

# 製鋼スラグからの顕熱回収技術の開発

## Development of Heat Recovery System from Steelmaking Slag

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 (課長)  
田 恵太 TA Yasutaka 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 (副課長)  
鷺見 郁宏 SUMI Ikuhiro JFE スチール スチール研究所 環境プロセス研究部 (部長)

### 要旨

NEDO プロジェクト「環境調和型製鉄プロセス技術開発 (COURSE50)」の一環として、JFE スチールでは製鋼スラグ顕熱回収技術の開発を行っている。2008～2012 年の Step1 開発期間では、熔融スラグから双ロール方式にて板状スラグを連続的に凝固させた後にスラグ熱回収設備にて熱回収を行う新プロセスを開発し、パイロット設備を建設して実証試験を実施した。2013 年以降の Step2 開発では、実機設備化を見据えた設備改善を行うと共に、本パイロット設備におけるスラグ連続処理能力の拡大を図った。その結果、スラグ連続凝固設備において最大 29 t/h のスラグ連続処理を達成した。また、本プロジェクトの目標である熔融スラグ保有熱に対する熱回収 30%以上を得ることが出来た。

### Abstract:

JFE Steel has been developing a technology of sensible heat recovery process from steelmaking slag as one of the themes in NEDO project "COURSE50". From FY 2008 to FY 2012 as in Step1 development period, we developed a slag heat recovery process from plate shaped slags that were solidified continuously by the surfaces of two cooling rolls, and verified the feasibility of this process by pilot scale tests with a newly developed pilot plant. From FY 2013 as Step2 development, we modified the pilot plant to improve the stability and productivity of slags taking actual operating conditions into consideration. As a result, we succeeded in continuous production of 29 t-slag at maximum. We also achieved the target heat recovery ratio of above 30% from molten slag in this project.

## 1. はじめに

日本の高炉メーカー各社は、日本国内における全 CO<sub>2</sub> 排出量の約 15%を占める鉄鋼業界からの CO<sub>2</sub> 排出量を大幅削減するため、各社参画の下で NEDO 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>。JFE スチールでは、COURSE50 開発テーマの 1 つとして、CO<sub>2</sub> 分離に必要な熱エネルギーを回収するための製鋼スラグからの熱回収技術の開発を行っている。製鋼スラグの保有熱は、製鉄所の未利用排熱の中でも特に高温で利用価値の高いエネルギーとして回収利用が期待されている。COURSE50 の Step1 開発期間 (2008～2012 年) において、まずは熱伝導率の低いスラグから熱回収を行うのに適したスラグ凝固形状の造り込みについて諸検討を行い、水冷式の双ロールの表面でスラグを連続的に板状に凝固させる新プロセスを開発した<sup>2,3)</sup>。また、この板状の凝固スラグから熱回収を行う際の熱回収効率に関しても実験的評価を行った。本プロセスの実証試験として、2010～2011 年度にかけて JFE スチール千葉地区にパイロット設備を建設し、実際

に製鋼工場から排出される熔融スラグを用いたパイロット試験を実施した。COURSE50 の Step1 開発期間における成果として、当該パイロット試験により熔融スラグを双ロール方式にて板厚 7 mm 程度で連続凝固処理が可能であることと、140℃以上の熱回収ガスを熔融スラグ保有熱に対して 30%以上の効率にて熱回収可能であることをそれぞれ確認した<sup>4)</sup>。2013 年度以降、COURSE50 の Step2 開発では、本プロセスを実機設備化する上での技術課題として、スラグ処理能力の拡大、スラグ品質評価および回収熱利用システムについての検討を実施した。

## 2. 製鋼スラグ顕熱回収パイロット試験計画

### 2.1 パイロット設備の概要

本プロジェクトにおいて建設したスラグ顕熱回収パイロット設備は、双ロール式スラグ連続凝固設備 (以下「双ロール設備」) とスラグ顕熱回収設備 (以下「熱回収設備」) から構成される。本パイロット設備全体の概略を **図 1**、双ロール設備の外観を **写真 1**、熱回収設備の外観を **写真 2** に示す。**表 1** は本パイロット設備の設備仕様である。双ロール設備は、外向きに回転しながらロール表面で連続的にスラグを凝固

2017 年 3 月 24 日受付

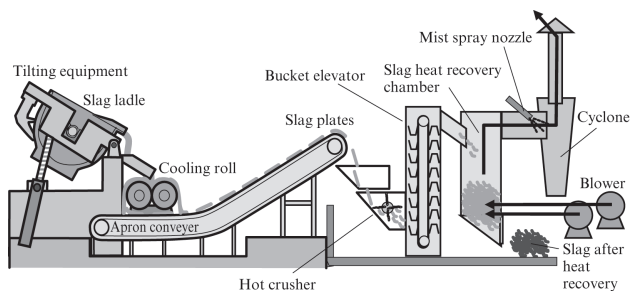


図1 COURSE50 スラグ顕熱回収パイロット設備の概略図

Fig. 1 Schematic drawing of the COURSE50 slag heat recovery pilot plant



写真1 双ロール式スラグ連続凝固設備

Photo 1 Exterior of the twin roll type continuous slag solidification pilot plant



写真2 スラグ顕熱回収設備

Photo 2 Exterior of the slag heat recovery pilot plant

させる2つの水冷ロールと、水冷ロール表面上に熔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、および凝固スラグを搬送するエプロンコンベアから構成される。スラグ鍋傾転装置は、実際の工場で使用されているスラグ鍋を設置できるように設計した。本実験の対象スラグとしては、クロム鉱石熔融還元炉スラグを用いた。凝固スラグの搬送を行うエプロンコンベアの先端直下にはスライド式シュートを設けており、凝固スラグの一部を熱間破碎機に取り込

表1 パイロット設備の仕様

Table 1 Specifications of the pilot plant

Equipment		Specifications	
Twin-roll plant	Cooling roll	Dimensions	$\phi 1.6 \text{ m} \times \text{W}1.5 \text{ m}$
		Number of rolls	2
		Material	Cu
		Rotation speed	Max. 20 rpm
		Cooling water flow rate	125-130 $\text{m}^3/\text{h}/\text{roll}$
	Ladle tilting machine	Tilting speed	Max. 6.5°/min
		Load	Max. 140 t
	Conveyer	Dimensions	W1.3 m $\times$ L14.5 m
		Lifting height	5.5 m
		Speed	25 m/min
Material		SUS304	
Slag heat recovery plant	Crusher	Capacity	1.0 t/min
	Bucket elevator	Transport capacity (Slag charging rate)	1.0 t/min
		Heat recovery chamber	Chamber size
	Blower	Capacity	Max. 6 t
		Gas flow rate	Max. 6 000 $\text{Nm}^3/\text{h}$
		Motor	75 kW
		Number of blowers	2
Cyclone	Size	$\phi 2.2 \text{ m} \times \text{H}7.5 \text{ m}$	

で破碎した後、バケットエレベーターで垂直搬送して熱回収設備へ連続的に装入する。スラグを板状に凝固成形しているため、搬送時間が長いと放熱ロスによりスラグ温度が低下するが、バケットエレベーターを用いて熱間破碎機から約25sという短時間で熱回収設備まで搬送することでスラグの温度低下を抑制している。操作室からは双ロール設備における水冷ロール間への熔融スラグ供給状況を直接確認しながらスラグ鍋傾転速度の調整を行うことができる。熱回収設備は、双ロール設備からの凝固スラグ供給状況に応じて遠隔操作により運転する。本設備は凝固スラグからの熱回収効率評価を目的として設備設計されており、回収した熱を利用するための設備は設けていないため、回収ガスは散水冷却および除塵を行った後に大気放散する。

## 2.2 設備耐熱性向上による処理量の増加

次に、パイロット設備におけるスラグ装入量増加のため、双ロール設備および熱回収設備における長時間運転を想定した各種熱負荷対策を行った。表2に、今回パイロット設備において実施した熱負荷対策を示す。双ロール設備における連続運転時の課題は、スラグ連続処理時の水冷ロールおよびスラグ搬送コンベアの耐熱性である。水冷ロールに

表2 パイロット設備の熱負荷対策

Table 2 Plant modifications to reduce the effect of thermal load

Equipment		Reduction of thermal load
Twin-roll plant	Cooling roll	Optimum designing of coolant channels
	Conveyer	Optimization of clearances Modification of conveyer aprons
Slag heat recovery plant	Sliding chute	Placing heat-resistant liners
	Bucket elevator	Installation of spray water cooling
	Heat recovery chamber	Reinforcement of inner walls

については、ロール全体の冷却水流量を 125 t/h、銅ロール外筒と SUS 製中子との隙間を 2.5 mm とし、冷却水流路 2 系統を有する 2 重スパイラル型にて設計しており、ロールの熱膨張による水冷能力の低下を抑えてスラグ連続処理を可能としている。スラグ搬送コンベアについては、パイロット設備の立上げ当初は、連続運転時のコンベアエプロン温度上昇により、過負荷停止やスラグ剥離性悪化などの問題が生じていた。そのため、搬送ローラー周辺のクリアランスをコンベアの熱膨張を考慮した広めの設計に変更すると共に、スラグが剥離し易いコンベアエプロン形状への変更を行った。その結果、長時間の連続運転時においても高温の凝固スラグを安定して搬送する事が可能となった。パイロット設備立上げ当初、双ロール設備のスラグ連続処理量は 5 t-slag/ch であったが、上記設備改良により、最終的に目標スラグ処理量 20 t-slag/ch を上回る 29 t-slag/ch まで連続処理ができるようになった。

熱回収設備については、スラグ搬送コンベア出側のスライド式シュートへの耐熱ライナー設置やバケットエレベーターの戻りバケット散水冷却による温度上昇抑制など、連続運転時における搬送系の熱負荷低減を図った。また、熱回収設備本体における内壁の熱変形を抑制するための補強も実施した。熱回収設備の耐熱性改善と、双ロール設備からのスラグ供給安定化によって、スラグ充填高さ 2 m 以上(充填量 4.8 t-slag/ch 以上) までスラグを充填した熱回収試験を実施できるようになった。図 2 に、1 次元充填層伝熱モデル<sup>4)</sup>を用いて計算した、本パイロット設備における熱回収設備のスラグ装入量と熱回収率との関係を示す。図中右下に計算条件を示す。スラグや熱回収ガス(空気)の物性値は、実測値および文献値を使用した。計算結果は右上がりのカーブとなっており、スラグ装入量の増加につれて熱回収率の増加が期待できる。

### 3. 製鋼スラグ顕熱回収パイロット試験

#### 3.1 パイロット試験条件

表 3 に、本パイロット設備にて実施した代表的なパイロ

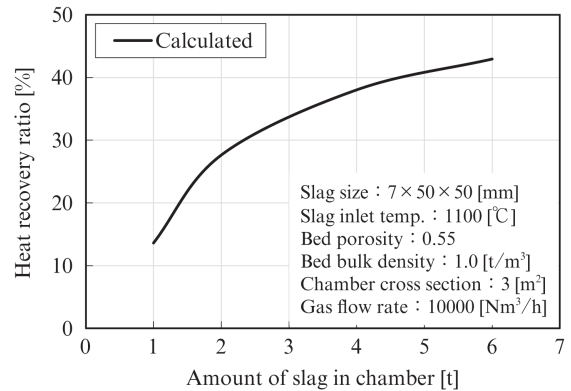


図2 熱回収設備のスラグ装入量と熱回収率

Fig. 2 Relationship between slag amount and heat recovery ratio in slag heat recovery chamber

ット試験条件の 2 ケース (Test1, Test2) を示す。それぞれ熱回収設備へのスラグ充填量を変化させて試験を実施した。スラグ鍋の傾転速度は、スラグ流出状況および冷却ロールへの巻き上がり状況を見ながら調整を行った。双ロール設備の冷却ロール回転速度は、溶融スラグが最も安定して冷却ロールに巻き上がる 10 rpm に設定し、ロール回転速度、平均凝固厚、およびスラグ巻き付き幅から求まるスラグ処理量が約 1.0 t-slag/h となるように制御した。

#### 3.2 パイロット試験結果

##### 3.2.1 スラグ顕熱回収パイロット試験結果

写真 3 に、双ロール設備の運転状況を示す。スラグ鍋からスラグ樋を介してロール間に供給される溶融スラグは、外向きに回転するロール表面にて急速に冷却されながらロール表面を巻き上がり、連続的に板状の凝固スラグが製造される。自重によりロール表面から剥離した凝固スラグは、ロール直下に設けたスラグ搬送コンベアにて熱回収設備へ搬送した。スラグ表面温度は、ロール上で凝固する際に約 200°C 低下するが、コンベア上では温度低下が小さくほぼ一定温度に保持された。コンベア末端でのスラグ表面温度は 1000°C 以上であった。

写真 4 に、熱回収設備の運転状況を示す。スラグ搬送コ

表 3 製鋼スラグ顕熱回収パイロット試験条件

Table 3 Operating conditions of the slag heat recovery pilot test

Equipment	Operating conditions	Test1	Test2
Twin-roll plant	Ladle tilting speed [mm/s]	0.8	1.0
	Rotation speed of cooling rolls [rpm]	10	10
	Cooling water flow rate [t/h/roll]	125	125
	Conveyer speed [m/min]	25	25
Slag heat recovery plant	Amount of slag charged [t]	1.7	4.8
	Slag packing height [m]	0.9	2
	Gas flow rate [Nm <sup>3</sup> /h]	6 000	7 200



写真3 双ロール設備の運転状況  
Photo 3 Operation of twin-roll plant



写真4 熱回収設備の運転状況  
Photo 4 Operation of slag heat recovery plant

ンベア末端において落下した赤熱状態の凝固スラグは、そのまま熱間破碎機にて破碎してバケットエレベーターにて上方へ搬送した。図3は、熱回収設備上部にあるスラグ装入口にて測定したスラグ表面温度のサーモビューア画像である。熱回収設備への装入時のスラグ表面温度は、破碎状況等によりばらつきを有するが、常時1000℃以上の高温を保持しており、スラグ搬送時の温度低下は小さいことが分かる。図4は、熱回収設備におけるスラグ充填量と熱回収ガス温度の履歴である。本パイロット試験における熱回収設備の運転は、スラグ連続装入・連続排出は行わずにスラグを充填したままバッチ運転にて熱回収を行っている。そのため、熱回収初期に高温のガスが回収され、徐々にスラグが冷却されると共に回収ガス温度が低下する。本プロセスは、

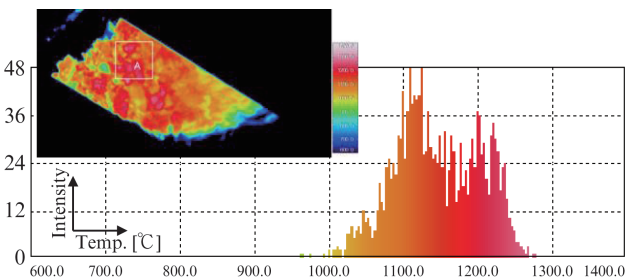


図3 熱回収設備スラグ装入口でのスラグ表面温度  
Fig. 3 Slag surface temperature at the inlet hole of the slag heat recovery chamber

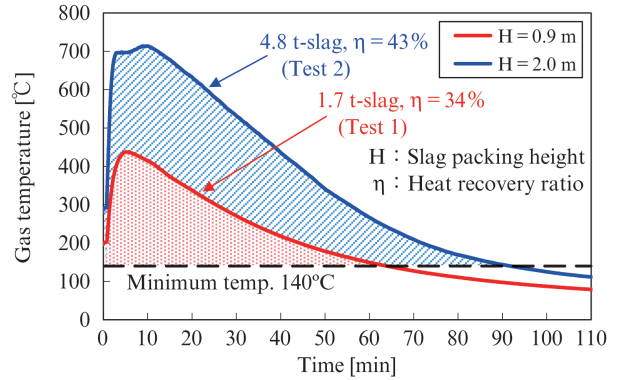


図4 スラグ充填量と熱回収ガス温度履歴  
Fig. 4 Relationship between slag amount in the chamber and gas temperature profile

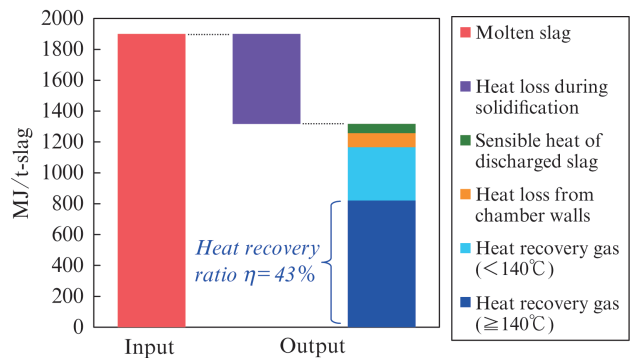


図5 熱回収設備ヒートバランス (Test2)  
Fig. 5 Heat balance of slag heat recovery plant (Test2)

将来的には熱交換器と組み合わせた熱回収ガス循環利用を想定しており、熱回収ガス戻り温度を140℃と設定している。そのため、図4の140℃の横線と熱回収ガス温度測定値に囲まれた部分の熱が有効回収熱量として回収利用される。図の結果より、スラグ装入量増加によって回収ガスが高温化して熱回収率が増加している。図5は、表2のTest2パイロット試験結果に基づく熱回収設備のヒートバランスである。左端の棒グラフは、双ロール設備で凝固成形する前の熔融スラグの熱量である。双ロール設備では熔融スラグを水冷ロールで急冷凝固させるため、スラグ連続凝固処理時の熱ロスを除いた右端の棒グラフが熱回収設備で回収可能な熱に相当する。内訳は、熱回収ガスの熱量が大半を占めており、残りは熱回収設備本体のヒートロスおよび熱回収後スラグの残熱である。熱回収設備本体は厚さ100mmの断熱材にて断熱を行っているため、回収熱に対するヒートロスの割合は小さい。熱回収ガスのうち140℃以上の有効回収熱量は、図の熱バランスより熔融スラグ熱量に対して43%であった。

### 3.2.2 熱回収後の凝固スラグ形状

双ロール設備におけるロール回転速度とスラグ凝固厚との関係を図6に示す。ロール回転速度の増加と共にスラグ凝固厚は低下する傾向があり、スラグが最も安定的に巻き上がるロール回転速度10rpmでのスラグ凝固厚は約7mm

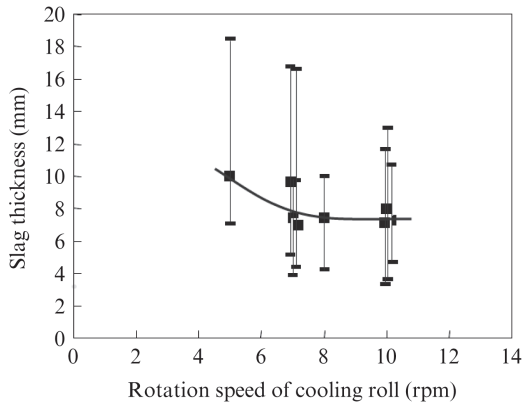


図6 双ロール設備におけるロール周速とスラグ凝固厚

Fig. 6 Relationship between rotation speed of cooling rolls and slag thickness after solidification by twin-roll plant



写真5 熱回収後スラグ

Photo 5 Discharged slag after heat recovery

であった。**写真5**は、熱回収設備の下部から排出した熱回収後スラグの写真である。熱回収後スラグも板形状を保持していた。当該スラグは1200℃の高温保持条件下においても高い引張強度を有するため、今回の凝固スラグ温度およびスラグ充填高さにおいても熱回収設備内部で充填圧によるスラグ圧壊は生じなかった。また、本熱回収設備は、スラグ形状から予測される充填層流動化限界ガス流速10 m/sよりも小さいガス流速にて熱回収を行っているため、スラグ流

動化に伴うスラグ同士の衝突に起因した微粉化も抑制されている。

#### 4. おわりに

COURSE50のフェーズ1, Step2開発期間では、Step1開発期間において建設した製鋼スラグ顕熱回収パイロット設備のスラグ処理能力拡大のための諸改善を行った。双ロール設備による溶融スラグの連続凝固処理については、スラグ搬送コンベア等の改造によりスラグ処理量増加時の安定操業を実現し、パイロット設備にて29 t-slag/chの連続処理を達成した。熱回収設備については、双ロール設備から供給された板状の凝固スラグ4.8 tを充填した後に熱回収を行い、本プロジェクト目標であった溶融スラグ保有熱に対する熱回収率30%を上回る熱回収率43%を達成した。

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「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) Tonomura, S. Energy Procedia. 2013, 37, p. 7160-7167.
- 2) Tobo, H.; Ta, Y.; Kuwayama, M.; Hagio, Y.; Yabuta, K.; Tozawa, H.; Tanaka, T.; Morita, K.; Matsuura, H.; Tsukihashi, F. Tetsu-to-Hagané. 2013, 99, 12, p. 683-692.
- 3) Tobo, H.; Shigaki, N.; Hagio, Y. JFE Technical Report. 2014, no. 19, p. 126-132.
- 4) Shigaki, N.; Tobo, H.; Ozawa, S.; Ta, Y.; Hagiwara, K. ISIJ Int. 2015, 55, 10, p. 2258-2265.



紫垣 伸行



田 恵太



鷲見 郁宏