

硬質水砕スラグ製造設備の開発

Development of Slag Sand Manufacturing Plant

田中 秀幸*
Hideyuki Tanaka

青木 幹男**
Mikio Aoki

竹林 清吉***
Seikichi Takebayashi

荒谷 復夫****
Fukuo Aratani

石原 甫*****
Hajime Ishihara

花水 巖*****
Iwao Hanamizu

馬場 利治*****
Toshiharu Baba

山田 孝雄*****
Takao Yamada

Synopsis:

With natural sand getting short and the drive for preservation of nature turning active in recent years, blast furnace slag has been expanding its status as a possible effective resource for concrete aggregate.

After some two years' R & D effort for developing a sufficient concrete aggregate from blast furnace slag, Mizushima Works of Kawasaki Steel Corp. succeeded in a pilot plant operation where molten slag is cooled to a preset temperature with KN-type slag cooler, and then granulated using the conventional granulation process.

In March 1979, the plant was placed in an industrial scale operation, directly connected to the molten slag runner of No. 2 blast furnace, making a smooth production of slag sand ever since.

1. 緒 言

近年、各製鉄所において鉄鋼スラグの有効利用が積極的にすすめられている。その中でも高炉スラグを従来の徐冷スラグに代えて水砕スラグ化する製鉄所が急激に増えている。水砕スラグはおもにセメント原料として利用され、スラグの附加価値を高めているが、セメント原料向のみでは、その需要に限界があり、さらに新しい用途としてコンクリート用細骨材が注目されている。その背景として従来より細骨材として使用されている天然

砂はしだいに枯渇しつつあるうえに環境保全や海砂の塩分による腐蝕の問題などが加わり、これに代わる人工砂の出現が要請されてきた。

しかしながら、通常の水砕スラグは発泡現象により比重の小さい多孔質の粒子となり細骨材に適していない。

筆者らは(株)水田製作所と共同で昭和52年よりこの欠点を解消した緻密な硬質水砕スラグの製造技術の開発に取組み、基礎的研究、パイロットプラントによる実験を経てKN式溶融スラグ冷却法による硬質化の可能性を確認し、昭和54年3月水島第2高炉に実機を設置した。

* 水島製鉄所企画部設計室主査(掛長待遇)

*** 水島製鉄所企画部設計室

***** 水島製鉄所企画部設計室主査(課長待遇)

***** 水島製鉄所企画部企画室主査(課長待遇)

[昭和54年12月28日原稿受付]

** 水島製鉄所製鉄部スラグ加工課

**** 技術研究所水島研究室主任研究員・工博

***** 水島製鉄所製鉄部スラグ加工課課長

***** 水島製鉄所製鉄部部长

本設備はその後順調に稼動しており、ほぼ当初の目標を達成している。以下にこの間の開発経過、操業状況の概要について述べる。

2. 硬質水砕スラグ製造設備の開発経過

2・1 開発の考え方

水島製鉄所の高炉は鑄床に直結してドライヒットと軟質水砕スラグ製造設備を有し、溶さい鍋は使用していない。このため硬質水砕スラグ製造設備の開発では、下記の事項を前提として検討を進めた。

- (1) 硬質水砕スラグ製造設備は高炉鑄床と直結し、かつ高炉の出さいに伴うスラグの流量変化、温度変化に対応できること。
- (2) 既存の軟質水砕スラグ製造設備をできるだけ共用し、設備コストを下げること。
- (3) 軟硬質両水砕スラグの作り分けが可能であること。
- (4) 硬質水砕スラグに要求される品質は、コンクリート用細骨材としての使用を想定し、細骨材のJIS原案¹⁾に規定されている単位容積重量と粒度分布を満足すること。

2・2 硬質化条件の検討

高炉スラグ、およびこれを CaO-MgO-SiO_2 - Al_2O_3 系に単純化した合成スラグを、1400~1550℃の各温度から攪拌水中に注入し水砕化したとき

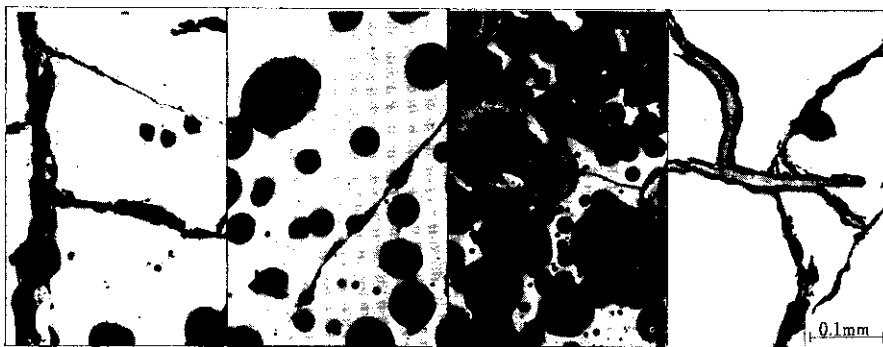
の水砕スラグの性質を Table 1 に示す。Table 1 より、高炉スラグは水砕化温度が高くなるほど嵩比重は小さく、粒度も細粒になるが、合成スラグでは、高炉スラグより嵩比重も粒径も大きく、1500℃以下では水砕化温度の影響はほとんどない。

Photo. 1 はこれら水砕スラグの顕微鏡組織であるが、高炉スラグでは水砕化温度が高くなるにつれ、粒子内に微細な気孔が増加し、発泡スラグに近づく。水砕化温度の低い場合と合成スラグの場合では、気孔は少なく熱応力によるクラックが認められるにすぎない。これは凝固時に粒子内に生成する気泡が水砕の嵩比重を大きく支配していることを示唆している。凝固時の気泡発生の原因として、従来、高炉スラグ中に含まれる N_2 の析出²⁾、スラグ中の S のガス化³⁾、およびこれら反応の H_2O 共存による活発化などの報告²⁻⁵⁾ があり、本実験でも S を含まない合成スラグでは気孔量は少なか

Table 1 Relation between slag temperature and slag quality

Slag temperature (°C)	Blast furnace slag		Synthetic slag	
	Bulk density	Screen size* (mm)	Bulk density	Screen size* (mm)
1400	1.47	0.95	1.55	0.90
1450	1.34	0.81	1.54	0.89
1500	1.22	0.75	1.53	0.83
1550	1.00	0.56	1.20	0.45

* 50% Passage



- a : Blast furnace slag, slag temperature : 1450°C
 b : Blast furnace slag, slag temperature : 1500°C
 c : Blast furnace slag, slag temperature : 1550°C
 d : Synthetic slag, slag temperature : 1500°C

Photo. 1 Microstructure of granulated slag

った。また高炉スラグで水砕化温度の低い場合に気孔が少なかったのは、スラグの粘性が高いこと、および凝固時間が短いためと考えられる。

一方、凝固時の気泡の発生を減少させる方法として冷却速度を上げる方法も考えられる。実験室に小型の水砕化装置を作り、冷却条件の影響について検討した。実験は水比2.7~18の範囲で散水条件を変更して行った。結果の一例を Fig. 1 に示す。かなり大幅な分散があるが、冷却水温度が65°C以上では発泡スラグになりやすい、また、溶さい温度が1500°Cでは冷却条件を変更しても高比重の高い水砕スラグを得ることは困難で、溶さい温度の1400°C以下への降温が必要なきことが示唆される。

2・3 溶融スラグ冷却法の検討

高炉鑄床でのスラグの降温方法として、まず、転が滓、砂、水砕スラグなどの冷材添加を試みた。しかし、最も効果があった転が滓の場合でも添加量は最大2%、そのときの温度降下は50°Cであって、冷材添加法には限界があることが認められた。これ以外に水冷回転ドラム法^{6,7)}や水冷樋法などが知られている。しかし、これらの方法では処理能力が小さく、樋つまりが生ずるなどの問題があり、いずれも当所には採用困難であった。

そこで、既設高炉に適用できて、しかも効率良い降温方法を種々検討した結果、鋼板による浸漬冷却法の開発を進めることとし、Fig. 2 に示す装置（以下KN式冷却機と記す）を考案した。これ

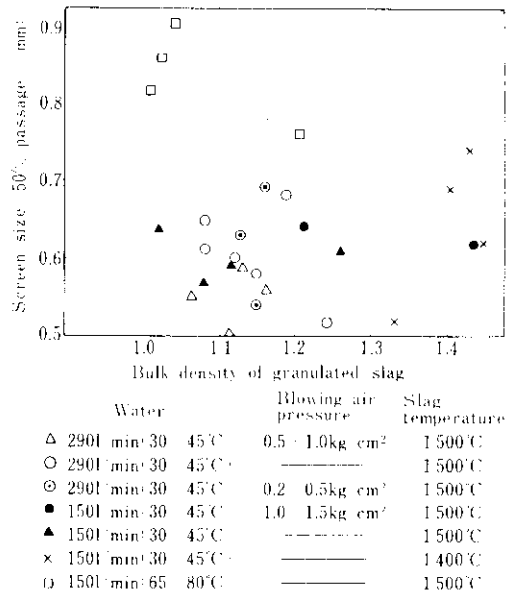


Fig. 1 Effect of cooling condition on bulk density and size of granulated slag (slag flow rate=16 kg/min)

は多数の熱交換用鋼板を一对のエンドレスチェーンで移動可能な構造としており、樋を流れる高温の溶融スラグ中に浸漬して鋼板とスラグ間の熱交換を行い、溶融スラグを降温させる方式である。

2・3・1 溶融スラグ冷却の基礎テスト

溶融スラグ中に鋼板を浸漬し、鋼板の温度上昇を測定して、鋼板の熱吸収量などを調査した。この結果、鋼板の熱吸収率は約 1.01×10^6 kcal/m²h

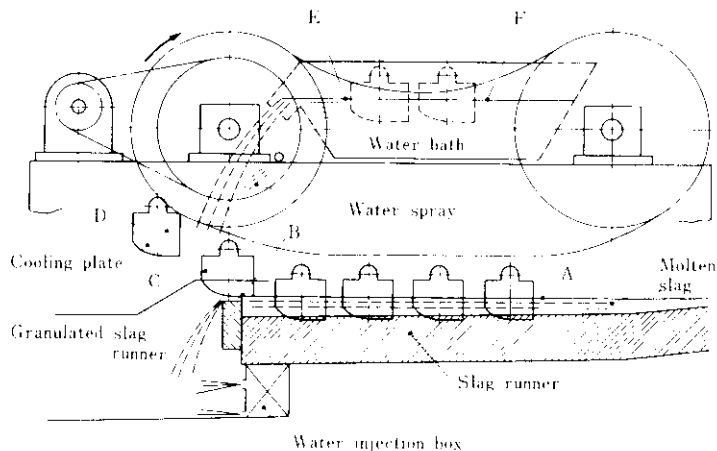


Fig. 2 KN type molten slag cooler (pilot plant)

であった。また鋼板に付着するスラグは2~5mmの厚みであって、水冷により容易に剝離しやすい黒褐色の高比重物であった。

次に、鋼板製皿に熔融スラグを入れ、鋼板とスラグの温度、凝固スラグの厚みなどを経時的に測定した。これとはほぼ同条件での鋼板とスラグの熱移動を実測値と比較しながら計算し、次の結果を得た。

- スラグの熱伝導度：1.0kcal/mh°C
- スラグの放射率：0.5
- スラグ、鋼板間の熱伝達率：1500kcal/m²h°C

2.3.2 鋼板による熔融スラグの冷却計算

(1) 計算方法

Fig. 2において、鋼板はAB間で熔融スラグに浸漬されスラグとの熱交換を行い、CD間で散水冷却、EF間で水浴中冷却、FA間で表面付着水の乾燥をうける。一方、熔融スラグはBで吹製函へ流下し、凝固スラグは鋼板に付着したままBC間でさらに降温して、Cで剝離、落下する。鋼板と熔融スラグの温度変化の計算は、極断面の2次元で行い、Fig. 3のように平面を微小格子状に分

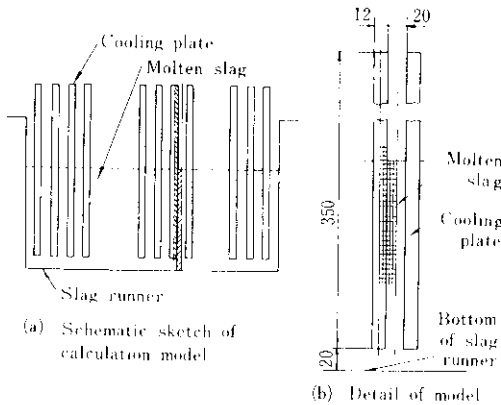


Fig. 3 Calculation model of thermal transfer

割し、差分法により行った。物性値は既知の値や前述の測定結果を用いた。スラグと冷却水の初期温度をそれぞれ1500°C、50°C、また冷却水量は、放水0.5m³/min、水槽給水3m³/minとした。

(2) 計算結果

鋼板のスラグ中への浸漬深さを200mm、AB間

長さを3.0mとしたときの定常時のスラグの降温後の平均温度をFig. 4に示した。Fig. 5には、鋼板からスラグ樋から出る直前の温度分布を図示した。Fig. 4, 5からスラグの平均温度が短時間に1300°C以下に降温することがわかる。

この計算結果によって、スラグ流量の大きな大型高炉でも、大幅なレイアウト変更を伴わずにスラグ降温を効率よく行える装置を設置できること

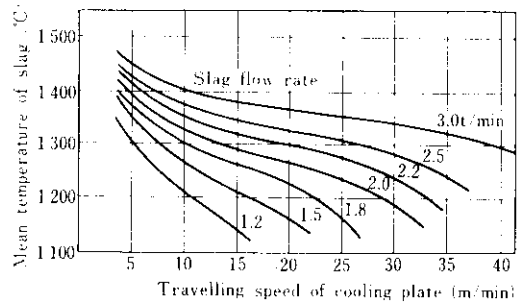


Fig. 4 Capacity of KN-type molten slag cooler (pilot plant)

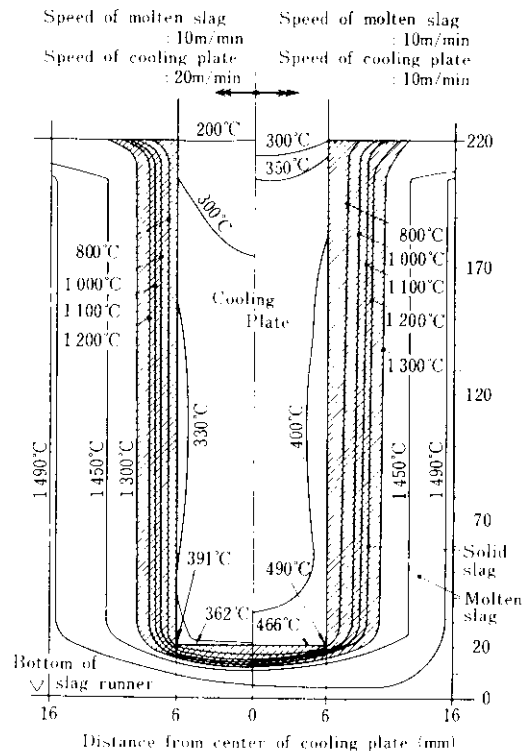


Fig. 5 Temperature distribution of slag and cooling plate

かわかった。鋼板の速度を上げていくと、スラグ平均温度は下る。また、鋼板の温度は全体平均で約100~300℃のくり返し、表面最高で500℃前後であり、鋼板が変質するまでには至らず、スラグの量と温度の変化に対し、鋼板の速度と浸漬深さをコントロールすることによって溶融スラグの降温量を制御することができる。

2.4 パイロットプラントテスト

以上の知見に基づいて、Table 2 に示す仕様のパイロットプラントを第1高炉水砕スラグ製造設

備⁸⁾直前のスラグ桶に設置し、冷却能力の確認、連続運転の可能性、製品品質の確認などを目的としてテストを行った。

本テストで得られた水砕スラグは粗粒率が高いため、JIS 原案¹⁾に示される粒度範囲に破砕粒調した。Table 3 に得られた水砕スラグの物性値(代表例)を示す。テストによって得られたデータの解析結果から以下のことが判明した。

(1) 単位容積重量 (y kg/l) と冷却後の計算スラグ温度 (x_1 °C)、および粗粒率 (x_2) との関係は

$$y = 0.000289x_1 - 0.3694x_2 - 2.717$$

Table 2 Specification of KN-type molten slag cooler (pilot plant)

Item	Specification
Type	Cooling plate travelling type
Dimension of equipment	Length : 4900mm, Width : 500mm
Cooling plate	Carbon steel, 12×450×480 (mm) (15 & 16 pieces/Pitch)×26 Pitches Dipping depth : max. 200mm, Dipping length : 3.0m (5 pitches)
Travelling speed	Cooling plate : 8~27m/min Molten slag : 5~15m/min
Motor	11kW
Cooling water flow rate	3m ³ /min, 50°C (For plate cooling, spray and bath)
Capacity	1500°C molten slag → Fine aggregate for concrete 1.8t/min

Table 3 Physical properties of slag sand (pilot plant)

No.	Slag sand	Specific gravity in dry state	Unit weight (kg/l)	Water absorption (%)	Size (mm) Passed ratio (%)							Fineness modulus	Degree of glassification (%)	Basicity CaO/SiO ₂	Slag flow rate (t/min)
					10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15				
1	Before crushing	2.45	1.41	2.04	99.4	96.8	86.5	56.9	23.2	6.6	1.9	3.28	98.7	1.18	1.2
	After crushing*	2.74	1.68	0.92	—	99.2	94.8	85.2	47.9	19.7	7.1	2.46	95.7		
2	Before crushing	2.44	1.30	3.00	100	98.0	91.4	59.8	23.2	6.5	1.8	3.19	—	1.21	1.8
	After crushing	2.64	1.57	1.26	—	100	96.8	85.9	55.4	24.7	9.5	2.23	—		
3	Before crushing	2.22	1.15	4.44	100	97.7	90.6	55.6	20.2	6.2	2.0	3.28	—	1.22	2.4
	After crushing	2.53	1.41	1.44	100	99.7	97.0	85.1	52.6	24.6	10.3	2.31	—		
JIS (plan) ¹⁾		2.5<	1.45<	2.5>	100	90	80	50	25	10	2	2.00	—	—	—
					100	100	100	90	65	35	10	3.43	—	—	—

* Crusher : Impeller breaker

で示される。

(2) このパイロットプラントは、スラグ流量 1.8 t/min 以下の場合、仕様どおり JIS 原案^{D)}の規格を満足する硬質水砕スラグを製造できた。

(3) このパイロットプラントで製造した硬質水砕スラグは、モルタル、コンクリート試験の結果、コンクリート用細骨材として十分使用できる。

(4) 鋼板の移動速度はスラグ流量との関係で適正範囲が存在する。

3. 第 2 高炉硬質水砕スラグ製造設備と操業

基礎実験、パイロット試験の結果に基づき、KN 式冷却機を実用機規模の実験機として、昭和 54 年 3 月 20 日に火入れした第 2 高炉、3 次改修に合わせて設置し、試運転および性能試験を経て、同年 7

月から本格的に硬質水砕スラグの製造を開始した。

3・1 硬質水砕スラグの製造工程

Fig. 6 に硬質水砕スラグの製造工程を示す。スキンマーで溶銑と分離された熔融スラグは、KN 式冷却機で降温された後、高圧水で吹製、粒化されて攪拌槽に入る。攪拌槽からは水砕ポンプにより脱水槽へパイプ輸送され、脱水処理されたあと原碎石としてストックヤードに運ばれる。原碎石はインパクトクラッシャーで破砕粒調され、硬質水砕スラグ製品として出荷される。このインパクトクラッシャーは破砕粒に丸味をおびさせる特殊な仕様になっている。

3・2 KN 式冷却機

Fig. 7 に第 2 高炉(3 次改修時)に設置した KN

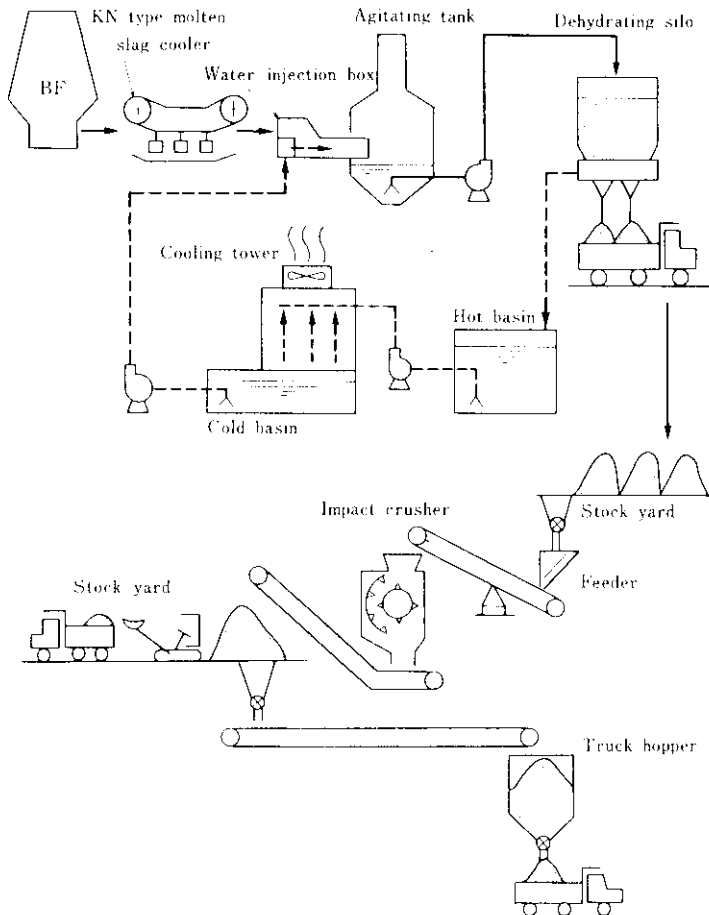


Fig. 6 Manufacturing flow of slag sand

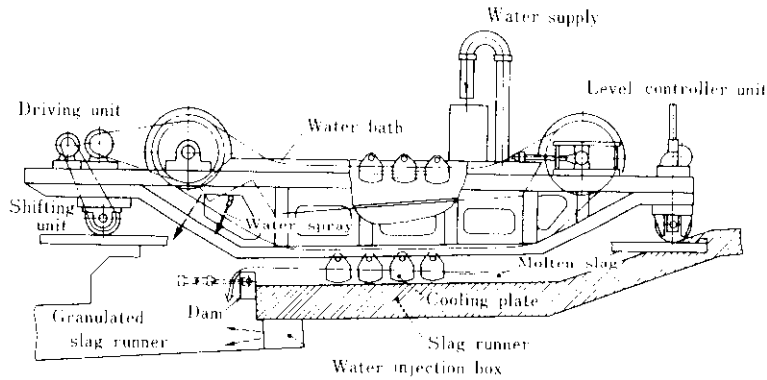


Fig. 7 KN type molten slag cooler for No. 2 BF

式冷却機の全体組立図を、Table 4 に仕様を示す。

KN 式冷却機は、冷却板移動機構、付着スラグ剝離機構、冷却板降温機構および冷却板昇降機構を有する。また、溶さい樋の先端には溶融スラグを滞留させて冷却板浸漬深さを十分とるために可動式のダム装置が取り付けられている。溶融スラグはこのスラグ樋で、その流れと同方向に移動している冷却板によって降温された後、吹製樋から噴射される圧力水で粒状化されて水砕スラグとなる。一方溶融スラグにより、約 300°C 程度に昇温した冷却板は冷却機上部に設けられた水槽中で冷却され、再び溶融スラグ中に浸漬される。溶融スラグ流から離れた直後の冷却板には凝固したスラグが付着しているが、この大部分は自然剝離し吹製樋に落下、粒状化される。自然剝離しないものは衝撃剝離機構および高圧スプレー水で強制的に剝離され、吹製樋に落下する。KN 式冷却機は自走式台車構造になっており、退避させて軟質水砕スラグを製造することもできる。

KN 式冷却機のおもな特長をあげると以下のとおりである。

- (1) 既設の軟質水砕スラグ製造設備を有する大型高炉への適用が可能である。
- (2) 硬質、軟質両水砕スラグの作り分けが容易にできる。
- (3) 溶さい樋の閉塞によるトラブルがない。
- (4) スラグの流量や温度の変動に対して冷却能の制御ができる。

3・3 操業実績

KN 式冷却機は高炉ならびに水砕スラグ製造設

Table 4 Specification of the plant (No. 2 BF)

Plant	Item	Specification
Blast furnace	Inner volume	2 857m ³
	Iron product	6 000t/d
	Slag product	1 680t/d (S.R. = 0.28)
	Number of tapping holes	3
Granulating plant	Type	Kawasaki Nagata type
	Capacity	Max. 2 500t/d 250t/tapping Nor. 3t/min, Max. 9.5t/min
	Times of slag tapping	12~18times/d
	Slag tapping time	30~100min/time
KN type M.S.C.	Number of agitating tanks	2
	Capacity	Nor. 3t/min, Max. 5t/min
	Cooling plate	Plate 12 & 19 500w×600Hmm
	Number of plates	(29+30)/2×34pitch = 1 003
	Travelling speed	10~30m/min
	Travelling motor (VS)	30kW×440V×150~1 500rpm
	Plate cooling water	4.8~8m ³ /min
Transporting equip. (shifting)	8m/min×7.5kW	
Sizing machine	Level controller	Screw jack type 600mm/35s×15kW
	Type	Impact crusher
	Capacity	110t/h
	Feed size range	F.M. 3.4~3.8
	Crushed size range	F.M. 2.5+0.15
Motor	110kW×8P×440V	

備の立上り操業が一段落した昭和 54 年 4 月より運転を開始した。以降、操業試験や部分的な改善を行いながら安定した操業を継続し、月産 6 000t 程度の硬質水砕スラグを製造している。

KN 式冷却機の能力は 5t/min であるが、高炉に直結しているため、状況によっては、能力以上のスラグ流量になることがある。このため粒調前に原碎石の軽装単位容積重量を測定して基準値以上のものを粒調し、硬質水砕スラグ製品としている。最終的には、成品ベルトコンベヤー上よりサンプリングし、全品質項目を測定、確認し品質管理には万全を期している。

4. 硬質水砕スラグの品質

Table 5 に KN 式冷却機を用いて製造した硬質水砕スラグの原碎石と粒調品（製品）および天然砂の品質と JIS 原案¹⁾を示す。粒調を行った硬質水砕スラグ製品は JIS 原案¹⁾を満足し、天然砂と同等と考えられるが、塩分含有量が非常に少ない長所がある。Fig. 8 に硬質水砕スラグの粒度分布を示す。JIS 原案¹⁾のほぼ中央に分布しているが、ユーザーの要求により粒調機を調節することによって、細粒側、粗粒側共自由に作り分けが可能である。

また KN 式冷却機を用いて製造した硬質水砕スラグのコンクリート用細骨材としての適性を確認するため、モルタル、コンクリートテストを行った。天然砂に 50% 硬質水砕スラグを混合して使用したコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、引張強

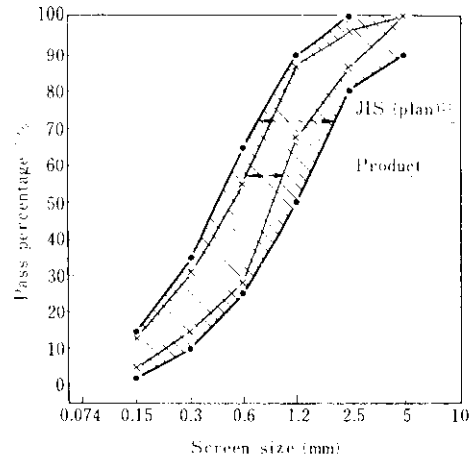


Fig.8 Size distribution of slag sand

度などは、天然砂のみの場合と差異は認められず良好な結果であった。この結果に基づき、所内のコンクリート工事で実使用テスト中であるが、施工上および使用上全く問題は発生していない。今後さらに使用範囲を広げていく予定で、現在改修工事中である当所第 4 高炉の関連コンクリート工事では、多量の使用を予定している。

5. 結 言

高炉前方式において、溶融スラグから硬質水砕スラグを得るには、吹製直前のスラグを所定温

Table 5 Physical properties of slag sand (No.2 BF)

Item	Specific gravity	Specific gravity in dry state	Washing loss (%)	Solid content in aggregate (%)	Bulk density (kg/l)	Unit weight (kg/l)	Water absorption (%)	Water content (%)	Fineness modulus	Salt (NaCl) (%)	Float percentage in liquid with specific gravity of 1.95 (%)
Before Crushing	\bar{x} 2.57 σ 0.047	2.43 0.043		51.5 1.57	1.15 0.059	1.30 0.056	1.21 0.737	8.31 3.01	3.06 0.177		
After Crushing	\bar{x} 2.67 σ 0.024	2.65 0.027	2.72 0.55	56.2 5.89	1.34 0.025	1.52 0.030	0.68 0.267	13.71 4.17	2.64 0.152	0.007 0.002	2.06 1.014
Natural sea sand	2.56	2.50	0.6			1.49	2.0		2.5	0.14	1.1
Reference standard		*1 *2 2.5 <	*2 3.0 >			*1 1.45 <	*1 2.5 > *2 3.5 >		2.00 *1 3.43	*2 0.1 >	

*1 JIS (plan)¹⁾

*2 JASS II

度以下に冷却する必要があることを実験により確認した。

熔融スラグの冷却法として、鋼板による KN 式冷却機を開発し、パイロットプラントテストを経て第 2 高炉に 5t/min の能力をもつ設備を建設、現在順調に稼動中である。

製造された硬質水砕スラグは、当初目標とした JIS 原案¹⁾に十分合格するもので、天然砂と同等

の品質を有しており、施工性、強度面ともコンクリート用細骨材として問題なく使用できるものである。

現在、本方式を第 4 高炉にも導入するため、6t/min まで処理できる KN 式冷却機を計画中である。

最後に、計画、検討からテスト、設備建設まで御協力をいただいた(株)永田製作所、川鉄鉱業(株)および川鉄運輸(株)の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) コンクリート用高炉スラグ骨材標準化研究委員会：コンクリート用高炉スラグ細砂 JIS 原案，(1977)
- 2) 鈴木ほか：鉄と鋼，64 (1978) 11，S 555
- 3) A.A. MYASNIK, et al：Steel in the USSR，(1976)，181
- 4) 長尾ほか：鉄と鋼，64 (1978) 11，S 554
- 5) 日本鉄鋼協会：第 43 回西山記念技術講座，(1977)，122
- 6) 長野ほか：鉄と鋼，63 (1977) 11，S 422
- 7) 長野ほか：鉄と鋼，63 (1977) 11，S 423
- 8) 青木ほか：川崎製鉄技報，9 (1977) 1・2，57