

低吸水率高炉スラグ粗骨材製造プロセスの開発

Development of Manufacturing Process of Blast Furnace Slag Coarse Aggregate with Low Absorption

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)
當房 博幸 TOBO Hiroyuki JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員 (部長)・博士 (工学)
渡辺 圭児 WATANABE Keiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長・博士 (工学)

要旨

従来の高炉スラグ粗骨材は多孔質であるため、吸水率が高く、コンクリート粗骨材として使用する場合、水分管理が困難である。JFE スチールでは、吸水率を天然骨材と同等の1%以下にするために、高炉スラグ連続凝固プロセス PACSS[®] (Pan type continuous slag solidification) を開発した。本プロセスでは、高炉熔融スラグを鋳型に20~30 mm の厚みで流し込み、凝固させる。スラグ中からガスが発生、成長する前に凝固でき、スラグ中の気孔を低減できる。パイロット設備を建設し、吸水率1%以下の高炉スラグ粗骨材を製造できた。

Abstract:

Due to the high porosity of blast furnace slag coarse aggregate (BFG), it is difficult to control the water content of the concrete where the BFG is used. JFE steel has been developing a pan type continuous slag solidification (PACSSTM) process to reduce water absorption ratio of BFG under 1%. In this process, molten slag is poured into mold, and the slag is solidified at the thickness of 20 mm to 30 mm before the gas in the slag is generated and produced. The process results in the reduction of the porosity of slag. A pilot plant was constructed, and production of BFG under 1% became possible using this plant.

1. はじめに

従来の高炉スラグ粗骨材は多孔質であるため、吸水率が4%程度と高く、コンクリートへ配合する際の骨材の水分管理が非常に困難である。粗骨材に高炉スラグ粗骨材を100%使用したコンクリートでは、ポンプ圧送時に途中で配管が詰まり、圧送できないという報告もあり¹⁾、高炉スラグはJIS A 5011 コンクリート用スラグ骨材という規格があるもののあまり普及していない。ただし、現状の粗骨材市場は天然資源に頼っており、将来、良質な天然骨材が枯渇する問題や碎石の採掘による環境破壊を防止する観点から、鉄鋼スラグを原料とした人工粗骨材を製造する意義は大きい。

JFE スチールでは、高炉スラグ粗骨材の吸水率を天然骨材と同等の1%以下にするため、高炉スラグ連続凝固プロセス PACSS[®] (Pan type continuous slag solidification) を開発した²⁾。本プロセスは、高炉熔融スラグを鋳型に20 mm~30 mm の厚みで流し込み、スラグ中からガスが発生、成長する前に凝固させ、スラグ中の気孔を低減させる³⁾。

本報では、実用規模のパイロット設備を建設し、熔融高炉スラグを連続的に凝固させ、板状の凝固スラグを大量製造した結果について報告する。また、製造した板状凝固ス

ラグを破碎して高炉スラグ粗骨材の粒度に作り込み、その品質評価した結果についても報告する。

2. PACSS[®]の開発

2.1 PACSS[®]パイロット設備の概要

PACSSパイロット設備の概要を図1に、設備仕様を表1に示す。台車上に円形に50枚配置した鋳型と凝固したスラグを回収するスラグピット、鋳型を散水冷却する冷却ノズルユニットから構成される。鋳型は台形状で上底0.66 m、下底1.0 m、長さ2.7 m×深さ0.1 mとした。1周3 minで移動し、スラグ流量は約2 t/minでスラグの凝固厚みが20~30 mmとなるように設計した。鋳型上に流し込んだスラグは、2分間冷却され板状に凝固し、鋳型を反転してスラグピットに落下させる。反転した鋳型は冷却システムにより冷却される。冷却後の鋳型は自然乾燥させ次の熔融スラグを受ける。本設備では5~6周でスラグ鍋1杯約30 tを1度に処理する。

2.2 散水冷却システムの設計

最適な散水冷却システムを検討するために、散水ノズルの選定を行った。使用したノズルの仕様を表2に示す。Nozzle Aは流量密度が高く、短手方向が9°、長手方向が

2017年5月29日受付

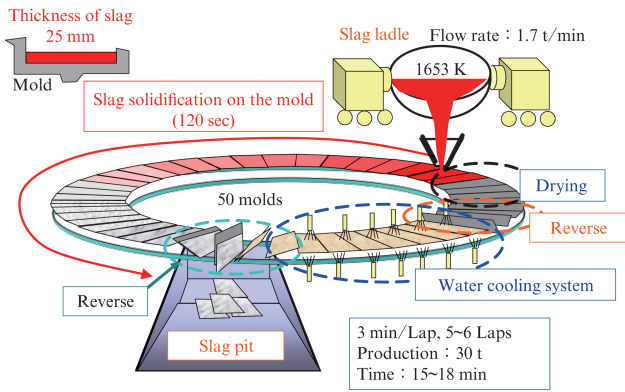


図1 PACSS[®]パイロット設備概要

Fig. 1 Schematic drawing of PACSS[™] pilot plant

表1 PACSS[®]パイロット設備仕様
Table 1 Specifications of PACSS[™] pilot plant

Dimensions of mold	W (0.66 m × 1.0 m) × L2.7 m Depth 0.1 m
Number of mold	50
Mold material	SC450
Mold weight	1 280 kg

表2 ノズルの仕様
Table 2 Specification of Nozzle

	Water flow rate L/min/m ²	Angle of spray
Nozzle A	343	60°, 90°
Nozzle B	62	65°

60°と楕円形に広がる狭い範囲を冷却するタイプのノズルであり、Nozzle Bは流量密度が低く、65°の広範囲の円形に広がるタイプのノズルである。

各ノズルの冷却能力を調査するため、鋼材を散水する際の温度測定を行った。実験方法を図2に示す。電気炉で400℃に熱したSC450のプレート(150×150×56)に対して散水し、時間当たりの温度の低下から熱伝達係数を求めた。温度測定は、SC450のプレートの深さ2mmの位置に、熱電対をセットして行った。

鋼材の表面温度と各ノズルの熱伝達係数の関係を図3に示す。Nozzle Aは熱伝達係数が高く、300℃で20 000 W/m²/℃であった。一方、Nozzle Bは200℃付近で10 000 W/m²/℃以下となり、300℃以上では、5 000 W/m²/℃以下であった。

本実験結果を基に設計した散水冷却システムの概略図を図4に示す。散水冷却は7個のノズルユニットから成り、最初の2本は、Nozzle Aを鋳型下方のみに配置し、3本目以降にNozzle Bを鋳型の上下に配置した。ノズル配置の考え方は、スラグを排出した鋳型の表面温度が300℃以上になることが想定されることや屋外にパイロット設備を設置する

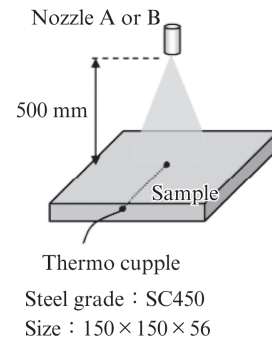


図2 冷却能力測定方法

Fig. 2 Measurement of water-cooling capacity

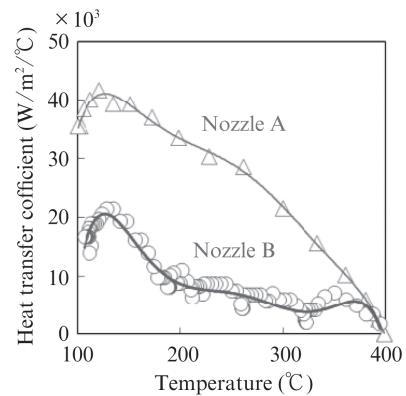


図3 鋼材の表面温度と熱伝達係数の関係

Fig. 3 Relationship between surface temperature of Steel plate and heat transfer coefficient

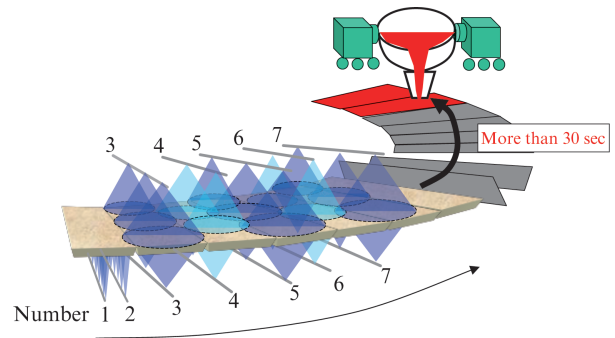


図4 散水冷却システムの概略図

Fig. 4 Schematic drawing of water-cooling system

ために、鋳型が錆びることが懸念され、最初に冷却能力を高めて、鋳型表面温度を下げた後に、均一に鋳型を冷却することを考慮した。散水後の鋳型を次の溶融スラグを受けるまでに十分乾燥できるように、散水終了から溶融スラグを受けるまでの時間を30秒以上とした。

パイロット設備には、鋳型の回転軸となる梁などの散水に対して障害となるものが存在するため、散水状況をパイロット設備の設計図面から3D-CADを用いて再現した。設計した散水冷却システムにおいて、ノズルユニットを地面に垂直

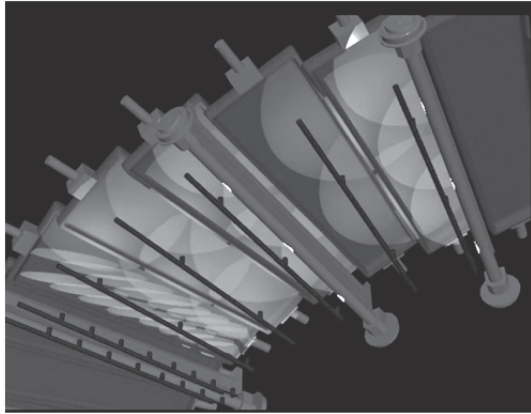


図5 散水冷却システムの3D-CAD
Fig. 5 3D-CAD of water cooling system



写真2 PACSS[®]パイロット実験状況
Photo 2 PACSS[™] pilot plant experiment

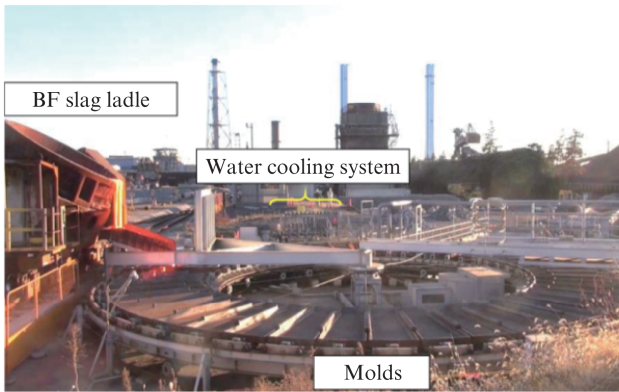


写真1 PACSS[®]パイロット設備
Photo 1 PACSS[™] pilot plant



写真3 板状凝固スラグ
Photo 3 Plate-like solidified slags

に設置した状態を3D-CADによって解析した一例を図5に示す。散水は光で表現した。ノズルユニットを数十度傾けた状態も試行したが、ノズルユニットを地面に垂直に設置したときが最も散水への干渉が少ないことがわかった。

2.3 PACSS[®]パイロット設備の実験結果

PACSS[®]パイロット設備を写真1に示す。パイロット設備による実験は、以下の手順で行った。高炉からの運搬中に高炉スラグ鍋の表面を覆う凝固したスラグを重機で割り、高炉スラグ鍋の鍋口がパイロット設備のスラグ樋の正面に来るように配置した。スラグ流量が一定になるようスラグ鍋を傾転させ、スラグ樋を介して溶融スラグを鑄型に供給した。写真2にパイロット実験の状況を示す。溶融スラグが鑄型上で広がっている様子が確認できた。その後、凝固したスラグを鑄型で搬送し、スラグピットに落下させた。鑄型は散水または放冷させた後に溶融スラグを再び注入した。写真3にスラグピット内の凝固スラグを示す。凝固スラグは鑄型上では、大気と接触している面と鑄型と接触している面から冷えるため、スラグピット落下直後では、スラグ内部は赤く、一部未凝固となっていた。パイロット実験1鍋あたり板状凝

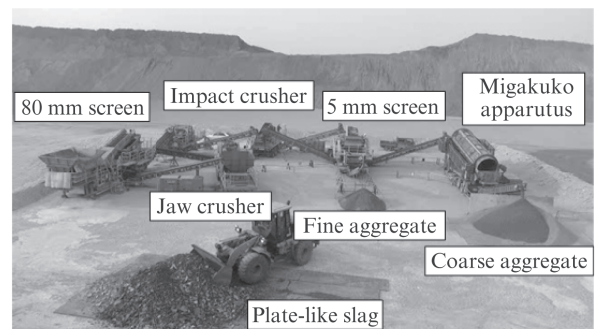


写真4 移動式破砕プラント
Photo 4 Mobile crushing plant

固スラグ約30tを製造し、約410t製造した。

移動式破砕プラントを写真4に示す。本プラントは80mmスクリーン、インパクトクラッシャー、5mmスクリーン、磨鉱機から構成される。破砕は以下の手順で行った。板状凝固スラグを80mmのスクリーンに入れ、+80mmはジョークラッシャーで破砕し、-80mmにした。-80mmの板状凝固スラグはインパクトクラッシャーに入れて破砕し、25mm以下になるまで破砕した。その後、5mmスクリー

ンで 5 mm 未満の破碎スラグは細骨材とし、5 mm 以上は磨
 鋳機を通して粗骨材として分離回収した。粗骨材を写
 真 5 に示す。天然石と変わらない外観を示していた。
 粗骨材と細骨材の製造量を表 3 に示す。約 410 t の凝固ス



写真 5 低吸水率高炉スラグ粗骨材
 Photo 5 BFG with low water absorption

表 3 粗骨材と細骨材量
 Table 3 Quantity of BFG and fine aggregate

Course aggregate	Fine aggregate
351 t (86%)	57 t (14%)

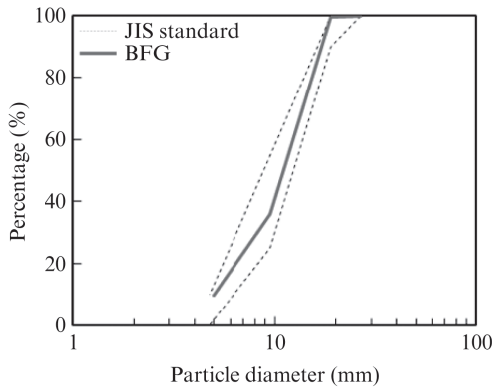


図 6 低吸水率高炉スラグ粗骨材の粒度分布
 Fig. 6 Particle distribution of BFG

ラグ板を破碎すると、粗骨材は 351 t 製造でき、粗骨材の歩
 留は 86%であった。
 粗骨材の粒度分布を図 6 に示す。本開発品は JIS 規格の
 粒度範囲内におさまっていた。

2.4 低吸水率高炉スラグ粗骨材品質

低吸水率高炉スラグ粗骨材の化学成分を表 4 に示す。JIS
 規格に規定された成分すべて基準値の範囲内であった。
 低吸水率高炉スラグ粗骨材の品質評価として、絶乾密度、
 表乾密度、吸水率、単位容積質量、微粒分量、すり減り減量、
 粒形判定実積率を測定した。結果を石灰石の結果と合わせ
 て、表 5 に示す。開発した低吸水率高炉スラグ粗骨材は吸
 水率 0.73% であり、目標の 1% 以下を達成できた。また、低
 吸水率高炉スラグ粗骨材のすりへり減量は 11.8% と低く、耐
 摩耗性に優れていた。

高炉スラグ粗骨材は JIS 規格により環境安全品質基準が定
 められており、溶出は JIS K 0058-1、含有は JIS K 0058-2 を
 準拠して測定した。結果をそれぞれ表 6、7 に示す。溶出、
 含有ともに JIS 規格を満たしていた。

2.5 実験中の鑄型の冷却結果

パイロット設備の鑄型の温度管理をするために、パイロッ
 ト実験中の鑄型の温度履歴のシミュレーションとして、非定
 常一次元伝熱解析を行った。熔融スラグ温度を 1380℃ とし、
 鑄型の初期温度を 20℃ とした。1 サイクルは 180 sec で、0~
 120 sec は鑄型上でスラグが冷却され、120~180 sec は鑄型
 が水冷または空冷される。パイロット実験の操業はこのサイ
 クルを 6 サイクル繰り返す。温度の実測は、各位置に放射
 温度計を配置して測定した。パイロット設備の鑄型の温度
 変化の計算結果および実測値を図 7 に示す。Slag side が鑄

表 4 高炉スラグ粗骨材の化学成分
 Table 4 Chemical composition of BFG

	CaO	SiO ₂	T.S	SO ₃	FeO
Composition (%)	41.6	34.5	0.74	0.11	0.04
JIS standard	≤45.0	—	≤2.0	≤0.5	≤3.0

表 5 高炉スラグ粗骨材と石灰石粗骨材の品質比較
 Table 5 Comparison of quality of BFG and limestone aggregate

	BFG	JIS standard	Limestone	JIS standard
Density in saturated surface dry condition (g/cm ³)	2.83	—	2.69	—
Density in absolutely dry condition (g/cm ³)	2.82	≥2.4	2.68	≥2.5
Water absorption (%)	0.73	≤4.0	0.30	≤3.0
Bulk density (kg/L)	1.72	≥1.35	1.66	—
Amount of material passing test sieve 75 μm (%)	0.20	<5.0	2.30	<5.0
Amount of abrasion loss (%)	11.8	≤35	18.3	≤35
Solid volume percentage for shape determination (%)	61.2	—	61.6	—

表6 高炉スラグ粗骨材の溶出試験結果

Table 6 Elution of BFG

	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	Hg	As	Se	F	B
Elution (mg/L)	<0.005	<0.001	<0.01	<0.0005	<0.002	<0.002	0.09	0.03
JIS standard (mg/L)	≦0.01	≦0.01	≦0.05	≦0.0005	≦0.01	≦0.01	≦0.8	≦1

表7 高炉スラグ粗骨材の含有試験

Table 7 Content of BFG

	Cd	Pb	Cr ⁶⁺	Hg	As	Se	F	B
Content (mg/kg)	<10	<10	<10	<1	<10	<10	500	67
JIS standard (mg/kg)	≦150	≦150	≦250	≦15	≦150	≦150	≦4 000	≦4 000

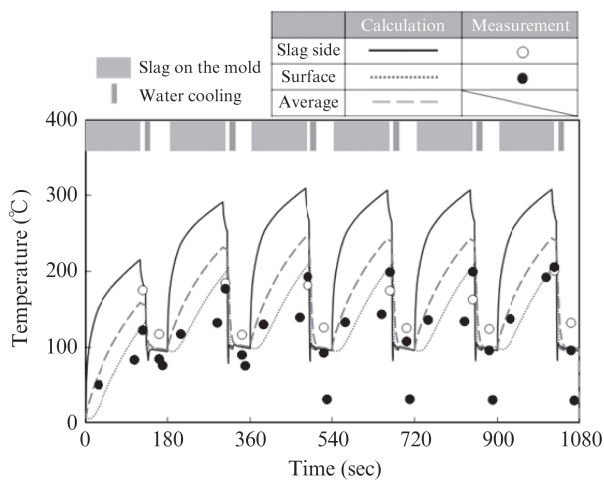


図7 パイロット設備の鋳型の温度変化

Fig. 7 Mold temperature in the pilot plant

型上にスラグが乗っている面の温度，Surface が鋳型の背面の温度である。図より実験中の鋳型の温度変化を非定常1次元伝熱解析でほぼ推測できた。1サイクル目で鋳型の表面温度は200°Cを超え，2サイクル目には，鋳型の表面温度は300°Cを超えると推定された。しかし，適切な散水冷却を実施することにより鋳型の表面温度を鋳型が変形しない目安である約300°C以下に制御できた。

3. おわりに

高炉スラグ連続凝固プロセス PACSS[®]を開発し，パイロット設備を建設した。パイロット設備を用いて，吸水率1%以下の高炉スラグ粗骨材を製造できた。高炉スラグ粗骨材の各品質評価を行い，良好な結果が得られた。また，鋳型冷却の設計も行い，最適な散水冷却システムを提案できた。

参考文献

- 1) 福田聡之，上原義和，吉田英信，中 博明，片桐健詞. 高炉スラグ粗骨材を用いたコンクリートの火力発電所土木設備への適用について(その1) —基本特性と適用実績について—. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 2002, vol. 55, no. 5, p. 858-859.
- 2) 當房博幸，田 恵太，渡辺圭児，萩尾勇樹. 高炉スラグ連続凝固設備による低吸水率骨材の製造. CAMP-ISIJ. 2014, vol. 27, p. 704.
- 3) 當房博幸，宮本陽子，渡辺圭児，桑山道弘，小澤達也，田中敏宏. 鉄と鋼. 2013, vol. 99, p. 532.



田 恵太



當房 博幸



渡辺 圭児