフト内のスクラップが 沈降しない(押し込めない)現象が一定頻度で発生する。 その場合,炉内スクラップが未溶解のために押し込めていな いと推測し,スクラップ押し込みを中断して通電昇熱後に, 再度押し込みを実施している。これにより,製鋼時間延長と 電力原単位悪化を招いていた。

本稿では,スクラップ溶解を模擬したラボ試験結果と熱 収支計算結果に基づいて通電パターンを設計し,実機に適 用した結果について述べる。

### 2. 通電パターン変更検討

各 Skip でのスクラップの溶解能率は、投入熱量とスク ラップ投入速度に依存すると考えられる。しかし、スクラッ プ溶解促進のために投入熱量を過大にすると電力原単位悪 化に繋がり、またスクラップ投入速度が低下すると溶解能率 が低下するため、両者を適正にコントロールすることが重要 である。

模擬スクラップを溶鋼に浸漬し,スクラップ・溶鋼界面で の凝固シェル生成に及ぼす溶鋼温度・溶解時間の影響を調 査した。また実機での熱収支計算に基づいて通電パターン の改善を図った。

# 2.1 凝固シェル生成に及ぼす溶鋼温度・溶解時間の影響調査

溶鋼浸漬時のスクラップ溶解速度調査を目的に,純鉄の 溶鋼浸漬試験を行った。試験方法を図3に示す。スクラッ プ塊を模擬した純鉄サンプルを700kg大気炉で溶製した溶 鋼(1555℃,1635℃)に所定時間浸漬し,浸漬時間ごとに 回収サンプルの厚みを測定した。

溶鋼浸漬時間とサンプル厚み変化率の関係を図4に示す。 図中には実績プロットの他,一次元伝熱モデルでの計算結 果を記載した。サンプルは溶鋼温度が高温なほど短時間で 溶解した。浸漬後のサンプル外観を図5に示す。1555℃で 60s浸漬すると,溶鋼冷却による凝固シェルが生成された。 溶解時間増加の原因として,溶鋼温度による伝熱速度差以 外に,凝固シェル形成分の溶解遅延が考えられる。

溶解速度に関する既往の研究である J. Li らの Multi-bar サ ンプルの1650  $\mathbb{C}$  溶解 試験<sup>1)</sup> では、棒鋼を6.35,12.7, 19.1 mm 間隔として19本配列したサンプルの溶解時間を評 価している。10 s 浸漬後のサンプル外観を**図6**に示す。





Fig. 3 Melting and immersion test of pure iron (700 kg, atmospheric furnace)



図4 溶鋼浸漬時間と厚み変化率の関係

Fig. 4 Relationship between immersion time and thickness change rate during immersion in molten steel

-21 -

6.35 mm 間隔の Multi-bar サンプルは棒鋼間に凝固シェルが 生成し空隙が充填され,溶鋼との界面が減少した。空隙率 と完全溶解時間の関係を図7に示す。6.35 mm 間隔(空隙 率 0.56)では 19.1 mm 間隔(空隙率 0.82)に比べてサンプ ル溶解時間は約4倍となった。これは溶鋼との界面減少に よって溶解時間が増加したためと考えられる。



図5 溶鋼浸漬後のサンプル外観





図 6 J. Li らによる配列間隔の異なる Multi-bar サンプルの溶鉄 10 s 浸漬後外観<sup>1)</sup>

Fig. 6 Appearance of Multi-bar samples with different spacing intervals after 10-second immersion in molten iron, as studied by J. Li et al.<sup>1)</sup>



図 7 J. Li らによる配列間隔の異なる Multi-bar サンプルの,空隙率と完全溶解時間の関係<sup>1)</sup>

Fig. 7 Relationship between porosity and final melting time of Multi-bar samples with different spacing intervals, as studied by J. Li et al.<sup>1)</sup>

以上から, エコアークでスクラップ投入時に溶鋼温度が 低下すると, スクラップ表面に凝固シェルが成長し, 溶解が 遅延するとともに炉内に押し込まれる隣り合うスクラップの 間隔が狭くなり, 部分的に溶着するなど界面の接触面積が 減少することにより, さらに溶解時間が延長することが示唆 される。

### 2.2 熱収支計算と通電パターン

実機におけるスクラップ溶解に最低限必要な熱量を,式(1)により計算した。

(スクラップ溶解に必要な熱量)

=(スクラップ溶解潜熱, 顕熱)+(溶鋼温度保持に必要な 顕熱)-(スクラップ予熱分の顕熱(700℃前提)) ……(1)

スクラップの溶解潜熱および顕熱,ホットヒールの溶鋼温 度を保持するために必要な熱量を考慮し、またスクラップは 溶解室投入前にシャフト内で排ガスにより予熱されるため、 溶解室投入直前のスクラップの予熱温度を一律700℃と仮定 して予熱分のスクラップ顕熱を差し引いて計算した。なお、 補助燃料である炭材や、主に溶解初期に添加する生石灰な どの造滓材投入分は考慮していない。

アーク放電からの投入熱量はSkip 投入ピッチを一律 3.5 min/回と仮定して計算した。各Skip でのスクラップ溶 解に必要な熱量と工程の通電パターンの投入電力の関係を 図8に示す。この関係から,溶解期初期(1~3Skip)は, Skip 毎のスクラップ必要溶解熱量に対し,従来の投入電力 パターンでは電力不足であることが分かる。溶解期中期 (4~8Skip)は投入電力不足ではあるが,酸素吹き込みによ る炭材燃焼で補償するとともにスクラップの溶解室への実質 的な投入量を制御することで対応している。一方,9Skip 以 降は熱余り傾向にあることが分かった。

従って、ラボ試験結果と合わせて実操業における溶解能 率悪化の状況を推定すると、特に溶解期初期・中期のスク ラップ投入時に投入電力不足により溶鋼温度が低下してお り、前述のとおり、スクラップ表面の凝固シェル成長とスク



図8 各 Skip でのスクラップ必要な熱量と投入電力の関係

Fig. 8 Relationship between required heat input and power input for each skip



図9 各 Skip でのスクラップ必要な熱量と投入電力の関係

Fig. 9 Relationship between required heat input and power input for each skip



Fig. 10 Tap voltage for each skip

ラップ溶着が進行する結果,シャフト内スクラップの沈降悪 化および製鋼時間延長が生じていると考えられる。

### 2.3 通電パターン検討

図9に実験でのスクラップ溶解の必要熱量と投入電力の 関係を示す。溶解期初期・中期での投入熱量不足を回避す るため、その間の投入電力を増加した。図10に投入電圧を 示す。溶解期中期ではタップ電圧を840Vから過去最大の 870Vにまで上げることで、最大投入電力を76 MWから 78 MWに増加させた。これらにより、溶鋼温度低下による シャフト内スクラップの沈降悪化と溶解待ち時間の抑制を 図った。なお、溶解期後期では、前期の投入電力増加分の 余剰熱量分だけ投入電力を低下した。

### 3. 実機オンライン試験結果

試験前後の製鋼時間と電力原単位の関係を図11に示す。 実験 ch は工程 ch と比較して,製鋼時間は 6.2%短縮,電力 原単位は 1.3%低減した。製鋼時間のバラつきも低減してお り,スクラップ溶解待ち時間が減少して溶解能率向上したも のと考えられる。

前述のとおり,スクラップ溶解過程での凝固シェルの形 成により投入電力量が増加するため,凝固シェル形成量の バラつきが製鋼時間のバラつきとなり得る。また,ホット





ヒール操業においては,前 ch のホットヒールを抱えた状態 での操業となるため,前 ch の処理条件および炉内状況の影 響を受ける。前 ch の影響として,ホットヒール量および溶 鋼温度のみならず,シャフト間口付近のスクラップ・ホット ヒール(溶鋼)界面でのスクラップの溶解状況等が当該 ch の電力原単位の変動要因となり,これも溶解時間のバラつき の原因となる。各 Skip での熱バランスが改善され,凝固 シェル形成量や未溶解部分が低減していくと,必要な投入 熱量は熱ロスが低減する分,式(1)に示すような実質的な 最低必要熱量の値に収束していくはずであり,その観点から も今回の通電パターンの変更による溶解時間のバラつき低 減は,実際に凝固シェル形成量または次 ch に引き継ぐ未溶 解部が低減していることが示唆されている。

### 4. おわりに

スクラップ・溶鋼界面のシェル形成を抑制するためには 溶鋼温度を高温に維持することが溶解能率向上の要点であ り,溶解時間低減に寄与することが分かった。ただし、単に 高温にすることにより熱余りにすると電力使用量が増加する ため、適正な温度コントロールが求められる。

今回は,エコアークでの溶鋼温度低下を抑止すべく通電 パターンを変更することにより,製鋼時間を短縮し電力原単 位を削減した。カーボンニュートラル実現に向けて,今後も 継続的に改善を図っていきたい。

#### 参考文献

- 23 -

Li, J.; Provatas, N. Kinetics of scrap melting in liquid steel: Multipiece Scrap Melting. Metall. Mater. Trans. B. 2008, vol. 39B, p. 268–279.