

# 製鋼スラグ顕熱回収技術開発

## Development of Heat Recovery System from Steelmaking Slag

當房 博幸 TOBO Hiroyuki JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (副部長)  
紫垣 伸行 SHIGAKI Nobuyuki JFE スチール スチール研究所 環境プロセス研究部 主任研究員 (副課長)  
萩尾 勇樹 HAGIO Yuki JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 設備部 主任部員 (係長)

### 要旨

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究開発プロジェクト「環境調和型製鉄プロセス技術開発 (COURSE50)」の 1 テーマとして、製鋼スラグからの顕熱回収技術の開発に取り組んでいる。双ロール方式で板状のスラグを連続的に作製し、充填層で空気と熱交換するプロセスを提案した。パイロット設備を建設し、板状に成形したスラグから顕熱回収する実験を行ない、熱回収率 30%以上が達成できることを確認した。

### Abstract:

JFE Steel has been developing a technology of sensible heat recovery from steelmaking slag as one of the themes in Incorporated Administrative Agency New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) project "Environmentally Harmonized Steelmaking Process Technology Development (COURSE50)." A unique process has been proposed. By using twin cooling rolls, melted slag is solidified into the form of plates, which then filled in a chamber. Sensible heat of the sheet-like slag is recovered by a heat exchange process. A pilot plant for proof-of-concept experiments was constructed and the validity of the proposed process has been verified by showing that the heat recovery ratio is over 30%.

## 1. はじめに

2008 年度から日本の高炉メーカーでは、製鉄所から発生する CO<sub>2</sub> を大幅に削減することを目標に、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究開発プロジェクト「環境調和型製鉄プロセス技術開発 (COURSE50)」に取り組んでいる<sup>1)</sup>。CO<sub>2</sub> 分離技術の一つとして開発中の化学吸収法において、吸収液からの CO<sub>2</sub> 分離に熱エネルギーを必要としており<sup>2)</sup>、製鉄所内の未利用顕熱、排熱を回収し供給することも COURSE50 の開発ターゲットの一つである。JFE スチールでは、未利用顕熱、排熱の 1 つで最も高温である 1200℃以上の高温溶融状態の製鋼スラグから、スラグ製品を製造する工程において、製鋼スラグの顕熱を回収する技術の開発を担当している。

製鋼スラグからの顕熱回収技術開発のポイントは、熱伝導度の小さいスラグから効率的に顕熱を回収することにある。本開発では、双ロール方式で板状のスラグを連続的に作製し、充填層で空気と熱交換するプロセスを提案した。開発の目標は、熱回収率 30%以上かつ 140℃以上の高温ガスを回収することである。実用規模に近いパイロット試験設備を建設し、製鋼スラグからの顕熱回収の実験を実施した。この COURSE50 のステップ 1 の結果について報告する。

## 2. 製鋼スラグ連続凝固プロセスの開発

### 2.1 双ロール式製鋼スラグ連続凝固パイロット設備の概要

双ロール式製鋼スラグ連続凝固パイロット実験設備 (写真 1) の概要を図 1 に、設備仕様を表 1 に示す。本設備はスラグを連続的に凝固する 2 つのロール、それに溶融スラグを一定流量で供給するためのスラグ鍋傾転装置およびロールで成形されたスラグを搬送するコンベアから構成されている。スラグの凝固時間をより長く確保するため、2 つのロールが接触し外向きに回転し、スラグがロールとともに

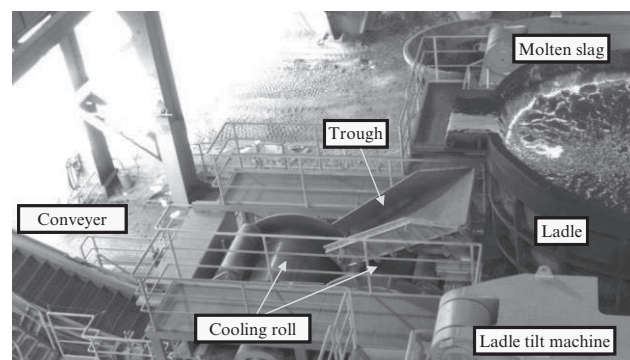


写真 1 双ロール式スラグ連続凝固パイロット設備

Photo 1 View of twin roll type continuous slag solidification pilot plant

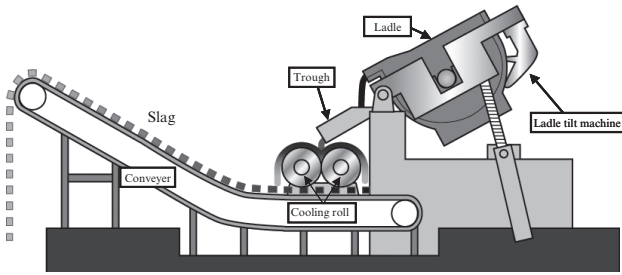


図1 双ロール式スラグ連続凝固パイロット設備の概要

Fig. 1 Schematic diagram of twin roll type continuous slag solidification pilot plant

表1 双ロール式スラグ連続凝固パイロット設備の仕様

Table 1 Specification of twin roll type continuous slag solidification pilot plant

Equipment	Specifications	
Cooling roll	Dimensions	Φ1.6 m × W1.5 m
	Number of roll	2
	Material	Cu
	Rotation speed	Max. 20 rpm
	Cooling water flow rate	125-130 m <sup>3</sup> /h・roll
Ladle tilt machine	Tilt speed	Max. 65°/min
	Load	Max. 140 t
Conveyer	Dimensions	W1.3 m × L14.5 m
	Lifting height	5.5 m
	Speed	25 m/min
	Material	SUS304

巻き上がる JFE エンジニアリングが開発、実用化した設備<sup>3)</sup>と同様の方式とした。冷却ロールは、スラグの冷却を強化するために材質は銅とし、内部を水冷している。1 t/min で熔融スラグを供給し、厚み約 5 mm に連続的に凝固することを想定し、外径 1.6 m、幅 1.5 m の大型のロールになっている。傾転装置は、製鋼工場の熔融スラグを輸送するスラグ鍋を搭載でき、油圧シリンダーで一定速度に傾転できる。ロール成形後の高温の凝固スラグを輸送するため、コンベアはステンレス鋼製とし、背面側に冷却用の散水ノズルを設置した。本実験の対象スラグはクロム鉬石熔融還元炉スラグとした。

## 2.2 冷却ロールの設計

最適な冷却ロール構造を検討するため、FEM(有限要素法)解析によりスリット型、ロータス型、スパイラル型の3種の水路形状について、銅ロールの温度、応力分布を比較した。1500℃のスラグが半周ロールと接触していると仮定し、冷却水量は125 t/h、冷却水入口温度、外気温度は各々30℃とした。

図2にFEM解析の結果を示す。どの水路形状も銅板の表面温度は耐力を維持できる300℃以下となり、冷却能力は

十分である。熱応力の最大値は、スパイラル型が最も小さい値になった。最も簡単な構造のスパイラル型が、加工性でも優位である。よって、今回の冷却ロールの流路形状はスパイラル型に決定した。

ただし、スパイラル型は他の形状と比べ、熱膨張量が大きい。熱膨張により銅ロールとステンレス鋼製中子の間に隙間が生じると、流路中央部の流速が極端に小さくなり、ロールを冷却する能力が低下し、銅ロールの温度が上昇する問題が生じる。所定の冷却水流速を維持するため、冷却水系統が1系統の場合と2系統の場合について、汎用熱流体解析ソフト FLUENT 6.3 を用いて解析した。ロール全体の冷却水流量は125 t/h一定とし、外筒と中子の隙間は2.5 mmとして検討した。

解析結果を図3に示す。隙間2.5 mmでの流路中央部を流

	Slit	Lotus	Spiral
FEM			
Max. Cu Temp.	169.2℃	210.7℃	219℃
Max. Stress	1 060 MPa	548 MPa	217 MPa
Workability	Fair	Fair	Good
Thermal expansional	0.72 mm	1.08 mm	2.5 mm
	1.18 mm	0.97 mm	2.5 mm

図2 ロール内部の水路形状の比較

Fig. 2 Comparison of channel shape in roll

	1 Channel	2 Channel
Flow volume	125 t/h × 1	62.5 t/h × 2
Flow velocity	1.5 m/s	2.0 m/s

図3 水路系統数による冷却水流速への影響

Fig. 3 Effect of water velocity by channel

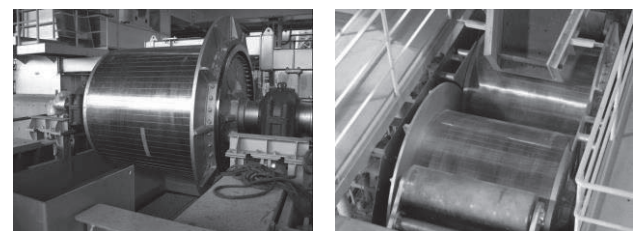


写真2 製作した冷却ロール

Photo 2 View of cooling roll

れる流速は、2系統で2.0 m/s、1系統で1.5 m/sと2系統の方が、流速が大きく冷却能力が高い。以上の結果より、冷却水流路は2系統の2重スパイラル型を採用した。製作した冷却ロールの外観を写真2に示す。

### 2.3 スラグ連続凝固実験結果

双ロール式製鋼スラグ連続凝固パイロット実験設備における実験は、以下の手順で実施した。油圧シリンダーで傾転装置を一定速度で押し上げ、一定流量でスラグ鍋から樋を介して2つのロール間の谷間に熔融スラグを供給した。2つの対向するロールは外向きに回転し、ロール表面で冷却凝固したスラグはロールに付着して巻き上げられ、半周後にコンベア上に落下した。凝固したスラグはコンベアで搬送され、コンベア末端からピットへ落下した。ピット内のスラグは散水または放冷された後、ショベルで搬出した。鍋から流出する熔融スラグの温度は放射温度計で測定し、ロール上、コンベア上のスラグ温度は赤外線サーモグラフィで測定した。どちらも放射率は0.92とした。

パイロット実験において、熔融スラグがロール幅全体に広がり連続して巻き上げることができたときの状況を写真3に示す。供給する熔融スラグの流動性がよい場合に、ロール幅全体に広がって巻き上がった。

サーモビューアによるロール上のスラグ表面温度の測定例を図4に示す。スラグ表面温度は、ロール上で凝固する

際に200~250℃低下する。コンベア上では温度低下が小さく、コンベア末端では1100℃程度であった。目標の顕熱回収前スラグ温度1000℃以上を確保できることを確認できた。

ロール成形したスラグの冷却後の状態を写真4に示す。スラグはコンベア末端から落下する際に割れ、さらにピットに落ちて砕けた。回収したスラグを観察すると、ロール接触面側は平坦で硬く、自由表面側は、気孔が多く凹凸していた。



写真3 パイロット実験状況  
Photo 3 View of pilot experiment

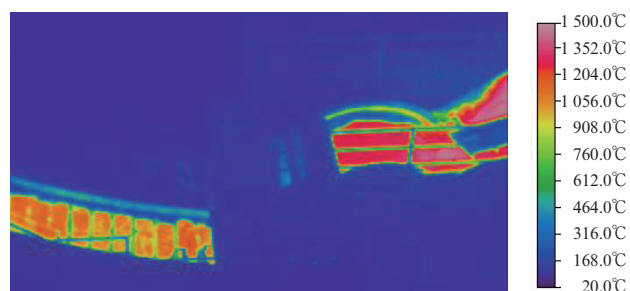


図4 ロールおよびコンベア上のスラグの温度

Fig. 4 Slag temperature on roll and conveyer by thermo viewer

(a) Solidified slag after experiment



(b) Plate shaped slag

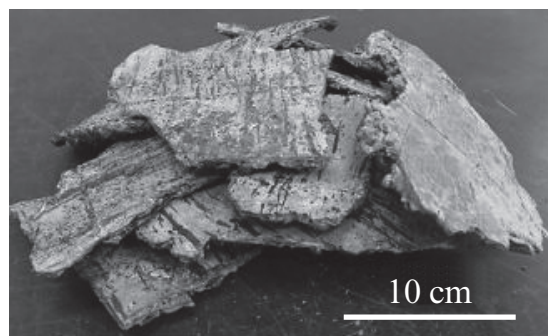


写真4 凝固したスラグの外観  
Photo 4 Appearance of solidified slag

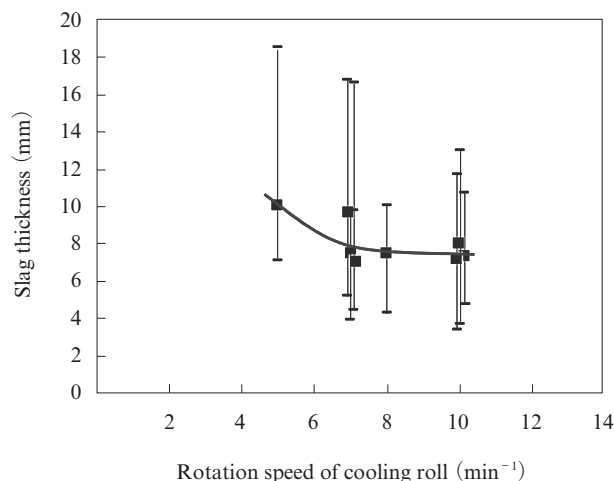


図5 冷却ロール回転速度とスラグ厚みの関係

Fig. 5 Effect of cooling roll rotation speed on slag thickness

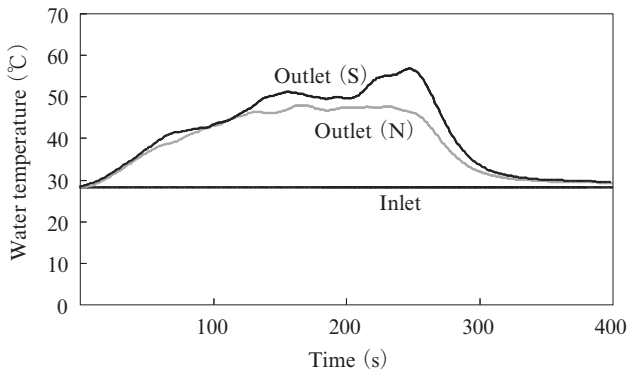


図6 ロール成形中の冷却水の温度上昇

Fig. 6 Temperature of cooling water for slag roll forming

スラグ厚みに及ぼす冷却ロール回転数の影響を図5に示す。冷却ロール回転数は $5\sim 10\text{ min}^{-1}$ で実験した。ロール回転数 $10\text{ min}^{-1}$ では、平均スラグ厚みは $7\sim 8\text{ mm}$ になった。図6にロール成形中の冷却ロール入側および出側の水温を示す。スラグをロールで成形中にロール内を通過する水温は約 $30^\circ\text{C}$ 上昇するが、設計範囲の $70^\circ\text{C}$ 以下であり、設計通りの冷却能力が得られている。

### 3. スラグ顕熱回収プロセスの開発

#### 3.1 スラグ顕熱回収パイロット設備の設計

今回建設したスラグ顕熱回収パイロット設備は、コークス乾式消火設備(CDQ)と同様の向流充填層型の熱交換装置であるが、同一処理量および装入温度で比較した場合、スラグ顕熱回収設備の回収熱量はCDQの約 $1/2$ である。CDQの場合、コークスから発生する可燃性ガスの潜熱分がエネルギーとして回収されるため、熱回収量が多くなり経済性の面でCDQの方が優位である。CDQの充填物であるコークスの形状は塊状で球形近似可能であり、充填層内の熱伝達係数は高炉モデルなどで用いられるRanz-Marshall式にて推定が可能である<sup>4)</sup>。一方、先述のロール成形パイロット設備で凝固成形される板状スラグについては、その形状の違いから熱伝達係数を既存モデルから推定することができない。また、スラグが板状であるため熱回収ガス流量が大きいと充填スラグが流動化する懸念もある。

そこで、今回スラグ顕熱回収パイロット設備の設計に際し、まず実験室スケール $\phi 300\text{ mm}$ 熱回収実験装置に実験室で製作した厚さ $7\text{ mm}$ の板状スラグ破碎サンプルを再加熱して充填し、ガス流量 $60\sim 200\text{ l/min}$ で熱回収実験を実施して、充填層内における熱伝達係数式の精度評価を行なった。結果、板状スラグ充填層内の熱伝達係数はRanz-Marshall式よりも平板上の強制対流伝熱式であるJohnson-Rubensin式<sup>5)</sup>に補正係数 $\beta=0.25$ を掛けた(1)式の方が精度よく予測できることが分かった。補正係数の値は充填層内のガスの流

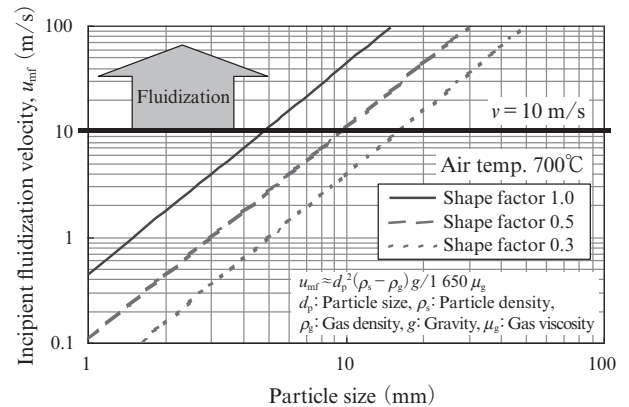


図7 粒子径と流動化開始速度との関係

Fig. 7 Relationship between the particle size and incipient fluidization velocity

れやすさ、ガス流れの偏在化を熱伝達係数変化として補正するもので、今回は板状スラグ充填層内の熱挙動を表す値として $\beta=0.25$ を得た。

$$h_s = \beta \frac{k_g}{L_m} \left( 0.037 \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \text{Re}^{\frac{4}{5}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Pr: プラントル数 Re: レイノルズ数

$k_g$ : 熱伝導率  $L_m$ : 粒子平均辺長

$\beta$ : 補正係数 (=0.25)

図7は、粒子径と流動化開始速度の関係を示し、形状係数(1.0:球状, 0.5~0.3:板状)が小さくなるほど充填粒子が流動化しやすくなる。ロール成形装置から供給される凝固スラグは、落下による衝撃と破碎処理により少なくとも外径寸法 $15\text{ mm}$ 以上程度の板状粒子として供給されると予想され、図7より、流動化防止のためにはガス空塔速度を $10\text{ m/s}$ 以下に抑制する必要がある。

次に、熱回収時のスラグ冷却速度および熱回収ガス温度を設備スケールごとに計算し、COURSE50目標であるスラグ熱回収率 $\geq 30\%$ かつスラグ処理能力 $60\text{ t/h}$ を達成可能な設備規模を試算した。その結果、ガス流量 $40\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 、充填層内径 $\geq 2.5\text{ m}$ (断面積 $\geq 4.9\text{ m}^2$ 、ガス空塔速度 $\leq 8.5\text{ m/s}$ )、スラグ充填高さ $\geq 1.5\text{ m}$ で所定の処理能力および熱回収率を達成可能と見込まれる。今回建設したパイロット設備は、設置スペースなどの制約により、上記に対しガス流量 $1/4$ として処理能力を $10\text{ t/h}$ に絞った仕様にした。充填層断面積については、スラグ形状および破碎サイズの不定性や熱回収炉内のガス流れ偏りによる局所流速増加なども考慮し、上記ガス流量に対して断面積を $3\text{ m}^2$ と広めに設計してガス空塔速度を約 $3\text{ m/s}$ に抑制した。

#### 3.2 スラグ顕熱回収パイロット設備の概要

今回建設した製鋼スラグ顕熱回収パイロット設備の生産

工程を**図 8**、設備仕様を**表 2**に示す。ロール成形パイロット設備で板状に凝固成形し、エプロンコンベアにて搬送する。次に、コンベア出側から排出される凝固スラグの一部を、スライド式シュートを用いて熱回収実験用に採取し、簡易破碎機にてサイズ調整後、バケットエレベーターにてスラグ顕熱

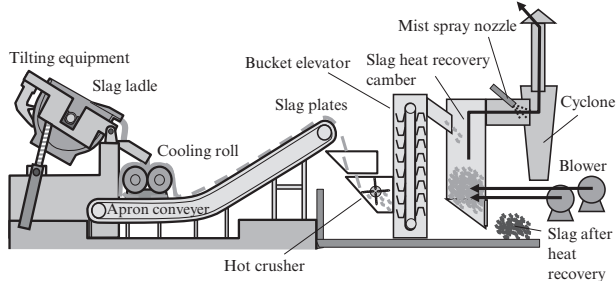


図 8 COURSE50 スラグ顕熱回収設備の工程図

Fig. 8 Process drawing of the COURSE50 slag heat recovery plant

表 2 スラグ顕熱回収パイロット設備の仕様

Table 2 Specification of the slag heat recovery pilot plant

Operating condition	Slag charging rate: 1 t/min
	Slag cooling capacity : 10 t/h (at the discharge temperature of 250°C)
Equipment specifications	Clusher Roller chain type, Capacity: 60 t/h
	Bucket elevator Transport Capacity: 60 t/h
	Heat recovery chamber Maximum size of the slag packed bed : L1.5 × W2.0 × H2.5 Maximum amount of slag: 6 t (at the bulk specific gravity of 1 t/m <sup>3</sup> )
	Blower Gas flow rate: 6 000 Nm <sup>3</sup> /h × 2 Motor: 75 kW × 2
	Cyclone Size φ 2.2 × H7.5 m

回収装置に連続的に供給した。スラグ顕熱回収装置内に充填されたスラグに対して、2基のプロワからの送風により熱交換を行ない、回収ガスの温度履歴および充填層内の圧力損失を測定して熱回収効率を評価した。今回建設したベンチ設備は、ボイラなどの熱利用設備は設けていないため、熱回収ガスの特性評価を行なった後は、散水スプレーで熱回収ガスを冷却し、サイクロンで除塵して放散した。熱回収装置の本体形状は、Ergun の式から予想される充填層内圧損が最大 10 kPa 程度と小さいことから、スラグ装入および排出機構の簡易化も考慮して角型で設計した。スラグ顕熱回収ベンチ設備の外観写真を**写真 5**に示す。

### 3.3 スラグ顕熱回収実験結果

**写真 6** は、スラグ顕熱回収実験中のスラグの写真である。写真 6 の上側は、破碎機を上部から撮影したものであり、スラグは写真の右側から左側へ流れながら順次破碎されてバケットエレベーターの装入口へ流れ込む。写真 6 の下側は、監視カメラで見たスラグ装入中の熱回収炉内の写真である。バケットエレベーター搬送時間は約 20 s と短く、搬送時ヒートロスによるスラグ温度低下は 50°C 以下程度と小さかった。

熱回収装置本体に装入したスラグ 1.7 t に対し、プロワ流量 6 000 m<sup>3</sup>/h で熱回収を行なった際の熱回収ガス温度履歴実績グラフを**図 9**に示す。スラグ充填量が設備定格 6 t に対して少なく、スラグ充填高さは断面積で割った有効高さで



写真 5 COURSE50 スラグ顕熱回収設備の外観写真

Photo 5 Exterior of the COURSE50 slag heat recovery plant

Hot crusher



Lower: Slag chamber

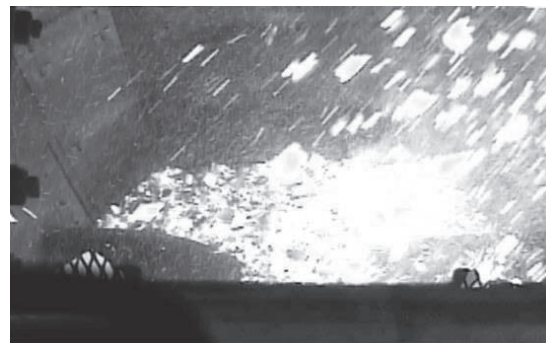


写真 6 熱回収スラグ

Photo 6 Hot slag plates charged for heat recovery

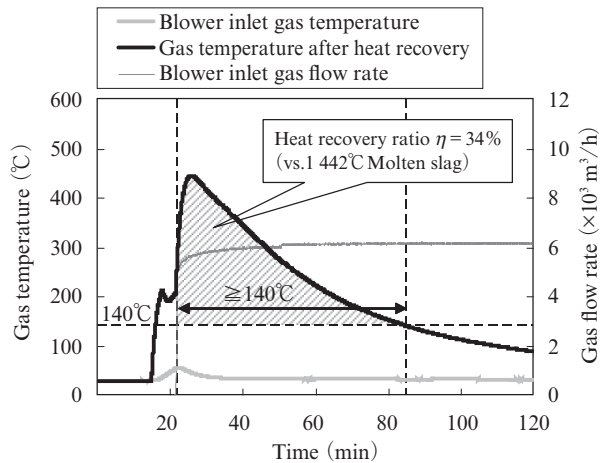


図9 溶融スラグからの熱回収率

Fig. 9 Heat recovery ratio from the molten slag

0.57 m (ブロワ送風口先端より約 0.4 m) であったが、最高 450°C の高温の熱回収ガスを得ることができた。図のハッチング領域は COURSE50 目標として掲げた 140°C 以上の回収ガス温度を表す領域で、140°C 以上の熱回収ガスを 63 min 連続的に回収できた。試験開始直前に放射温度計で測定した溶融スラグ温度は 1 442°C であり、該温度から求めた溶融スラグ熱量（潜熱＋顕熱）に対する 140°C 以上熱回収ガス顕熱の回収率は 34% であった。

#### 4. おわりに

COURSE50 プロジェクトにおいて、実際の製鋼工場で発

生する溶融スラグを用いて双ロール式製鋼スラグ連続凝固パイロット設備とスラグ顕熱回収パイロット設備を連動させた熱回収実験を実施した。ロール成形パイロット設備で連続的に凝固させた厚さ 7 mm の板状スラグ最大 1.7 t を 1 000°C 以上の高温状態を保ったままスラグ顕熱回収パイロット設備に装入して熱回収を行ない、溶融スラグからの熱回収率 34% を達成した。

本成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の「環境調和型製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」の結果得られたものです。

#### 参考文献

- 1) 三輪隆, 奥田治志. 日本エネルギー学会誌, 2010, vol. 89, p. 28-35.
- 2) Matsuzaki, S.; Higuchi, K.; Shinotake, A.; Saito, K. SCANMET IV. 2012, p. 45-49.
- 3) 明石哲夫, 市川哲也, 鈴木永芳. JFE 技報, 2008, no. 19, p. 61-64.
- 4) 羽田野道春, 栗田興一. 鉄と鋼. 1980, vol. 66, p. 1898-1907.
- 5) Johnson, H. A.; Rubesin, M. W. Transactions of the ASME. 1949, vol. 71, no. 5, p. 447-456.



當房 博幸



紫垣 伸行



秋尾 勇樹