

## 技術論文

## ロータリークーラーによる溶銑予備処理スラグの冷却技術の開発

## Development of Cooling Technology of LD-ORP Slag at Nagoya Works

田崎 智晶*	務川 進	浦川 倫明
Tomoaki TASAKI	Susumu MUKAWA	Noriaki URAKAWA
工藤 耕太	天田 克己	
Kohta KUDO	Katsumi AMADA	

## 抄 録

名古屋製鉄所製鋼工場では、転炉型溶銑予備処理炉 (LD-ORP) による高処理比溶銑予備処理を実施している。LD-ORP 炉より発生するスラグは転炉スラグに比べ、固相率が高く粉率も高いため、スラグ冷却処理における発塵が多く、対策の必要性が高まっていた。本課題の解消を目的に、ロータリークーラーを用いた溶銑予備処理スラグの冷却技術を開発し、実機設備設計につなげた。本設備の開発経緯、および概要について報告する。

## Abstract

**In Nagoya Works, pig iron from blast furnace is refined at a high through-put by converter type optimum refining process (LD-ORP). Slag produced by this process, has much solid fraction and fine particles, compared with conventional BOF slag. At the slag treatment process, the demand for reducing the dust emission was increased. So, the purpose of the development was focused on this issue. Rotary cooling process was developed and constructed as a solution. In this paper, outline of the development and the equipment has been described.**

## 1. 緒 言

中部地区は、国内の自動車産業の集積地であり、名古屋製鉄所は自動車用薄板製品の需要に応えることを最大の使命として発足、発展して来た。特に、1975年以降、自動車の防錆性強化が求められ、高品質の厚目付け亜鉛めっき鋼板の需要が増大した。これに応えるため、精錬プロセスにおいては、1989年に転炉型大量溶銑予備処理プロセスの開発、導入を行ない、その後効率化等の開発を行なってきた。一方で、溶銑予備処理スラグは、転炉スラグと同様、オープンスペースでの冷却処理を行なっていたが、本スラグは固相率が高く微粉比率も高いため、発塵抑制の必要性が高まっていた。本報では、名古屋製鉄所製鋼工場において行なった屋内スラグ処理プロセスの開発について述べる。

## 2. スラグ処理技術の基礎検討

## 2.1 スラグを取り巻く社会情勢の変化

1970年代より、社会的な公害問題への関心の高まりとともに、例えば大気汚染防止法、水質汚濁防止法等の法整備

が進むとともに、製鉄業においてもそれに対応すべく、多くの環境対策投資が行なわれてきた。特に転炉スラグについては、土木用材料としての利材化において、膨張や崩壊性、あるいはアルカリ性の課題に対し、蒸気エージング法等の改善技術の開発、適用により品質を確保してきた<sup>1)3)</sup>。

一方、1980年代に入り、我が国の高炉一貫製鉄所においては、大量溶銑予備処理技術が開発、導入され<sup>4)</sup>、製鋼スラグの主体は、転炉スラグから溶銑予備処理スラグに移行した。溶銑予備処理は比較的低温で処理を行なうため、スラグの固相率が高い。このため、従来の転炉スラグ同様のオープンスペースにおける冷却処理においては、粉塵発生の課題があった。また、今後、溶銑予備処理スラグの特質を生かした新たな用途開拓を行なうに当たっては、スラグ製品としての信頼性向上の観点より、トレーサビリティ(製造条件源流探求)向上の必要性も高まっている。

これらの課題を解決するため、集塵可能な屋内での処理、ならびに製鋼炉チャージごとの処理を可能とするため、迅速な冷却法として、ロータリークーラーを主要設備とする冷却技術の開発、導入を行なった。

\* 名古屋製鉄所 エネルギー資源化推進部 主幹 愛知県東海市東海町 5-3 〒476-8686

## 2.2 スラグ処理プロセスの検討

製鉄副産物としてのスラグは大別して高炉スラグと製鋼スラグの二種類が発生するが、高炉スラグに関しては、1970年代頃から水砕処理設備の開発が行なわれ、高炉セメントとしての利用が急速に進んだ<sup>5,6)</sup>。一方、製鋼スラグについては、これまで（発生時点でほぼ液相である転炉スラグを主に）回転羽冷却法<sup>7)</sup>（商品名：スラグレーター）、あるいは風淬化法<sup>8)</sup>による急冷法が開発され、研磨材などへの用途利用が進められた。製鋼スラグ特有の課題として、スラグ中に地金が混入することや、未反応の生石灰の課題などから、製鋼スラグ処理設備の開発は難航していたが、鋼板上で急冷するISC法が開発され<sup>9)</sup>、近年では中国でドラム式のBSSF法<sup>10)</sup>を開発するなどの例がある。

しかし、溶銑予備処理スラグは、スラグの融点が高炉温度よりも高いため、スラグ処理設備において、固体の地金を含むスラグの冷却が必要となることから、処理設備の開発は進まず従来通りのオープンスペースにおける放冷、散水法や、スラグパンを水没させる方法が主流であった。しかし、これらの課題を解決するため、ロータリー式の冷却処理の検討を開始した。なお、後述のように、本法では固体の地金を除去することにも有効であることが明らかになった。

## 2.3 ロータリークーラーの基礎検討

### 2.3.1 スラグ物性値の評価

代表的スラグ組成を表1に示す。スラグ処理用ロータリークーラーの設計に際しては対象とするスラグの基礎的な物性値を求める必要がある。モデル計算に必要な物性値のうち、成分、比熱、嵩密度、粒度分布を評価した。スラグの比熱は実際のスラグを微粉碎し、示差走査熱量計により測定した。

図1に比熱測定結果を示す。測定結果は温度依存性も含め、従来のダイカルシウムシリケートの文献値<sup>11,12)</sup>と比較的良く一致した。

次に図2にスラグ粒度の粒度分布測定を示す。水冷と表示されたものは、スラグヤードで水冷処理を行なう従来法によるものである。一方、空冷と示した試料は、試験的に水を使用せず、空冷処理を行なった試料である。比較すると水冷の方が粒径分布が大きい。これは、水冷によって粒径の小さい微粉が大きな粒径の粒子に付着するためである

表1 代表的スラグ組成  
Representative slag compositions

Element	(wt%)
CaO	53.1
SiO <sub>2</sub>	24.3
T-Fe	7.7
MgO	3.4
F-CaO	4.6

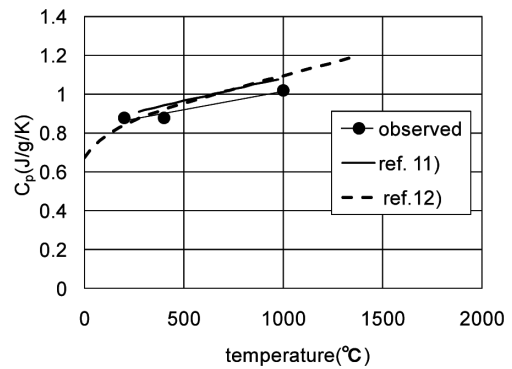


図1 スラグ比熱の温度依存性  
Temperature dependence of the slag specific heat

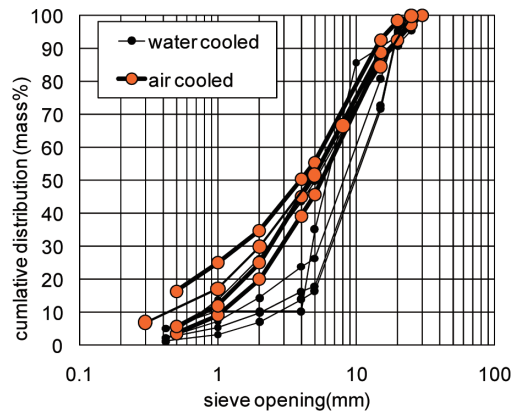


図2 スラグの累積粒度分布  
Accumulation particle size distribution of slag

と考えられる。平均粒径（累積分布40%径）は凡そ2mmである。

嵩密度は、定容量の容器に充填したスラグの重量を測定することで評価した。嵩密度の測定値は、1800～2000kg/m<sup>3</sup>の範囲であった。モデル計算では1900kg/m<sup>3</sup>とした。

### 2.3.2 Kiln-simulator<sup>13)</sup>による冷却能力の検討

スラグの基礎的な物性値を求めた後、ロータリークーラーによるスラグ冷却能力の推定に、モデル解析を行なった。図3にロータリークーラーの伝熱モデルの概念を示す。ロータリークーラー内を通過するスラグとそれに対向して流れる冷却ガスとスラグ、およびロータリークーラー円筒部との熱交換、更に、外気と冷却水との伝熱を考慮したモデルを作成した。実際の計算プログラムとしては、市販のキルンシミュレーター<sup>13)</sup>を利用し本開発設備用にアレンジした。本モデルに含まれる伝熱に関するパラメータとその決定方法を表2に示す。

図4にシミュレーションで用いた計算モデルの長手方向の差分セルを示す。本モデルは、内部に供給される冷却ガス、あるいは水とスラグ、およびクーラー円筒との伝熱を計算する。更に、ロータリー円筒外壁における冷却空気、冷却水との熱交換も考慮する。円筒内部、外部の伝熱にお

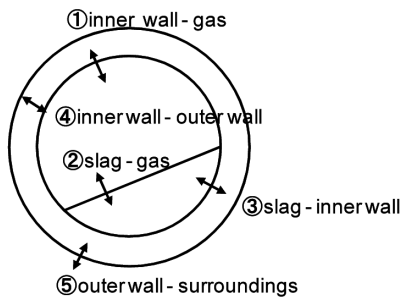
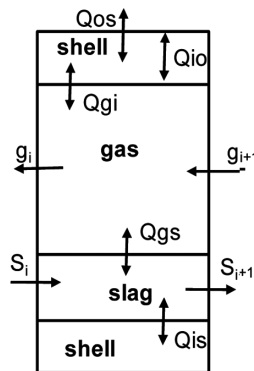


図3 伝熱機構の概念図  
Conception diagram of the heat transfer mechanism

表2 モデルに含まれる伝熱に関するパラメータ  
Parameter about the heat transfer included in the model

①	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (T_g < T_i)$ $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} (T_g > T_i)$
②	$Nu = 0.46 Re_0^{0.535} Pr^{0.104} \zeta^{-0.341}$ $Re_0 = D^2 \omega \rho_g / \mu_g, \zeta$ : Filling ratio
③	Penetration theory $h_{is} = (\lambda_s C_{ps} \omega / \pi \varphi)^{1/2}, \varphi$ : Filling angle
④	$q = -\lambda \partial T / \partial r$
⑤	$Nu = (0.60 + 0.37 Ra^{1/6} / [1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{8/27})^2$ $Ra = Gr \cdot Pr, Gr = \beta \rho_g^2 D^3 (T_j - T_s) / \mu_g^2, Pr = \mu C_p / \lambda$ in case of free convection



Qos : convection between outer wall and surroundings  
Qio : conduction in shell  
Qgi : convection between gas and inner wall  
Qgs : convection between gas and slag  
Qis : convection between inner wall and slag

図4 計算モデル概要  
Schematic diagram of calculation model

いては輻射伝熱も考慮する。ただし、軸方向の輻射は考慮されていない。長手方向には、装置を微小長さのセルに分割し、隣接するセルとの物質、熱バランスを解くことにより、全体の温度分布、物質の流れをシミュレーションする。なおスラグの比熱、嵩密度については前述の実測値を用い、空気、水、ロータリークーラー本体の熱伝導率については文献値に依った<sup>14,15)</sup>。スラグ層のロータリークーラー内移動速度の推算には、ロータリーキルン等で従来、提案され

ている幾つかの実験式の中から、パイロットスケール実験での実測値に合致する Sullivan の式<sup>16)</sup>を用いることとした。

$$V_s = \frac{51.6 D_i \omega \tan \psi}{\beta + 24}$$

$V_s$  : Slag transfer speed (m/s)  
 $D_i$  : Inside diameter of shell (m)  
 $\omega$  : Rotation speed of shell (rad/s)  
 $\psi$  : Tilting angle of shell (rad)  
 $\beta$  : Dynamic angle of repose (deg)

2.3.3 パイロットプラントでの確性試験

上記の計算結果を元に、名古屋製鉄所のスラグ処理場内に、10t/hのパイロットプラントを製作し、実機での冷却試験を行なった。表3にパイロットプラントの基本仕様を示す。写真1に示すように、パイロットプラント構成は投入ホッパー、振動フィーダー、ロータリークーラー、出側の集塵サイクロンと空冷ブロワーで構成される。

ロータリークーラーへの熱滓投入は、重機にて行ない、投入前のスラグ温度、投入後のホッパー内部、ロータリークーラー出側のスラグ温度、排ガス温度、冷却水の入側、出側温度を連続的に測定した。

この10t/hパイロットプラントでの実機試験結果を元にシミュレーションモデルで検証した結果を示す。本計算結

表3 パイロットプラント基本仕様  
Specification of pilot plant

Hopper size	2 m <sup>3</sup>
Slag feeding speed	10 t/h
Shell diameter	1.93 m
Shell length	7.4 m
Cooling water (outside)	30 t/h
Cooling water (inside)	1 t/h
Cooling air	140 Nm <sup>3</sup> /min
Rotation speed	1 rpm
Tilting angle	1/100
Filling ratio	10%



写真1 10t/h規模パイロットプラント外観図  
10 ton/h scale pilot plant external view

果より伝熱の律速機構は、内部における吹き付け空気とスラグベッド間の熱伝達であると推定される。更に、入り口の温度が高い場合、装置の冷却能力を高める上で、水冷を併用することが効果的であることが推定される（図5、6）。その場合、スラグ温度がある程度の高い領域でのみ、散水を行なうことで、乾燥状態を保ちつつ、冷却能力を高めることができる。冷却という観点からは、水冷と空冷の併用はフレキシビリティの面で優れた方法であると考えられる。

### 3. 設備建設

パイロットプラントの試験とシミュレーション結果から、実機のロータリークーラーを設計し建設を行なった。実機的设计能力としては当時のスラグ発生量を元に設計した。溶銑予備処理スラグ処理設備のレイアウトを図7に示す。建屋には天井と各設備に局所集塵を有し、操業は中央操作室、クレーン操作室の室内で行なわれる。集塵機は建屋内の集塵フードとロータリークーラーに接続され、スラグ処理時に発生する粉塵を吸引しており、屋外への飛散を抑制している。

次に本設備での処理フローを述べる。

#### ① 溶銑予備処理工場でスラグパンに受滓した高温スラグ

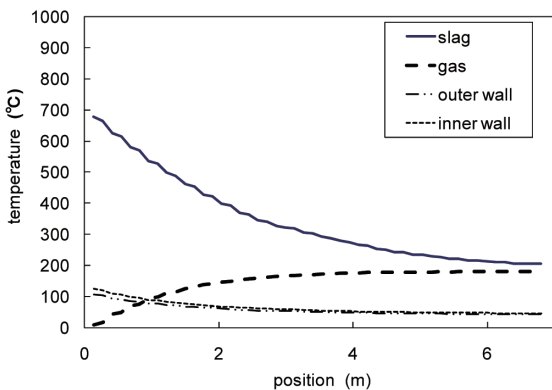


図5 内部散水なしの計算結果  
Calculation result without the internal sprinkling

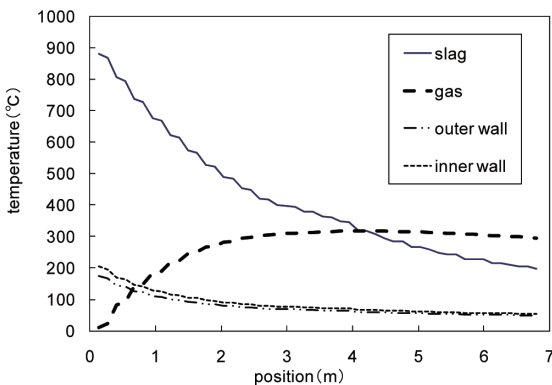


図6 内部散水ありの計算結果  
Calculation result with the internal sprinkling

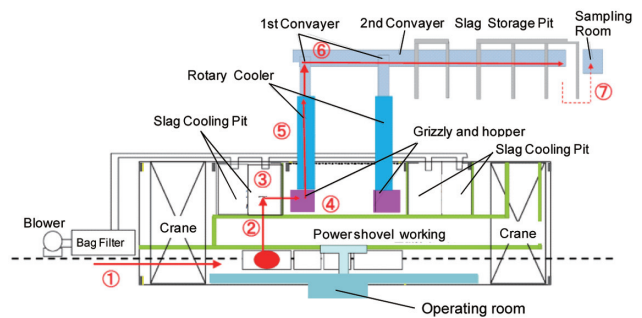


図7 ORP スラグ処理設備のレイアウト  
Layout of the ORP slag processing plant

は、鉄道にて建屋内へ運搬される。

- ② クレーンでスラグパンを吊上げ傾動させ、一次冷却ピットへスラグを排出する。
- ③ 一次冷却ピットでは重機でスラグを掻き均し冷却するとともに、重機を用いて事前で大塊地金を除去し、スラグを隣接のホッパー上へ投入する準備を行なう。
- ④ 重機でホッパー上にスラグを投入する。スラグはホッパー上に設置した振動グリズリーによって、篩分を行ない、篩下スラグはホッパー内、篩上スラグは土間上に分別される。ホッパー内に貯蔵されたスラグは振動フィーダーにてロータリークーラー内へ一定速度で切り出される。
- ⑤ 切り出されたスラグはロータリークーラーにより約30分で100℃以下に冷却される。
- ⑥ 冷却後のスラグはコンベアを経て、トリッパーコンベアにて各製品ピットへと送られる。
- ⑦ 各ピットでストックされたスラグはその場でサンプルを採取し、気送管で分析センターへ送付後に成分確認を行ない、環境安全性を確認後、エージングヤードへ輸送する。

### 4. 結 言

名古屋製鉄所での溶銑予備処理スラグのロータリークーラー設備検討に際し、スラグの基礎物性調査を行ない、伝熱計算モデルにより可能性の評価を行なった。更に、10t/hのパイロットプラントにてモデルの検証を行なった。本結果に基づき、50t/hの実機設備建設を行なった。

#### 謝 辞

スラグ処理検討全般に関して産業振興(株)には多大なご協力を頂いた。記して感謝の意を表したい。

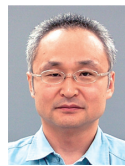
#### 参照文献

- 1) 佐野信雄 ほか：鉄と鋼. 65 (12), 1787 (1979)
- 2) 佐々木稔 ほか：鉄と鋼. 68 (6), 641 (1982)
- 3) 高山俊一 ほか：土木学会論文集. 32 (544), 177 (1996)
- 4) 井上茂 ほか：日本鉄鋼協会, 日本学術振興会製鋼第19委員

- 会編“大量生産規模における不純物元素の精錬限界”. 1996, 151
- 5) 後藤一夫：窯業協会誌. 720, 48 (1956)
- 6) 阿部幸弘 ほか：製鉄研究. 301 (6), 93 (1980)
- 7) 成松陽明 ほか：鉄と鋼. 64, S605 (1978)
- 8) 小野殖幸 ほか：日本鋼管技報. 96, 693 (1982)
- 9) 高島忠男 ほか：製鉄研究. 301 (6), 110 (1980)
- 10) [http://bsee.baosteel.com/english/tech5\\_4.htm](http://bsee.baosteel.com/english/tech5_4.htm)
- 11) 日本鉄鋼協会：溶鉄・溶滓の物性値便覧. 1972, p. 198
- 12) 日本鉄鋼協会：Chemical Properties of Molten Slag. 1991, p. 9
- 13) Kiln-Simu: VTT Technical Research Center of Finland
- 14) 日本機械学会：流体の熱物性値集. 初版. 1983
- 15) 日本機械学会：伝熱工学資料. 第4版. 1986
- 16) Sullivan, J.D. et al.: U.S.Bureau of Mines, Technical Paper 384. 1927, p. 1



田崎智晶 Tomoaki TASAKI  
名古屋製鉄所 エネルギー資源化推進部  
主幹  
愛知県東海市東海町5-3 〒476-8686



工藤耕太 Kohta KUDO  
名古屋製鉄所 設備部 主幹



務川 進 Susumu MUKAWA  
名古屋技術研究部 主幹研究員 工博



天田克己 Katsumi AMADA  
名古屋製鉄所 設備部 主幹



浦川倫明 Noriaki URAKAWA  
名古屋製鉄所 設備部 主査