

## 2.8 非鉄金属スラグ

銅スラグ、フェロニッケルスラグは中詰材やコンクリート用骨材等として利用できる。  
銅スラグ、フェロニッケルスラグを利用する際には溶出水のpHや有害物質の溶出に留意すること。

(解説)

非鉄金属スラグは銅、鉛、亜鉛等の金属を精錬する際に副次的に得られるスラグで、これにステンレス鋼等の原料となるフェロニッケルを精錬する際に発生するものを含め数種類のスラグが排出されている。

精錬には乾式精錬と湿式精錬とがあり、乾式精錬の際に得られる粒状材が土木資材としての技術開発が進められ、既に銅スラグ、フェロニッケルスラグがコンクリート用骨材としてJIS規格化され、利用されている。

### 2.8.1 非鉄金属スラグの種類と生成

銅スラグ、フェロニッケルスラグの生成過程を図2.8.1に示すが、いずれも熔融状態のスラグを急冷もしくは徐冷し、その後破碎・粒度調整を経て製造される。

これらは、徐冷処理された一部のフェロニッケルスラグを除き砂の形状を呈し土木資材としては主にコンクリート骨材として利用されている。徐冷されたフェロニッケルスラグは礫状のものもあり、道路用材としての用途もある。

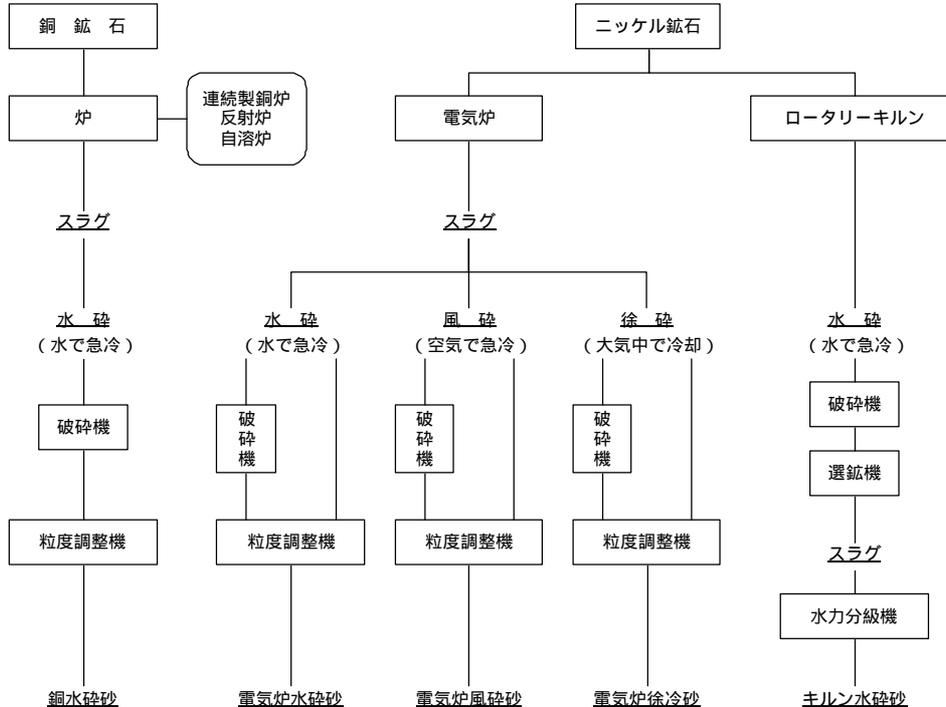


図 2.8.1 銅スラグ、フェロニッケルスラグの生成過程

## 2.8.2 非鉄金属スラグの品質と利用用途

### (1) 銅スラグ

#### 1) 品質

銅スラグは密度が大きいという特徴を有し、粒子形状は角張っている。その他の性状は天然材に近く水硬性もほとんどない。

#### 化学組成

銅スラグは鉄 (FeO)、シリカ (SiO<sub>2</sub>) を主成分とし、その他に石灰 (CaO)、アルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) などを含有している。

粒子はガラス質であるため安定しており、銅スラグの塩基度 (CaO/SiO<sub>2</sub>) は鉄鋼スラグに比べ低く自硬性はほとんど無い。

表2.8.1 銅スラグの化学成分の範囲

化 学 成 分	範 囲
FeO	45 ~ 54%
SiO <sub>2</sub>	30 ~ 36%
CaO	2 ~ 7%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 ~ 6%

#### 粒子密度と単位体積重量

銅スラグの粒子の密度は3.6g/cm<sup>3</sup>以上で一般の砂 (2.6~2.7g/cm<sup>3</sup>) に比べ重い。単位体積重量の試験結果の例を表2.8.2に示す。

表2.8.2 銅スラグの単位体積重量試験結果 (例)

試験方法	試料	精錬所 A	精錬所 B
棒突き法 (絶乾状態) (JIS A1104)		20.5kN/m <sup>3</sup>	20.3kN/m <sup>3</sup>
軽装法 (絶乾状態) (試料面 20cm より自由落下)		18.7kN/m <sup>3</sup>	18.5kN/m <sup>3</sup>
水中飽和重量 (水面 10cm より自由落下)		22.8kN/m <sup>3</sup>	22.2kN/m <sup>3</sup>
銅スラグ粒子の密度 (JIS A1202)		3.67g/cm <sup>3</sup>	3.63g/cm <sup>3</sup>

[ 出典 : : 銅スラグ(CUS)の基本物性試験報告書、三菱マテリアル㈱ ]

粒度

銅スラグの粒度分布測定例を図2.8.2に示すが、0.3～3mmの範囲に集中し、比較的単粒度である。

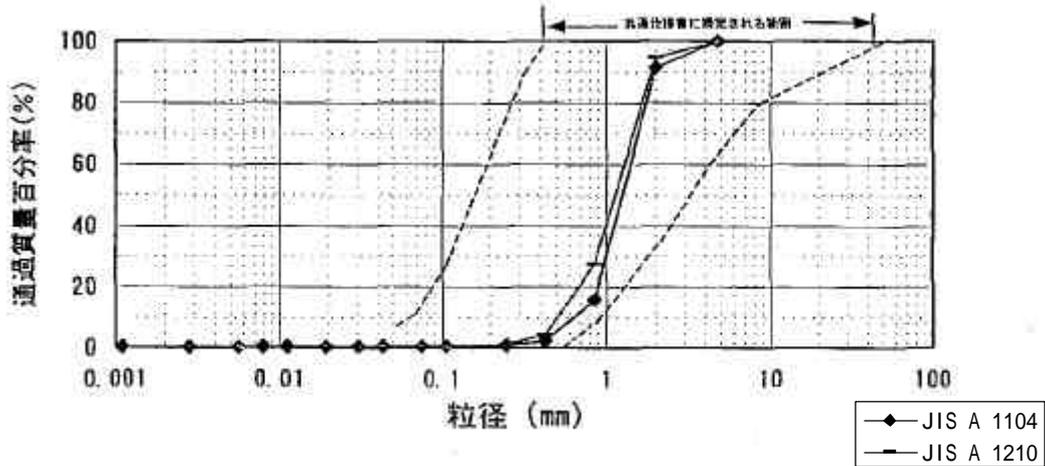


図2.8.2 銅スラグの粒度分布

[ 出典：銅スラグ(CUS)の基本物性試験報告書、三菱マテリアル㈱ ]

透水性、内部摩擦角

銅スラグの内部摩擦角及び透水係数は表2.8.3に示すとおり、砂と同程度である。

表2.8.3 銅スラグの透水係数と内部摩擦角の試験結果 (例)

試 験 項 目	試料A		試料B
	棒突き法	1 E c	棒突き法
透水係数 (cm/sec)	$3.09 \times 10^{-2}$	$2.595 \times 10^{-2}$	$3.49 \times 10^{-2}$
内部摩擦角 (°)	35.2	38.6	32.5

棒突き法：JIS A 1104による試料

1 E c：JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」におけるAB法に相当するエネルギー(=550kJ/m<sup>3</sup>)で締固めた試料

[ 出典：銅スラグ(CUS)の基本物性試験報告書、三菱マテリアル㈱ ]

## 2) 適用用途

銅スラグの適用用途については表2.8.4に示すとおりであり、コンクリート用の骨材として JIS 化されており、中詰材としての利用実績も多い。また、サンドコンパクションパイル材として現地実証実験が行われており、今後の利用が見込まれる。

表2.8.4 銅スラグの港湾・空港等工事への適用

主な利用用途	規格・基準類及び適用	
コンクリート用材 (細骨材)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・JIS A5011-3「銅スラグ骨材」</li> <li>・銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針；土木学会</li> </ul> <p>JIS規格で品質が規定されており、試し練りによりコンクリートの品質を確認の上、利用が可能。ただし、比較的粒子が単粒度であるため、砂等の材料と混合して利用することが多い。</p>
捨石、被覆石等	-	
中詰材	+	銅スラグの単位体積重量は砂より大きく、一般的に砂に比べ有利であり、利用実績も多々ある。
裏込材	-	
舗装用材	×	
パーティクルド レーン		サンドド レーンに適用できると思われるが、現在まで技術開発はほとんど行われていない。
サンド コンパクションパイル		陸上・海上での実証試験実績あり 実証試験の結果、適用可能性を示唆している。
深層混合処理	-	
盛土、覆土		利用実績等はないが重量が大きいことから、軟弱地盤上の盛土は不利であり、プレロード 材としては有利である。

- 凡 例
- ：すでに当該用途を想定した品質基準が設けられ等、利用が可能。
  - ＋：利用実績が多いもの又は に加えて利用マニュアル案等が整備されているもの。
  - ：標準材料と同等、または利用実績や実証実験などで確認され利用可能性の高いもの。
  - ：利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず、今後の検討を要するもの。
  - ×：現段階では利用は難しいと考えられるもの。
  - ：用途対象外。

### 3) 周辺環境への影響

#### pH

銅スラグのpHについては、岩国港で実施された地盤改良（サンドコンパクションパイル工法）試験施工において、周辺海域の調査を行っている。その結果は表2.8.5に示すとおりであり、一般海水のpHと同等の値を示している。

表2.8.5 地盤改良現地調査結果

測定 No.	pH		
	最小	最大	平均
No.1	7.9	8.2	7.9
No.2	7.7	8.2	8.0
No.3	8.0	8.1	8.1
No.4	8.1	8.3	8.2
No.5	8.0	8.3	8.2

[ 出典：国土交通省中国地方整備局宇部港湾工事事務所における試験施工データ ]

#### 有害物質の溶出

銅スラグの有害物質の溶出について、各事業所が実施した溶出試験結果を表2.8.6に示すが、有害物質は検出されないか、検出されても環境基準以下の値である。

また、現地実証試験に用いた銅スラグの溶出試験結果も同様の結果を得ている。

なお、銅スラグの使用に際しては有害物質の溶出について使用を予定している事業所に詳細を確認し、必要に応じて試験を行うことが望ましい。

表2.8.6 銅スラグの溶出試験結果例

項 目	事業所	A	B	C	D	E
	試験時期	H12.4	H11.8	H12.5	H12.2	H12.4
	法 令	環告46	環告14	環告14	環告13	環告14
1 アルキル水銀化合物	mg/l	ND	ND	-	ND	ND
2 水銀又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
3 カドミウムその化合物	mg/l	ND	ND	ND	0.004	0.001
4 鉛又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
5 有機燐化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
6 六価クロム化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
7 砒素又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	0.003	ND
8 シアン化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
9 P C B	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
10 有機塩素化合物	mg/kg	ND	ND	ND	ND	7
11 銅又はその化合物	mg/l	ND	0.61	ND	0.2	0.095
12 亜鉛又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	0.1	0.06
13 弗化物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
14 トリクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
15 テトラクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
16 ベリリウム又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
17 クロム又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
18 ニッケル又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
19 バナジウム又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
20 ジクロロメタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
21 四塩化炭素	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
22 1,2-ジクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
23 1,1-ジクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
24 シス1,2-ジクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
25 1,1,1-トリクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
26 1,1,2-トリクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
27 1,3-ジクロロプロペン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
28 チウラム	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
29 シマジン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
30 チオベンカルブ	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
31 ベンゼン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
32 セレン又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND

環告13；「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年2月17日 環告13号）

環告14；「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令5条1項に規定する埋立場所等に排出しようとする廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年2月17日 環告14号）

環告46；「土壌の汚染に係る環境基準を定める環境庁告示」（平成3年8月23日 環告46号）

ND；定量限界値以下の値

## (2) フェロニッケルスラグ

フェロニッケルスラグは、熔融状態のスラグの冷却方法によって、徐冷スラグと急冷スラグ（水砕、風砕スラグ）に造り分ける。徐冷スラグは礫状を呈し、破碎・ふるい分けを行う。水砕スラグは水を用いて冷却したもので、風砕スラグは空気を用いて冷却したもので、いずれも径5mm以下の砂状であり、発生場所によって粒度が異なる。また、風冷スラグは水砕スラグに比べガラス量は低い球形に近い形状をしている。

### 1) 品質

#### 化学組成

フェロニッケルスラグはシリカ（ $\text{SiO}_2$ ）とマグネシア（ $\text{MgO}$ ）を主成分とし、徐冷・急冷のいずれの場合にも主な鉱物組成は安定した結晶構造である。

表2.8.7 フェロニッケルスラグの主な化学成分

単位：%

	$\text{SiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{FeO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
A	56.0	28.1	4.7	8.0	1.9
B	53.5	35.5	0.7	4.5	1.5
C	50~55	32~34	0.5~1.0	5~10	1.5~2.0

[ 出典：各事業所資料を集計 ]

#### 粒子密度と単位体積重量

フェロニッケルスラグの粒子密度は $3.0 \sim 3.1\text{g/cm}^3$ 程度であり、一般の中詰砂（ $2.6 \sim 2.7\text{g/cm}^3$ ）に比べ重い。

フェロニッケルスラグをケーソン中詰材に利用するに際しての飽和重量の測定実施例が報告されている。これによるとフェロニッケルスラグの種類によって、若干値が違いますが、水中飽和重量は $21 \sim 22\text{kN/m}^3$ 程度である。

表2.8.8 海水中における単位体積重量測定結果例（単位： $\text{kN/m}^3$ ）

	海 砂		フェロニッケルスラグ		
			水砕	風砕	徐冷
海水中飽和重量	19.57		20.84		
水中飽和重量		18.00		20.83	22.18

徐冷スラグは100~0mm、その他は5~0mm

[ 出典：太平洋金属㈱技術資料を編集 ]

## 粒度

フェロニッケルスラグの粒度は発生場所や冷却方法によって違うが、水砕や風砕スラグは5mm以下で比較的単粒度である。

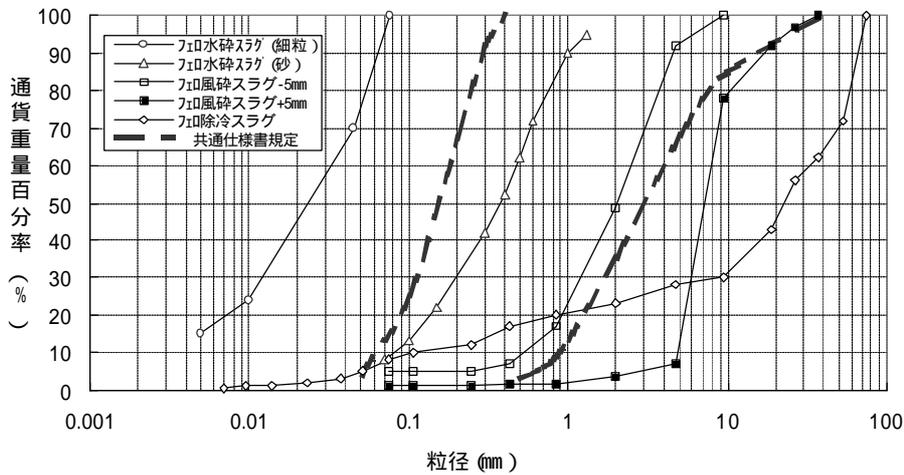


図2.8.3 フェロニッケルスラグの粒度分布

[ 出典：各社の試験結果を編集 ]

## その他の品質

フェロニッケルスラグはサンドコンパクションパイルやドレーン材としての適用検討は行われていないが、銅スラグと同様に物理性状から適用できる可能性があり、力学特性等を確認する試験を実施している事業所もある。表2.8.9に内部摩擦角、透水係数等の特性を示すが、内部摩擦角、透水係数は砂と同程度の値を示す。

表2.8.9 フェロニッケルスラグの品質試験結果（例）

試験項目	試験結果	備考
最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup> 1.905	圧密・排水
最適含水比	% 18.2	
C B R 値	% 33.8	
透水係数	cm/sec 7.6 × 10 <sup>-3</sup>	
内部摩擦角 度	Dr=30 35.7	
	Dr=60 35.3	

[ 出典：港湾材料用フェロニッケル砂「ナスサンド」技術資料、日本冶金工業㈱ ]

## 2) 適用用途

フェロニッケルスラグの適用用途については表2.8.10に示すとおりであり、コンクリート用の骨材として JIS 化されており、中詰材としての利用実績も多い。また、徐冷されたスラグは破碎・ふるい分けを行いクラッシュランとしての利用事例がある。ただし、徐冷スラグが発生する事業所は全国で1カ所のみである。

表2.8.10 フェロニッケルスラグの港湾・空港等工事への適用

主な利用用途	規格・基準類及び適用	
コンクリート用材 (細骨材)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・JIS A5011-2「フェロニッケルスラグ骨材」</li> <li>・フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針；土木学会</li> </ul> <p>JIS規格で品質が規定されており、試し練りによりコンクリートの品質を確認の上、利用が可能。ただし、比較的粒子が単粒度であるため、砂等の材料と混合して利用することが多い。アルカリ骨材反応に対し、無害と判定されないものもある。</p>
捨石、被覆石等	-	
中詰材	+	フェロニッケルスラグの単位体積重量は砂よりやや大きく、有利であり、利用実績も多々ある。
裏込材	-	
舗装用材		徐冷されたスラグの利用実績がある。
バーチカルドレーン		サンドドレーンに適用できると思われるが、現在まで技術開発はほとんど行われていない。
サンドコンパクションパイル		サンドコンパクションパイルに適用できると思われるが、現在まで技術開発はほとんど行われていない。
深層混合処理	-	
盛土、覆土		利用実績等はないが重量が大きいため、軟弱地盤上の盛土は不利であり、プレロード材としては有利である。

凡例

- ：すでに当該用途を想定した品質基準が設けられ等、利用が可能。
- \*：利用実績が多いもの又は に加えて利用マニュアル案等が整備されているもの。
- ：標準材料と同等、または利用実績や実証実験などで確認され利用可能性の高いもの。
- ：利用可能性はあるが、既存資料からは判定できず、今後の検討を要するもの。
- ×：現段階では利用は難しいと考えられるもの。
- ：用途対象外。

### 3) 周辺環境への影響

#### pH

フェロニッケルスラグの pH は、鉄鋼スラグや石炭灰に比べ小さく、事業所で実施した土壌実験法による試験で pH=9.3 という結果を得た事例がある。

#### 有害物質の溶出

フェロニッケルスラグの有害物質の溶出について、各事業所が実施した溶出試験結果を表2.8.11に示すが、有害物質は検出されないか、検出されても環境基準以下の値である。

なお、フェロニッケルスラグの使用に際しては有害物質の溶出について使用を予定している事業所に詳細を確認し、必要に応じて試験を行うことが望ましい。

表2.8.11 フェロニッケルスラグの溶出試験結果例

項 目	事業所	A		B		C
	品 目	徐冷	風碎	キルン水碎		水碎
	試験時期	H11.10	H12.4	H11.2	H11.2	H10.1
	法 令	環告14	環告14	環告46	環告14	環告13
1 アルキル水銀化合物	mg/l	-	-	ND	ND	-
2 水銀又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
3 カドミウムその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
4 鉛又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
5 有機燐化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
6 六価クロム化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
7 砒素又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
8 シアン化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
9 P C B	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
10 有機塩素化合物	mg/kg	ND	ND		ND	ND
11 銅又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
12 亜鉛又はその化合物	mg/l	ND	ND		ND	ND
13 弗化物	mg/l	0.2	0.01		ND	ND
14 トリクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
15 テトラクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
16 ベリリウム又はその化合物	mg/l	ND	ND		ND	ND
17 クロム又はその化合物	mg/l	0.02	ND		ND	ND
18 ニッケル又はその化合物	mg/l	ND	ND		ND	ND
19 バナジウム又はその化合物	mg/l	ND	0.02		ND	ND
20 ジクロロメタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
21 四塩化炭素	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
22 1,2-ジクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
23 1,1-ジクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
24 シス1,2-ジクロロエチレン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
25 1,1,1-トリクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
26 1,1,2-トリクロロエタン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
27 1,3-ジクロロプロペン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
28 チウラム	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
29 シマジン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
30 チオベンカルブ	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
31 ベンゼン	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND
32 セレン又はその化合物	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND

環告13；「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年2月17日 環告13号）  
 環告14；「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令5条1項に規定する埋立場所等に  
 排出しようとする廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年2月17日 環告14号）  
 環告46；「土壌の汚染に係る環境基準を定める環境庁告示」（平成3年8月23日 環告46号）  
 ND；定量限界値以下の値