

## 石炭灰を用いたセメント硬化体のエトリンサイト生成量が有害元素溶出抑制に及ぼす影響

安藤ハザマ 正会員 ○高木 亮一, 齋藤 淳, 九州大学 笹木 圭子  
東京電力HD 正会員 高橋 智彦, J E R A 荒川 大樹

## 1. はじめに

著者らは、石炭灰（原粉）を多量に用いたセメント硬化体（副産物利用による環境負荷低減技術）を福島第一原子力発電所港湾関係工事で適用し<sup>1)</sup>、技術的課題である有害元素溶出抑制メカニズムの解明を進めてきている<sup>2)</sup>。本稿では、有害元素の溶出抑制に寄与すると考えているエトリンサイトの定量化を試みて、その生成量が有害元素溶出抑制に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

## 2. 試験概要

## 2.1 使用材料

使用材料を表-1に、材料単体の有害元素溶出量（環告46号）を表-2に示す。有害元素溶出抑制用の混和材として、消石灰、高炉スラグ微粉末、不溶化材（ドロマイト系化合物）を用いた。使用した石炭灰は分級等の前処理を実施していない原粉（JIS II種相当品）である。材料単体の有害元素溶出量は、セメントでCr<sup>6+</sup>、Se、石炭灰（原粉）からはCr<sup>6+</sup>、Se、F、Bが土壤環境基準値を超えていた。有害元素溶出抑制メカニズムを判読しやすいように、あえて溶出量の多い石炭灰（原粉）を選定した。

## 2.2 配合

セメント硬化体の配合を表-3に示す。水粉体比は32.8%、セメント添加率は7.4%とし、水、セメントおよび石炭灰（原粉）の量は固定とした。混和材の量は、カルシウム換算量が一定（FA10に対して1.21）になるように設定し、そこに反応性の少ないと考えられる珪石粉を混合させた。ホバート型モルタルミキサで3分間練り混ぜた。無添加に比べ混和材を混合させると流動性は低下したが、供試体作製に問題のない範囲内に配合を調整した。

## 2.2 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。試験材齢は28日とした。X線回析による鉱物の定量化は既往の研究<sup>3) 4)</sup>を参考にした。

表-1 使用材料

材料名称	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
水	W	1.03	海水
セメント	C	3.15	普通ポルトランドセメント
石炭灰	FA	2.16	広野火力発電所産, 原粉
珪石粉	SiO <sub>2</sub>	2.56	—
消石灰	LM	2.15	—
高炉スラグ微粉末	SL	2.90	比表面積 4480 cm <sup>2</sup> /g
不溶化材	DM	2.32	ドロマイト系化合物

表-2 セメントと石炭灰（原粉）の有害元素溶出量

項目	溶出量(mg/L)		土壤環境基準値
	C	FA	
六価クロム (Cr <sup>6+</sup> )	0.49	0.080	0.05 以下
砒素 (As)	ND	0.007	0.01 以下
セレン (Se)	0.016	0.19	0.01 以下
ふっ素 (F)	0.15	2.2	0.8 以下
ほう素 (B)	ND	7.2	1 以下

※着色箇所：基準値超過，ND：検出下限値以下

表-3 セメント硬化体の配合

水準	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							流体化時間 (秒)
	W	C	FA	LM	SL	DM	SiO <sub>2</sub>	
無添加				0	0	0	365	2.9
LM	412	93	847	188	0	0	140	7.8
SL				0	327	0	76	4.8
DM				0	0	331	0	216

表-4 試験項目および試験方法

項目	試験方法
流体化時間	・ミキサボウルに試料を入れて加振させ、試料全体が連続体となり平らになった時間
X線回析 (XRD)	・リートベルト法による鉱物定量化 <sup>3) 4)</sup> ・内部標準試料(α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )による補正
圧縮強度	・JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」 ・試験体寸法：φ5×10cm ・脱型：打設2日後，養生：水中
有害元素溶出	・環告46号(土壤環境基準)，5項目

キーワード 石炭灰（原粉），エトリンサイト，有害元素，福島第一原子力発電所

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ 技術研究所 TEL 029-858-8813

### 3. 試験結果

#### 3.1 圧縮強度

圧縮強度は、無添加 (2.0 N/mm<sup>2</sup>), LM (4.32 N/mm<sup>2</sup>), DM (6.7 N/mm<sup>2</sup>), SL (30.4 N/mm<sup>2</sup>) の順で高い値を示した。SLは他の水準に比べ強度が高くなっていて、これはカルシウムシリケート化合物 (以下、C-S-H) が生成されたことが影響したと考えられた。

#### 3.2 X線回析による鉱物定量化

X線回析結果を表-5に示す。エトリンガイトの生成量は、SL、無添加、LM、DMの順で高い値を示した。既往の研究<sup>4)</sup>より、非晶質相のほとんどはC-S-Hと推察されていることから、本報告でも非晶質をC-S-Hと定義する。C-S-HはSlagが最も高く、それ以外の水準はほぼ同等の値であった。この結果からも前述したSLの圧縮強度が高かったことはC-S-Hの生成が寄与していたことが示唆された。その他、使用した材料に起因すると考えられる鉱物が多く検出されていた。これらは、セメント由来のビーライト、石炭灰由来のムライト、珪石粉由来の石英、消石灰由来の二水石こう等である。

#### 3.3 有害元素溶出量

エトリンガイトとセメント硬化体の有害元素溶出量の関係を図-1に示す。無添加のCr<sup>6+</sup>、Se、FおよびSLのSeで土壤環境基準値を超える溶出量が確認された。SLは無添加に比べ、Cr<sup>6+</sup>とBの溶出量は抑制されたが、SeとFの溶出量は無添加と同等であり、抑制されていなかった。LM、DMはすべて土壤環境基準値以下であり、無添加に比べ、Cr<sup>6+</sup>、Se、F、Bの溶出量が抑制されていた。Bに関しては、SLよりもLMとDMの方が溶出抑制効果は高かった。

Cr<sup>6+</sup>溶出量とエトリンガイトの間には関係性が見いだせなかった。SLはC-S-Hが他の水準に比べ多く生成され、圧縮強度も高いことから、Cr<sup>6+</sup>の溶出抑制にはC-S-Hも寄与している可能性があると考えられた。Se溶出量とエトリンガイトの間には強い負の相関関係が確認できた。FおよびBでは、エトリンガイトが多くなると溶出量が少なくなる傾向が確認できた。圧縮強度とSe、F、B (陰イオン) 溶出量の間には関係性が見られなかったことから、エトリンガイトによる溶出抑制効果が高いと考えられた。

#### 4. まとめ

石炭灰 (原粉) を用いたセメント硬化体中のエトリンガイトを定量化した。圧縮強度と有害元素溶出量の間に関係性は見られなかったが、エトリンガイトによる有害元素の溶出抑制効果が高いことが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 福島第一原子力発電所工事における石炭灰活用の取組(その1~4), 土木学会全国大会第74回年次学術講演会 2019 VI-966~969
- 2) 高木他: 石炭灰を用いたセメント硬化体の有害元素溶出抑制に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, 2019
- 3) 星野他: 非晶質混和材を含むセメントの鉱物の定量におけるX線回析/リートベルト法の適用, セメントコンクリート論文集, No. 59, 2005
- 4) 星野他: X線回析/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, 2006

表-5 X線回析結果

項目	鉱物および水和物値(mass%)			
	無添加	LM	SL	DM
エトリンガイト	4.15	4.91	1.60	14.07
非晶質(C-S-H)	46.25	54.10	69.96	47.44
炭酸カルシウム(CH)	0.01	8.20	0.15	6.40
モノホネート	—	—	1.09	—
ビーライト	0.97	0.78	1.35	1.12
水酸化カルシウム	1.33	0.78	0.86	2.95
二水石こう	—	0.66	—	—
ムライト	13.47	13.01	12.66	13.43
石英	33.03	16.49	11.48	7.72

※「—」は検出されなかった項目

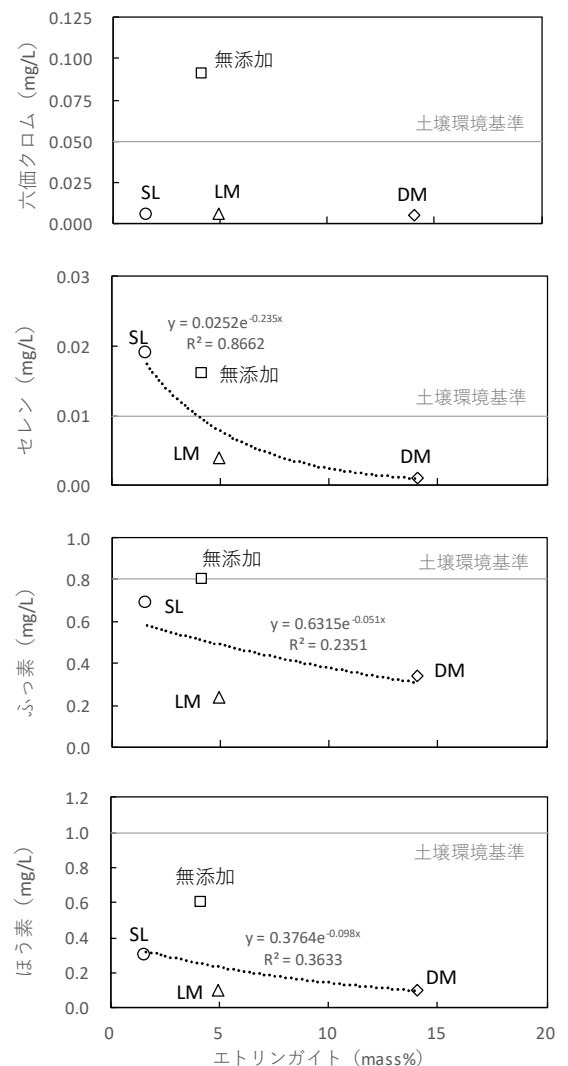


図-1 エトリンガイトと有害元素溶出量の関係