



## 焼却灰のセメント固化試験 I

— 模擬焼却灰の基本的固化特性 —

Cement Solidification Test for Incinerated Ash I  
- Fundamental Solidification Characteristics of Incinerated Ashes -

川戸 喜実 富岡 修 高橋 邦明 目黒 義弘  
坂本 浩幸 芳賀 和子

Yoshimi KAWATO, Osamu TOMIOKA, Kuniaki TAKAHASHI, Yoshihiro MEGURO  
Hiroyuki SAKAMOTO and Kazuko HAGA

バックエンド推進部門  
バックエンド技術開発ユニット

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit  
Nuclear Cycle Backend Directorate

July 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

焼却灰のセメント固化試験 I  
－模擬焼却灰の基本的固化特性－

日本原子力研究開発機構  
バックエンド推進部門バックエンド技術開発ユニット  
川戸 喜実、富岡 修、高橋 邦明、目黒 義弘、坂本 浩幸\*、芳賀 和子\*

(2010年3月29日受理)

原子力機構の各拠点から放射性廃棄物として発生する可燃物や難燃物の焼却灰を固型化するために、セメント系固型化材を用いて模擬焼却灰（飛灰）の基本的な固化特性を調べた。固型化材の種類、焼却灰の充填率、固化遅延物質の含有量などの固化条件をパラメータに固化体の一軸圧縮強度を調べるとともに、不溶化剤を添加して固化体からの焼却灰中の重金属成分の溶出率を調べた。

- ① 普通ポルトランドセメント、高炉セメント、アーウィン系低アルカリ性セメント、水砕スラグ系セメントを用い、焼却灰の固化体の圧縮強度を調べた。普通ポルトランドセメント、高炉セメント、低アルカリ性セメントは、評価の目安とした一軸圧縮強度 $1.47 \text{ N/mm}^2$ を超えることを確認した。また、低アルカリ性セメントを用いた固化体は、他のセメント固化体に比べて高い強度を示した。
- ② 高炉セメントと低アルカリ性セメントについて、焼却灰の充填率を20 %、30 %、40 %とした固化体を作製し、一軸圧縮強度を調べた。高炉セメントは充填率を40 %にすると $1.47 \text{ N/mm}^2$ を超えなかったが、低アルカリ性セメントは40 %でも $1.47 \text{ N/mm}^2$ を超えた。
- ③ 高炉セメントと低アルカリ性セメントについて、セメントの固化遅延物質である焼却灰に存在する可能性のある鉛と亜鉛の含有量を増加（鉛成分：1.0 %、2.5 %、5.0 %、10.0 %、亜鉛成分：4.9 %、7.5 %、10.0 %、12.5 %）させた固化体を作製し、硬化性への影響を調べた。両固化体とも全ての含有率で $1.47 \text{ N/mm}^2$ を超える固化体を得られた。
- ④ 重金属（鉛、カドミウム、クロム）の不溶化剤としてゼオライト、ベントナイト、硫酸鉄、硫化ナトリウムを選定し、それぞれ添加した固化体からの重金属の溶出率を調べた。硫酸鉄、硫化ナトリウムはクロムに対する抑制効果が認められたが、ゼオライトとベントナイトは顕著な溶出抑制効果が見られなかった。一方、セメント系材料自体の溶出抑制効果は、高炉セメントと低アルカリ性セメントが高かった。

Cement Solidification Test for Incinerated Ash I  
- Fundamental Solidification Characteristics of Incinerated Ashes -

Yoshimi KAWATO, Osamu TOMIOKA, Kuniaki TAKAHASHI, Yoshihiro MEGURO,  
Hiroyuki SAKAMOTO\* and Kazuko HAGA\*

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit  
Nuclear Cycle Backend Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 29, 2010)

It is important to understand fundamental solidification characteristics of incinerated ashes of combustible and poorly combustible wastes generated by Japan Atomic Energy Agency. Simulated solidified substances using general incinerator fly ash were prepared under different conditions such as solidified materials, ash filling rates, amount of solidification retarders and so on, and their compressive strength were determined. The leaching rate of heavy metals, which were included in the ash, from the solidified substance was examined and effects of insolubilizers were confirmed.

- ① The compressive strength of the solidified substances prepared using a normal portland cement, a blast furnace slag cement, and a low alkalinity cement exceeded a standard value, 1.47 N/mm<sup>2</sup>. The substance made from the slag cement did not show enough strength even after 28 days. That made from the low alkalinity cement was stronger than the others.
- ② Using the blast furnace slag cement or the low alkalinity cement, the solidified substances were made under different filling rates of the incinerated ash to be 20%, 30% and 40%. The compressive strength of the substance made from the blast furnace slag cement was lower 1.47 N/mm<sup>2</sup> when the filling rate was 40%. For the substances using the low alkalinity cement, all the strengths were over 1.47 N/mm<sup>2</sup> regardless of the filling rate within the range examined.
- ③ The solidified substances were prepared by adding Pb of 1.0, 2.5, 5.0, or 10.0% and Zn of 4.9, 7.5, 10.0 or 12.5% with the blast furnace slag cement or the low alkalinity cement. Pb and Zn would behave as retardative substances for solidification. All substances showed the compressive strength over 1.47 N/mm<sup>2</sup>.
- ④ Zeolite, bentonite, ferrous sulfate and sodium sulfide were chosen as insolubilizers for heavy metals (Pb, Cd, and Cr). The solidified substances were made by adding these insolubilizers and the leaching rates of the heavy metals from the solidified substances were examined. Ferrous sulfate and sodium sulfide prevented Cr from elution. Zeolite and bentonite did not show remarkable effects to prevent elution of the metals. The cement, especially the blast furnace slag cement and the low alkalinity cement itself showed elution inhibitory effect.

---

Keywords : Incinerated Ash, Compressive Strength, Filling Rate, Insolubilizer, Radioactive Waste

\* Taiheiyo Consultant Co., Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 焼却灰のセメント固化処理等に関する調査	1
2.1 一般焼却灰の固化方法	1
2.2 一般焼却灰中の重金属成分	2
2.3 セメント固化に影響を与える成分	2
2.4 重金属の不溶化	3
2.5 試験に用いた重金属不溶化剤とセメント系材料	5
3. 模擬焼却灰の作製	6
4. 試験	8
4.1 セメント系材料及び重金属不溶化剤の性能	8
4.2 焼却灰充填率等の影響	22
4.3 固化遅延成分の影響	31
5. まとめ	37
参考文献	38

CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Investigation on cement solidification methods of incinerated ash .....	1
2.1 Solidification method of general incinerated ash .....	1
2.2 Heavy metals in incinerated ash .....	2
2.3 Substances which affect cement solidification .....	2
2.4 Insolubilization of heavy metals .....	3
2.5 Heavy metal insolubilizers and cement-based materials for the tests .....	5
3. Preparation of simulated incinerated ash .....	6
4. Results .....	8
4.1 Properties of cement-based material and heavy metal insolubilizers .....	8
4.2 Influence of filling ratios of incinerated ash .....	22
4.3 Influence of solidification retarders .....	31
5. Conclusion .....	37
References .....	38

図目次

図3-1	焼却灰の走査型電子顕微鏡写真	7
図4.1-1	OPCを用いたセメント固化体の圧縮強度測定結果	13
図4.1-2	OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)	14
図4.1-3	OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)	14
図4.1-4	OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))	15
図4.1-5	OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)	15
図4.1-6	BBを用いたセメント固化体の圧縮強度試験結果	16
図4.1-7	BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)	17
図4.1-8	BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)	17
図4.1-9	BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))	18
図4.1-10	BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)	18
図4.1-11	LACを用いたセメント固化体の圧縮強度試験結果	19
図4.1-12	LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)	20
図4.1-13	LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)	20
図4.1-14	LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))	21
図4.1-15	LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)	21
図4.2-1	BBを用いた固化体の圧縮強度測定結果(混和剤なし)	24
図4.2-2	BBを用いた固化体の圧縮強度測定結果(混和剤添加)	24
図4.2-3	BBを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤なし)	25
図4.2-4	BBを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤添加)	25
図4.2-5	フロー値の測定結果(BB)	26
図4.2-6	LACを用いた固化体の圧縮強度試験結果(混和剤なし)	27
図4.2-7	LACを用いた固化体の圧縮強度試験結果(混和剤添加)	27
図4.2-8	LACを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤なし)	28
図4.2-9	LACを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤添加)	28
図4.2-10	フロー値の測定結果(LAC)	29
図4.2-11	圧縮強度と鉛溶出量の関係	29
図4.2-12	圧縮強度とクロム(VI)溶出量の関係	30
図4.2-13	圧縮強度とカドミウム溶出量の関係	30
図4.3-1	灰の鉛濃度がBBセメント固化体の圧縮強度に与える影響	33
図4.3-2	灰の鉛濃度がLACセメント固化体の圧縮強度に与える影響	33
図4.3-3	重金属溶出量に及ぼす鉛濃度の影響(BB:高炉セメント固化体)	34
図4.3-4	重金属溶出量に及ぼす鉛濃度の影響(LAC:低アルカリ性セメント固化体)	34
図4.3-5	灰の亜鉛濃度がBBセメント固化体の圧縮強度に与える影響	35
図4.3-6	灰の亜鉛濃度がLACセメント固化体の圧縮強度に与える影響	35
図4.3-7	重金属溶出量に及ぼす亜鉛濃度の影響(BB:高炉セメント固化体)	36
図4.3-8	重金属溶出量に及ぼす亜鉛濃度の影響(LAC:低アルカリ性セメント固化体)	36

表目次

表2.5-1	重金属不溶化の有効材料と不溶化機構 -----	5
表3-1	焼却灰の元素組成比 -----	6
表4.1-1	不溶化剤種類と添加量 -----	8
表4.1-2	試験で使用したセメント系材料 -----	9
表4.1-3	排出基準値と本試験で用いた分析装置の定量下限値 -----	12
表4.1-4	セメント材料及び重金属不溶化剤の性能確認試験の配合条件 -----	12
表4.2-1	焼却灰充填率等の影響確認試験の配合条件 -----	22
表4.3-1	試験に用いた焼却灰の組成 -----	31
表4.3-2	固化遅延成分の影響確認試験の配合条件 -----	32



## 1. はじめに

放射性廃棄物の処理においてセメント系材料は、処分容器に放射性廃棄物を固型化する材料として使用されている<sup>[1]</sup>。例えば原子力発電所の定期検査等の工事で発生した低レベル放射性廃棄物の金属類等の固体状の廃棄物は、種類毎に分類して、必要に応じて切断した後、ドラム缶に収納してセメント（モルタル）を充填して固型化される。また、原子力発電所の運転に伴い発生した廃液を濃縮した液体廃棄物は、セメントとともにドラム缶内に充填して均質・均一に固型化される。

これらの実績を踏まえ日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）の各拠点から発生する焼却灰についてもセメント系材料を用いて固型化し処分する計画である。しかしながら、焼却灰の中には放射性核種を含むほか、亜鉛などのセメントの固化を遅延させる成分が含まれているものがある。そのため、固化処理にあたっては、廃棄物の種類や特徴に応じてセメント材料や配合条件などを設定しなければならない。また、作製する固化体に関して、処分の観点から固型化材に放射性核種を収着させることによって放射性核種の地下水への移行を遅延させる効果などが期待されている。そのため、セメント固化体の特性把握やセメント材料の機能の向上などが望まれている。

そこで、今後原子力機構の各拠点で進める焼却灰のセメント固化設備の設計等に向けて固化条件の設定及び固化体性能の把握等に資する基礎データを取得することを目的に平成20年度より焼却灰のセメント固化試験を開始した。平成20年度は焼却灰の基本的な固化特性を把握するため、一般焼却炉の焼却灰を用いセメント材料の種類、不溶化剤、焼却灰充填率、水セメント比等が固化特性や含有成分の溶出などに及ぼす影響を調べる試験を実施した。

## 2. 焼却灰のセメント固化処理等に関する調査

### 2.1 一般焼却灰の固化方法

都市ごみ焼却場から排出される焼却灰は、現在、最終処分場に埋立処分されている。一方、焼却灰を有効利用する研究も進められている。利用方法としては、熔融スラグとして使用する方法やエコセメントの原料として使用する方法などであり、実際に都市ごみ焼却灰を使用したエコセメントが生産されている。

他方、焼却場の集塵灰（飛灰）には、鉛、カドミウム等が比較的多く含まれていることから、平成3年10月に改正された廃棄物の処理及び清掃に関する法律により、特別管理一般廃棄物とされ、平成7年度からは以下に示すような定められた方法で処理をしなければ埋立処分ができなくなった。

#### ① 熔融処理

ガスや電気エネルギーなどによって加熱し、スラグとした後に急冷、又は徐冷して固化させ、その中に重金属類を封入して安定化させる方法である。本法の利点は元の廃棄物量に対して減容効果が大きいことやスラグからの重金属類の溶出量が低いことなどである反面、熔融するための熱エネルギーが必要になることや設備が複雑になる点が難点である。

#### ② セメント固化処理

セメントが硬化する際にセメントの持つ強いアルカリ性によって重金属類を難

溶性化合物にして固化体中に閉じ込める方法である。利点は設備がシンプルで従来から土木用などに使われている簡単な機械が使える点である反面、最適なセメント固化条件で処理しないと成形後に固化体の割れや強度不足などが発生する。

### ③ 薬剤処理

灰に液体キレート剤と水を加えて混練することにより、重金属類を不溶性の重金属キレート化合物にする方法である。利点は比較的簡単な処理フローで処理できる反面、薬剤が高価であるなどの難点がある。

### ④ 酸等による処理

酸等による処理方法としては、酸抽出・硫化物処理法、酸抽出・水酸化物法、酸抽出・キレート剤固定法がある。例えば酸抽出・硫化物処理法では、ばいじんに水を加えてスラリー状とした後に酸を加えて重金属を抽出し、さらに水酸化ソーダを加えて溶解度の低い硫化物とする。この方法は、重金属の溶出率を下げるができる反面、機器の腐食、磨耗、閉塞など注意すべき点がある。

これらの中では、経済性や技術的な面からセメント固化処理が最も多く用いられているが、固化条件についてみると、一般の焼却灰のセメント固化処理では、法律上、固化体に強度が求められていないことから、固化に用いるセメントの添加量が少なく、焼却灰重量の数%～25%程度としている例<sup>[2][3]</sup>が多い。この点で固化体に一定の強度が求められる放射性廃棄物のセメント固化処理とは、固化条件が異なる可能性がある。

## 2.2 一般焼却灰中の重金属成分

焼却灰は一般的に主灰と飛灰に区分される。主灰はごみを焼却した際に炉底部に残る灰及び不燃分であり、飛灰は燃焼の際に集塵機によって捕集された灰である。主灰は処分する際に含有する有害物質が問題となるケースは少ない。一般的な焼却灰に含有される重金属類は、鉛、カドミウムが比較的多く、クロムは少ない。主灰に比較して飛灰には多くの有害物質が含まれており、特に塩素、酸化硫黄 (SO<sub>4</sub>)、カドミウム、亜鉛、水銀、ヒ素が含まれる<sup>[4]</sup>。

重金属はpHなどの化学的環境によってその化学形態が異なる。また、元素によっても難溶性塩を生成する化学的環境が異なる<sup>[5]</sup>。化学的環境は固化に用いるセメント系材料の種類によっても異なる。従って、セメント固化体から重金属の溶出を抑えるためには、焼却灰に含まれる重金属の種類や使用するセメントの特徴を十分に把握することが重要となる。

## 2.3 セメント固化に影響を与える成分

焼却灰を水と接触させた場合に溶出する成分は、焼却炉のタイプや灰種（主灰、飛灰）によらずカルシウム、ナトリウム、カリウム、塩素、硫黄が多い<sup>[4]</sup>。これらの溶出成分はセメントの硬化を促進させる急結材に含まれる成分であり<sup>[6]</sup>、セメントの硬化に影響を与える可能性がある。一方、銅、鉛、亜鉛などの化合物はセメントの凝結を阻害する<sup>[7]</sup>とされている。特に亜鉛化合物はセメントの主要なクリンカー鉱物であるエーライトC<sub>3</sub>S(3CaO・SiO<sub>2</sub>)の水和を遅延すると報告されている<sup>[8]</sup>。溶解したZnOとCa(OH)<sub>2</sub>がCa[Zn(OH)<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O]<sub>2</sub>を形成することにより遅延作用を示す。このように焼却灰

中には硬化を促進させる成分と重金属のように硬化を遅延させる相反する効果を持つ成分が含まれている。

高橋ら<sup>[9]</sup>は普通ポルトランドセメント、超早強セメント、早強セメント、フライアッシュセメント（B種）、高炉セメント（B種）にカドミウム、鉛、亜鉛、銅、マンガン、クロム、鉄の塩化物、硫酸塩、酸化物、硫化物を添加してセメントの強度発現性との関係を調べている。これによると硬化に悪影響を及ぼす重金属化合物として、鉛及び亜鉛の各種化合物、銅の硫酸塩及び硫化物、マンガンの硫酸塩があげられている。また、硬化に影響が見られなかった化合物として、カドミウム、クロム、鉄の各種化合物、銅の酸化物と塩化物、マンガンの硫酸塩以外の化合物があげられている。

## 2.4 重金属の不溶化

上述のとおり一般の焼却灰中には鉛やクロムなどの重金属が含まれているものがあるが、原子力施設から発生する焼却灰も、鉛やクロムなどが少量含まれているものがある。これは焼却対象物である紙、布、プラスチック等の塗料や染料等に重金属が使われているために焼却灰中に残るものと考えられる。

従って、原子力施設から発生する焼却灰をセメント固化して処分するためには、環境への負荷を考慮し、焼却灰中の重金属を不溶化、安定化させて固化体からの溶出量を可能な限り低く抑えることが求められる。

そこで、重金属の不溶化の方法や不溶化剤の検討に資するため、一般産業界で行われている重金属の処理方法等について調べた。以下にその概要を示す。

### (1) 廃液処理における重金属の不溶化技術<sup>[10]</sup>

#### ① 鉛、カドミウムの排水処理方法

##### ・水酸化物法、共沈法

水酸化物法は重金属が含まれている排水にNaOHやCa(OH)<sub>2</sub>を添加することによりアルカリ性にして水酸化物として析出・沈殿させる方法である。カドミウムはpHが大きくなると溶解度が低下しCd(OH)<sub>2</sub>として析出する。しかし、鉛は両性金属であり、pH8以上では水酸化鉛イオンの溶解が支配的になる。

また、共沈法は塩化鉄(III)又は塩化亜鉛を使って共沈処理を行う方法である。

##### ・置換法

キレート剤と錯体を形成している重金属を他の無害な元素で置換し、置換された重金属を水酸化物として沈殿させる方法である。水酸化物法だけでは処理が不十分であるが他の金属イオン（鉄、カルシウム、マグネシウム）と共存させて処理することにより、廃液中の重金属濃度を低下させることができる。

##### ・硫化物法

重金属を溶解度の低い硫化物にして除去する方法であるが、アルカリ性では硫化物の分散反応が起こるため、硫化物法はpH中性域での処理が必要になる。本法は硫化水素の毒性や腐食性を考慮しなければならないため、排水処理への適用事例は少ない。

#### ② クロム(VI)の排水処理方法

##### ・薬品還元

クロム(VI)は強力な酸化剤であり、溶液中に酸化される物質があればクロム

(VI)自身は容易に還元されてクロム(III)になる。クロム(III)イオンはアルカリ性で水酸化物となり沈殿する。クロム(VI)の還元には亜硫酸塩または硫酸鉄(II)が使用され、亜硫酸塩の場合は、pHを2~2.5、酸化還元電位(以下「Eh」という。)を300~400 mVに設定して行う。還元後はアルカリ剤で中和し、水酸化クロム(III)として沈殿分離する。還元剤として鉄(II)を使用する場合は強酸性から強アルカリ性の広い範囲で還元が可能である。

・電解還元

電解処理によって酸化還元反応を生じさせ、クロム(VI)をクロム(III)にする方法である。廃液濃度が低いと液抵抗などにより電力損失が大きくなることから、一般に電解還元は濃厚廃液の処理に適用される。

・イオン交換法、吸着法

クロム酸はイオン交換樹脂への吸着性が高いため、強塩基性陰イオン交換樹脂塔に通水すれば完全に除去されるが、再生液の処理が必要である。

吸着材法としては、活性炭やゼオライトの適用が可能であり、活性炭は弱酸性領域での使用が適している。

(2) 重金属不溶化に関する研究例

内川<sup>[5]</sup>は、セメント固化において重金属を固定する方法を以下のように大別している。

- ・キレート剤との反応によるキレート化合物の生成による固定、又はそれらの反応生成物への吸着による固定
- ・添加混合材料中の元素との置換固溶による固定
- ・極難溶性物質の生成による捕捉
- ・密実な組織を持つ固化体内部への閉じ込め

セメントの水和生成物であるエトリンガイト( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )のAlとCrなどとの置換や珪酸カルシウム水和物(C-S-Hゲル)の結晶表面への吸着などを例としている。また、極難溶性物質の生成による捕捉は、重金属がアルカリ側で水に対する溶解度が低減し、系のpHとEhが適当なアルカリ性領域で極難溶性化合物が生成し、固化体組織の中に沈積することによって起きる。

三木ら<sup>[11]</sup>は複合汚染土壌の改質において重金属の不溶化に関する室内試験を実施し、不溶化剤の検討を行っている。使用されている不溶化剤は、固化系材料4種類(普通ポルトランドセメント、有機質土用固化材、低アルカリ固化材、溶液型注入材)と非固化系材料6種類(水酸化ナトリウム、硫化ナトリウム、硫酸鉄(II)、ベントナイト、ゼオライト、キレート剤)である。それぞれを単独で使用した試験、及び普通ポルトランドセメントと非固化系不溶化剤を組み合わせた試験を実施している。これによると陽イオンとして存在している重金属のカドミウム、鉛、水銀に対しては、セメント系材料の不溶化効果が高く、陰イオンとして存在している重金属であるヒ素、クロムに対してはセメント系材料の不溶化効果は高くない。陽イオンとして存在している重金属のセメント系材料による不溶化は、セメント系材料がアルカリ性であるため陽イオンが水酸化物等の難溶性塩となりセメント系材料の水和生成物に収着、固溶するためと考えられる。

一方、非固化系材料の効果は、鉛に対してベントナイトの吸着効果が高く、クロム

(VI)に対しては硫化ナトリウムや硫酸鉄(II)のような還元剤による不溶化効果が高い。また、複合汚染土壌においても、普通ポルトランドセメントに還元剤である硫化ナトリウムを併用したものがクロム(VI)に対して有効である。

#### 2.5 試験に用いた重金属不溶化剤とセメント系材料

重金属の処理方法等の調査結果から、各重金属に対する有効材料と期待した不溶化機構を表2.5-1に示す。

表2.5-1 重金属不溶化の有効材料と不溶化機構

不溶化の対象金属	有効材料	期待する不溶化機構
陰イオン系重金属 ヒ素、クロム(VI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・硫化ナトリウム</li> <li>・硫酸鉄(II)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・還元して難溶性塩として沈殿</li> </ul>
陽イオン系重金属 特に鉛	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイト</li> <li>・ゼオライト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・固相に吸着、イオン交換</li> </ul>
陽イオン系重金属 カドミウム、鉛、水銀	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セメント系材料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・難溶性塩として沈殿</li> <li>・水和生成物に固溶、収着</li> </ul>

### 3. 模擬焼却灰の作製

本試験では一般廃棄物の焼却設備から排出された焼却灰を模擬焼却灰として使用した。使用した焼却灰は流動床型の焼却設備から排出された飛灰である。

使用した焼却灰の走査型電子顕微鏡写真を図3-1に示す。1 $\mu$ m程度の微細な粒子から数100 $\mu$ m程度の粗大な粒子までであるが、全体的には微細な粒子が多い。

焼却灰の元素組成比を表3-1に示す。焼却灰の元素組成を確認した結果、硬化の遅延物質と考えられ亜鉛の含有量が低かったため試薬で含有量を約5%まで上げて固化特性を見ることにした。また、重金属成分である鉛、クロム、カドミウムについてもそれぞれ試薬で1%まで上げて固化後の溶出率を調べることにした。添加した重金属は、水に溶出しやすい化学形態とした。また、重金属量の調製方法は、溶解度の高い試薬は潮解性があり、少量の試薬を焼却灰に均質に混合することが難しいことから、各重金属試薬の溶液を練り混ぜ水に添加する方法とした。試験に用いた添加試薬を以下に示す。

- 塩化亜鉛 (ZnCl<sub>2</sub>)
- クロム酸ナトリウム (Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>・4H<sub>2</sub>O)
- 硝酸鉛 (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)
- 塩化カドミウム (CdCl<sub>2</sub>)

表3-1 焼却灰の元素組成比

元素	組成比 wt %
Si	12.6
Al	7.8
Fe	2.9
Ca	30.1
Mg	2.7
S	1.5
Na	6.9
K	4.3
Ti	1.4
P	1.5
Cl	20.4
Zn	4.9
Cr	1.0
Cd	1.0
Pb	1.0

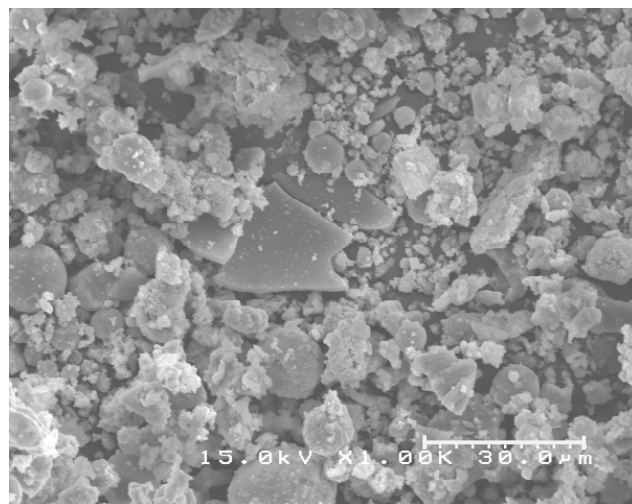
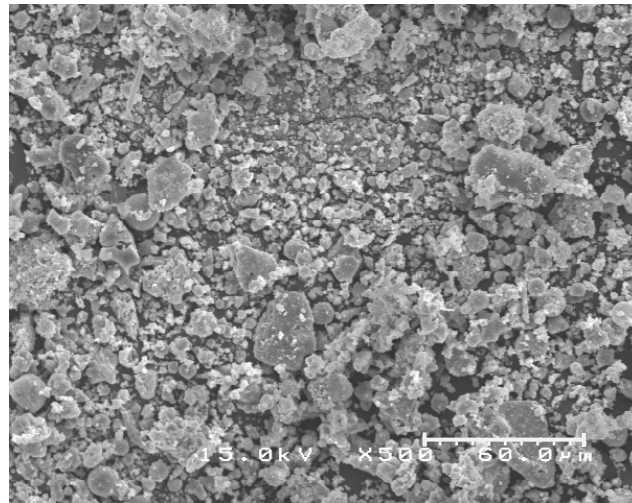
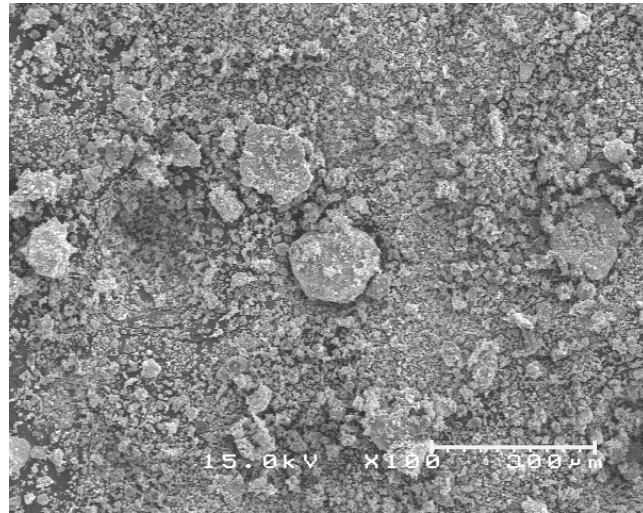


図3-1 焼却灰の走査型電子顕微鏡写真

## 4. 試験

## 4.1 セメント系材料及び重金属不溶化剤の性能

ここではセメント系材料及び重金属の不溶化剤の性能を確認するため、それぞれの材料について混練状態及び固化体の圧縮強度並びに固化体からの重金属の溶出率を調べた。

## (1) 重金属不溶化剤

三木ら<sup>[11]</sup>の検討では、還元剤として硫酸鉄(Ⅱ)と硫化ナトリウムが使用されており、クロム(VI)に対しては、両方とも効果が高いとされている。添加量については、本試験に先行して実施した予察試験で硫酸鉄(Ⅱ)10% (灰重量に対して10%を外割で添加)を添加したところセメントの水和反応が阻害されることがわかったため、硫酸鉄(Ⅱ)の添加量は5%とした。また、硫化ナトリウムの添加量は三木らの研究で十分な不溶化効果が得られている0.5%とした。ベントナイトはモンモリロナイトを50%含むクニミネ工業株式会社製のクニゲルV1®を用いた。添加量はモンモリロナイト量の影響を確認するため、10%、20%とした。

ゼオライトは多くの種類があり、吸着能に多少の差はあるが、いずれも陽イオンの吸着性能がある。セメント固化のようにカルシウムイオン等のアルカリ金属が多量に共存する条件では、これらのイオンが重金属の吸着の競合イオンとなる可能性があるが、そのような検討はほとんど実施されていない。また、ゼオライトには天然鉱物を粉砕したものと人工のものが存在するが、セメント固化条件で陽イオン吸着能にどの程度の差があるか明確ではない。そこで、本試験では天然ゼオライトと人工ゼオライトの両方を試験した。天然ゼオライトは、比較的陽イオンの吸着能が高く、汚染土壌改良用に使用した実績<sup>[12]</sup>がある日東粉化工業株式会社製のケイゼオン®を使用した。また、人工ゼオライトは、火力発電所から排出された石炭灰を表面処理して陽イオン吸着能を持たせたゼオライトで生態系コンクリートブロックなどに使用実績<sup>[13]</sup>のあるシーキュラス®を使用した。添加量は予察試験の結果を踏まえてそれぞれ10%とした。

本試験で使用した不溶化剤と添加量を表4.1-1に示す。

表4.1-1 不溶化剤種類と添加量

不溶化剤	灰量に対する添加量 (外割wt%)
硫酸鉄(Ⅱ) (FeSO <sub>4</sub> ・7H <sub>2</sub> O)	5
硫化ナトリウム (Na <sub>2</sub> S・5H <sub>2</sub> O)	0.5
天然ゼオライト (ケイゼオン)	10
人工ゼオライト (シーキュラス)	10
ベントナイト (クニゲルV1)	10、20



(2) セメント系材料

セメント系材料は練り混ぜ水に溶解するとpHやEhが変化する。重金属はpHやEhによって安定な化学種が異なることから、複数のセメント材料について試験することとし、pHやEhが異なると思われるセメント系材料を選定した。

本試験で用いたセメント系材料の特徴を表4.1-2に示す。

表4.1-2 試験で使用したセメント系材料

セメント系材料	特徴等
普通ポルトランドセメント (OPC)	最も一般的なセメント 予想される間隙水のpHは12.5～13.0程度
高炉セメント (B種) (BB)	ポルトランドセメントに高炉スラグを混合したセメント 予想される間隙水のpHは12.5～13.0程度 高炉スラグの効果により固化体内は還元性雰囲気となる
低アルカリ性セメント (LAC)	アーウィン系低アルカリ性セメント 予想される間隙水のpHは11程度 水和物のカルシウムアルミネートサルフェートを多く生成することから、重金属イオンの置換固溶を期待できる
水砕スラグ系セメント (SC)	高炉水砕スラグを主成分としたセメント 高炉水砕スラグにアルカリ刺激剤を添加 予想される間隙水のpHは13以上 高炉スラグの効果で固化体内は還元性雰囲気となる

① 普通ポルトランドセメント (OPC)

日本で製造されているポルトランドセメントはJIS R 5210に規定されている5種類（それぞれに低アルカリ型がある）と白色ポルトランドセメント及び油井セメントである。ポルトランドセメントはエーライトと呼ばれる $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 系鉱物、ビーライトと呼ばれる $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 系鉱物、一般的にアルミネート相と呼ばれる $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 系鉱物、フェライト相と呼ばれる $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 系鉱物とセッコウ ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) の5種類を基本鉱物としている。普通ポルトランドセメントの主要な化学成分の一例<sup>[14]</sup>は、 $\text{SiO}_2$  22%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  5.5%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3.0%、 $\text{CaO}$  64.8%、 $\text{MgO}$  1.4%、 $\text{SO}_3$  1.9%である。また、鉱物組成の一例<sup>[14]</sup>は、 $\text{C}_3\text{S}$  50%、 $\text{C}_2\text{S}$  26%、 $\text{C}_3\text{A}$  8%、 $\text{C}_4\text{AF}$  9%である（但し鉱物組成について、C :  $\text{CaO}$ 、S :  $\text{SiO}_2$ 、A :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、F :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ と表す）。

普通ポルトランドセメントは、コンクリート工事に広く使用されており、日本で使用される全セメントの約80%が普通ポルトランドセメントである。また、高炉セメント等の混合セメントの母体としても使用されている。

② 高炉セメント (BB)

ポルトランドセメントに高炉水砕スラグを混合したもので、ポルトランドセメントの水和により発生した水酸化カルシウムによって高炉水砕スラグが徐々に水和反応する。従って、水酸化カルシウムの生成量が少なく、固化体の組織が緻密にな

る。高炉セメントB種の化学成分の一例<sup>[15]</sup>は、SiO<sub>2</sub> 25.9%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8.5%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.9%、CaO 54.8%、MgO 3.7%、SO<sub>3</sub> 1.9%である。高炉セメントの特徴として以下の点が挙げられる。

- ・短期の強度発現性は小さいが3ヶ月以上の長期では普通ポルトランドセメントを上回る。
- ・耐海水性、化学抵抗性に優れている。
- ・アルカリ骨材反応が生じにくい。

### ③ 低アルカリ性セメント（アーウィン系）（LAC）

アーウィン（3CaO・3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・CaSO<sub>4</sub>）ービーライト（2CaO・SiO<sub>2</sub>）を主成分とするセメントクリンカーに関する歴史は古く<sup>[16]</sup>、特に旧秩父セメント株式会社の研究者によって精力的に研究され、ガラス繊維補強コンクリート（Glass-fiber Reinforced Concrete、GRC）用へと続く流れとなるものである。GRC用セメントは現在国内では唯一量産されている低アルカリ性を主目的としたセメントである。

近年特に中国において研究、商品化がなされ、実際に多くの量が流通している。中国でのこの系のセメントの多くはGRC用セメントであり、建築外装への嗜好から装飾用のGRC部材が多く生産されている。しかし、GRC以外の用途にも使用されており、速硬セメントや補修用セメント、自己膨張性セメント、また厳寒期の工事用や、耐海水性から海洋構造物用など、特殊セメントとして実績がある。中国国内では用途によって細分されており<sup>[17]</sup>、規格化されている。

Zhang と Glasser<sup>[18]</sup> は、アーウィンービーライト系セメントについて、水和反応などの基礎研究、コンクリート試験、実構造物から採取したコンクリート試料についての評価など、幅広い内容の報告をしている。試験に用いられているクリンカーの化学組成は、CSA(calcium sulfoaluminate clinker)が、SiO<sub>2</sub> 3~13%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30~40%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1~3%、CaO 36~45%、SO<sub>3</sub> 8~15%であり、CSFA(calcium sulfoferroaluminate clinker)が、SiO<sub>2</sub> 3~13%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 25~35%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3~13%、CaO 43~50%、SO<sub>3</sub> 7~12%である。また、鉱物組成は、CSA が C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S̄ 55~75%、C<sub>2</sub>S 8~37%、C<sub>4</sub>AF 3~10%であり、CSFA が C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S̄ 33~63%、C<sub>2</sub>S 14~37%、C<sub>6</sub>AF<sub>2</sub> 15~35%である（但しセメント鉱物組成について、C : CaO、S : SiO<sub>2</sub>、A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、S̄ : SO<sub>3</sub>、F : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と表す）。セメントはこれらのクリンカーにセッコウを加えたものであり、用途によっては石灰石微粉末やスラグも添加されている。これらのセメントは以下の特徴が報告されている。

- ・ポルトランドセメントと同様にハンドリングできる。
- ・良好な強度発現性を示し、特に初期強度が非常に高い。
- ・炭酸化に対して抵抗性があり、硫酸塩や海水への抵抗性も高い。
- ・ガラス繊維やアルカリ反応性骨材に対し、ポルトランドセメントよりも影響が小さい。

最近では放射性廃棄物処分に使用することを目的にさらにpHが小さくなるセメントの開発が進められている。田熊ら<sup>[19]</sup>は、2種類のセメントクリンカーから4種類のアーウィン系セメントを調製し、その水和生成物が、いずれもエトリンサイト、C-S-Hゲル及びAl(OH)<sub>3</sub>ゲルであり、高pHの原因となる水酸化カルシウムやモノサルフェート水和物が存在しないことを確認した。藤田ら<sup>[20]</sup>は、この系のセメントで

は、高炉スラグ微粉末の含有量が低いほどpHが低く、同一クリンカーから作製した一連のセメントにおいてpHの調製が可能であることを見出している。高炉スラグ微粉末の混入によっても良好な初期強度を発現し、且つ11を下まわる低いpHを達成するために、セメント質量の20%のシリカフェームを添加した低アルカリ性セメントでは、長期的には10.5を下まわる低いpHとなったと報告されている。さらに、このセメントは普通ポルトランドセメントのJISの強度規格を満足することが確認されている。藤田らが調製したアーウィン系低アルカリ性セメントの化学組成は、CaO 38.80%、SiO<sub>2</sub> 18.70%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 19.50%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.59%、SO<sub>3</sub> 20.82%、MgO 0.93%、Na<sub>2</sub>O 0.11%、K<sub>2</sub>O 0.14%である<sup>[20]</sup>。

#### ④ 水砕スラグ系セメント(SC)

BWR、PWR発電所、再処理施設の低レベル放射性廃棄物の固型化材としてアルカリ活性スラグセメントが提案されている<sup>[21]</sup>。このセメントは主成分である高炉水砕スラグ(SiO<sub>2</sub> 39%、CaO 39%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12%、MgO 6%)がアルカリ材と反応することにより活性化され、水和反応が生じて硬化する。スラグセメントは微粉の水砕スラグとシリカフェーム、分散剤の混合物であり、ポルトランドセメントの成分は含まれていないが、固化体の主要鉱物はポルトランドセメントの水和物であるC-S-Hであり、得られる固化体は緻密で高強度であると報告されている<sup>[21]</sup>。

### (3) 確認項目及び確認方法

#### ① ブリーディング

土木学会標準示方書(JSCE-F522)に準拠し、試料をポリ袋の中に約20cmの高さまで充填した後、翌日まで静置させ、ブリーディングによって試料上面に浸み出した水(ブリーディング水)の発生状況を目視で観察した。ブリーディング水がある場合はその容量を測定した。

#### ② 圧縮強度

供試体の作製は、土木学会標準示方書(JSCE-F506)に準拠し、φ5 cm×10 cmの円柱供試体を同一条件の試験に対して4本製作し、4本の一軸圧縮強度の平均値をもって測定値とした。試験材齢は混練から7日後、及び28日後とし、室温20℃の密封条件で養生した。圧縮強度の測定は、土木学会標準示方書(JSCE-G505)に準拠した。供試体を圧縮試験機の加圧板の圧縮面に置き、衝撃を加えないように一様の速度で荷重を加え供試体が破壊するまでに試験機が示す最大荷重を求めた。

一軸圧縮強度の評価は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」(以下「埋設告示」という。)第4条に示される廃棄体基準(1.47N/mm<sup>2</sup>)と測定値を比較することにより行った。

#### ③ 溶出特性

溶出試験温度は20℃とし、試験方法は「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法 溶出試験」(昭和48年2月17日 環境庁告示第13号)第1-1(イ)に準拠して実施した。28日材齢の試料は粒径5 mm以下になるように粉碎後、ふるいを用いて0.5 mm以上5 mm以下になるように調製したものを使用した。試料 70gと純水 700mlをポリ容器に入れ、振とう器で6時間連続して振とうさせ、その後、孔径 1μmのガラスファイバーフィルターろ紙(GFP)を用いて吸引ろ過し、固液を分離した。液相試料を適量分取

し、前処理してICP発光分光光度計(バリアン社製VISTA-Pro Ax型)により、カドミウム、鉛を分析した。クロム(VI)は別途分取した液相試料を用いて、ジフェニルカルバジド吸光光度法により分析した。分光光度計は(株)島津製作所製UV-1700型を使用した。

重金属の溶出率の評価は、「重金属に係る土壤汚染調査・対策指針」(平成6年11月環水管第205号)に定められる溶出量基準値を目安とした。

表4.1-3に分析装置の定量下限値と溶出基準値を示す。

表4.1-3 排出基準値と本試験で用いた分析装置の定量下限値

分析項目	分析方法	基準値 (mg/l)	定量下限値 (mg/l)
鉛	JIS K-0102.54.3(2008)	0.3	0.05
クロム(VI)	JIS K-0102.65.2.1(2008)	1.5	0.02
カドミウム	JIS K-0102.55.3(2008)	0.3	0.01

(4) 混練条件

① 配合条件

本試験の配合条件を表4.1-4に示す。

表4.1-4 セメント材料及び重金属不溶化剤の性能確認試験の配合条件

セメント(g)	水(g)	焼却灰(g) <sup>※1</sup>	備考 <sup>※2</sup>
800	800	686	W:C:A=3.5:3.5:3 灰充填率30wt %

※1：不溶化剤の添加量は含まない。

※2：Wは水、Cはセメント、Aは焼却灰を示す。

② 混練フロー

重金属は焼却灰に含まれることを想定しているため、最初に焼却灰と重金属試薬の水溶液を混合した。セメントは水に接すると多量のイオンを放出することから不溶化剤の効果を阻害することが予測される。このため、灰と重金属のスラリーに不溶化剤を添加、混合した後にセメントを加えた。混練フローを以下に示す。

焼却灰+水+重金属水溶液+不溶化剤 混練(低速2分) → [SCの場合<sup>※</sup>  
25 %NaOH溶液添加] → 掻き落とし → セメント添加(静止1分) → 混練(低速2分) → 掻き落とし(停止30秒) → 混練(30秒)

※：セメントの性質上、水和反応の刺激剤としてアルカリを加える必要があるため。

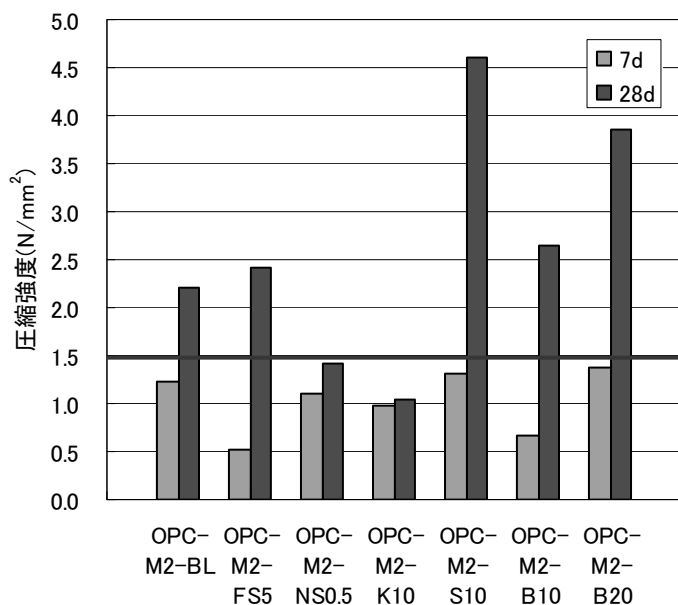
(5) 試験結果

① 普通ポルトランドセメント (OPC)

混練1日後に硬化し、体積膨張やブリーディング水は確認されなかった。

圧縮強度の測定結果を図4.1-1に示す。28日経過後の固化体の圧縮強度は硫化ナトリウムと天然ゼオライトを加えた固化体で1.47 N/mm<sup>2</sup>を下回ったが、それ以外の試験では1.47 N/mm<sup>2</sup>以上となった。

不溶化剤を加えていない固化体の溶出試験の結果を図4.1-2、不溶化剤を加えた固化体の溶出試験の結果を図4.1-3～図4.1-5に示す。普通ポルトランドセメント自体の重金属の溶出抑制効果は、カドミウムに対しては溶出基準値以下に抑えられているが、鉛に対しては溶出基準値を超え、また、クロム(VI)も溶出基準値と同値であり、これらに対する溶出抑制効果は見られなかった。一方、不溶化剤の効果は、鉛に対しては、人工ゼオライトを加えた固化体で溶出基準値以下に抑えられたが、他の不溶化剤は溶出基準値を超えており、効果が見られなかった。クロム(VI)に対しては、硫酸鉄、硫化ナトリウム、天然ゼオライトを加えた固化体で基準値以下に抑えられたが、人工ゼオライトとベントナイトは効果が見られなかった。カドミウムに対しては、いずれの不溶化剤も溶出基準値以下であるが、測定値が検出下限値以下であったため、不溶化剤自体の効果は確認できなかった。



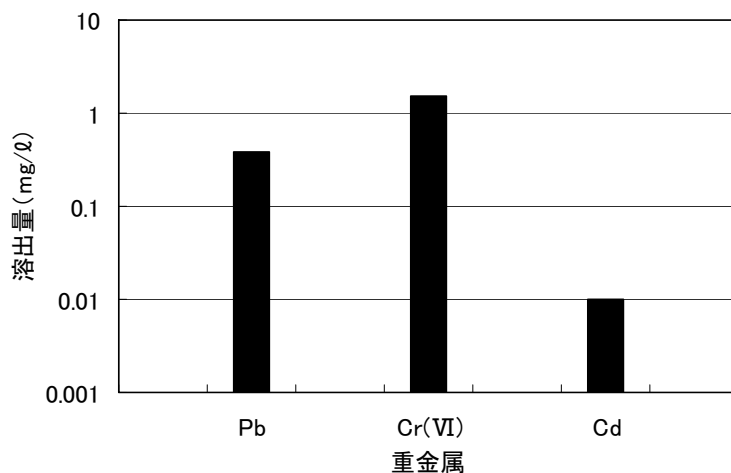
図中の太線は埋設告示値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10 : 天然ゼオライト 10%

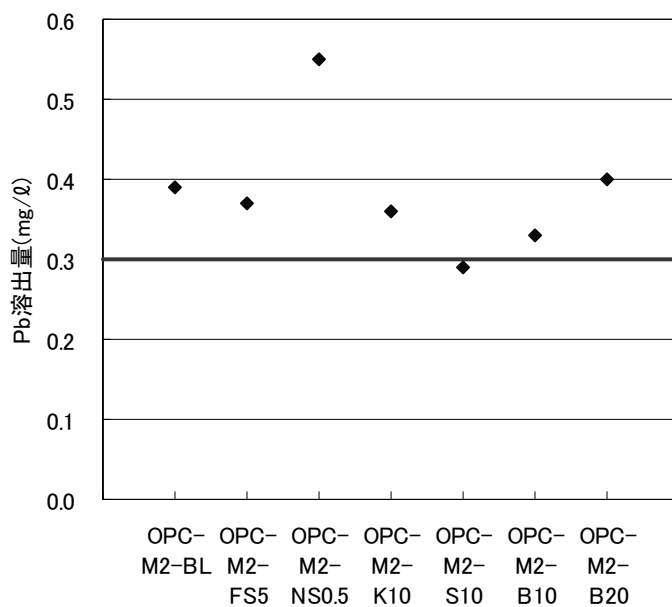
S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ベントナイト 10%、B20 : ベントナイト 20%

図4.1-1 OPCを用いたセメント固化体の圧縮強度測定結果



試験条件：灰量 30%、W/C比 1  
 溶出基準値：Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4.1-2 OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)



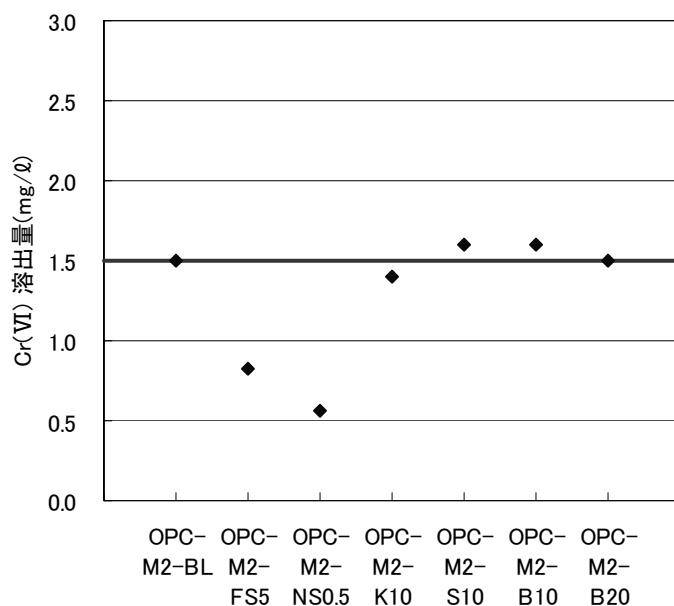
図中の太線は溶出基準値を示す。

M2：灰量 30%

BL：不溶化剤なし、FS5：硫酸鉄 5%、NS0.5：硫化ナトリウム 0.5%、K10：天然ゼオライト 10%

S10：人工ゼオライト 10%、B10：ベントナイト 10%、B20：ベントナイト 20%

図4.1-3 OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)



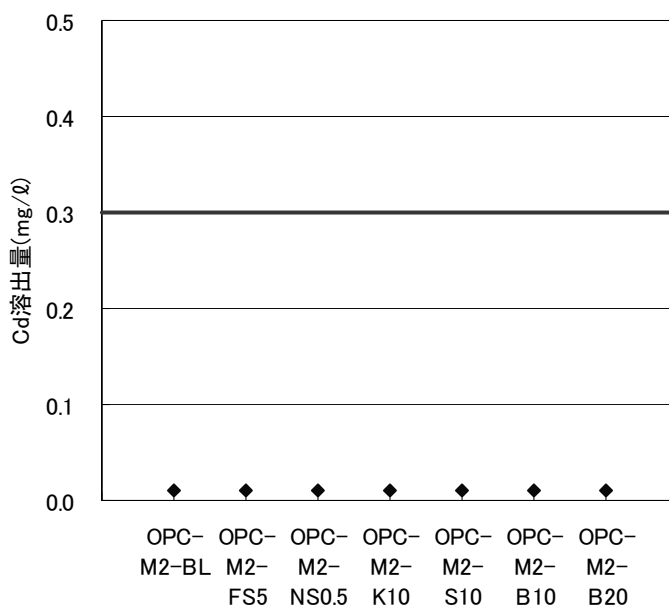
図中の太線は溶出基準値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%

S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ベントナイト 10%、B20 : ベントナイト 20%

図4.1-4 OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))



図中の太線は溶出基準値を示す。

全ての試験で測定値が検出限界値 (0.01mg/l) であったため、図中には検出限界値をプロットした。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%

S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ベントナイト 10%、B20 : ベントナイト 20%

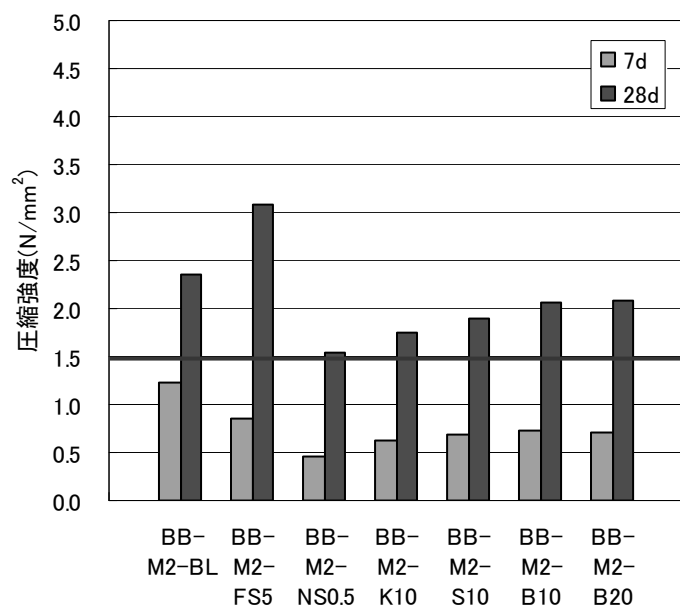
図4.1-5 OPCを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)

② 高炉セメント (BB)

混練1日後に硬化し、体積膨張は確認されなかった。また、ブリーディング水は、不溶化剤を加えていない固化体及び硫化ナトリウムを加えた固化体で少量のブリーディング水が確認されたが、その他の固化体では確認されなかった。

圧縮強度の試験結果を図4.1-6に示す。28日経過後の固化体の圧縮強度は全ての試験で1.47 N/mm<sup>2</sup>以上となった。

不溶化剤を加えていない固化体の溶出試験の結果を図4.1-7、不溶化剤を加えた固化体の溶出試験の結果を図4.1-8～図4.1-10に示す。高炉セメント自体が重金属の溶出抑制効果を有し、鉛、クロム(VI)、カドミウムのいずれも溶出基準値以下に抑えられており、普通ポルトランドセメントと比べて溶出抑制効果が高いことがわかった。一方、不溶化剤の効果は、いずれの不溶化剤も鉛、クロム(VI)、カドミウムの溶出量は溶出基準値以下であるが、不溶化剤を加えていない固化体と比べて顕著な差はなく不溶化剤自体の効果は見られなかった。



図中の太線は埋設告示値を示す。

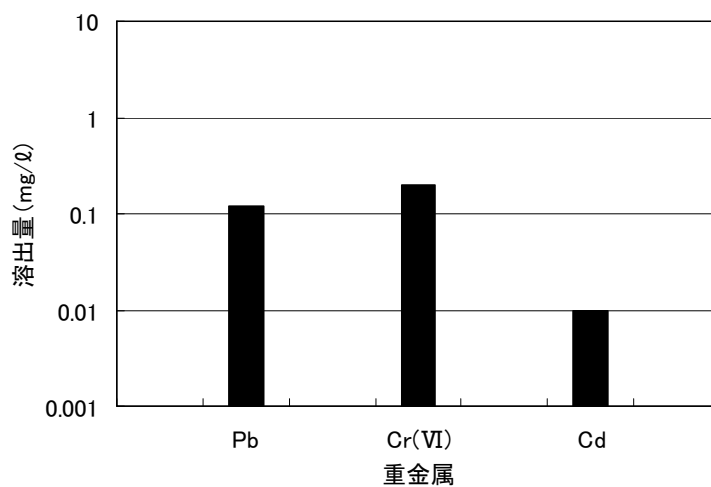
M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10 : 天然ゼオライト 10%

S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

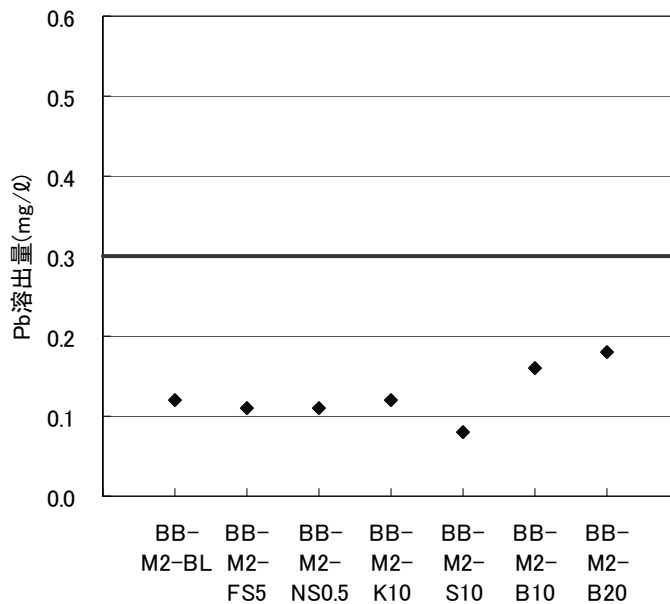
図4.1-6 BBを用いたセメント固化体の圧縮強度試験結果





試験条件：灰量 30%、W/C 比 1  
 溶出基準値：Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4.1-7 BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)



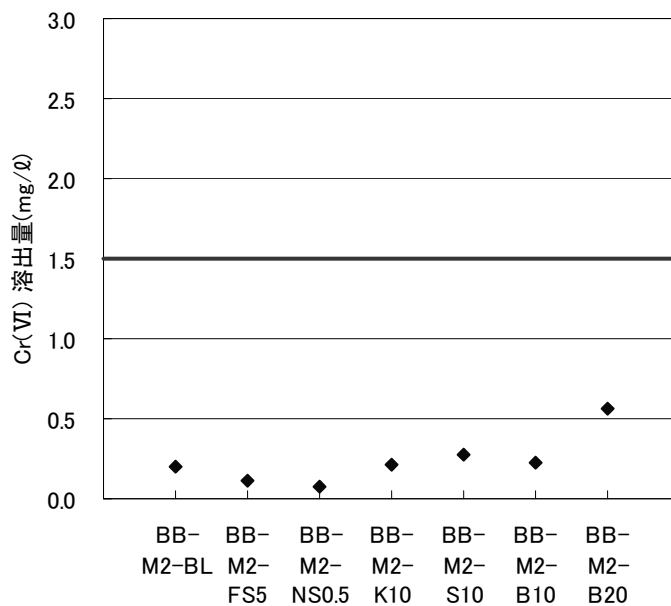
図中の太線は溶出基準値を示す。

M2：灰量 30%

BL：不溶化剤なし、FS5：硫酸鉄 5%、NS0.5：硫化ナトリウム 0.5%、K10：天然ゼオライト 10%

S10：人工ゼオライト 10%、B10：ベントナイト 10%、B20：ベントナイト 20%

図4.1-8 BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)



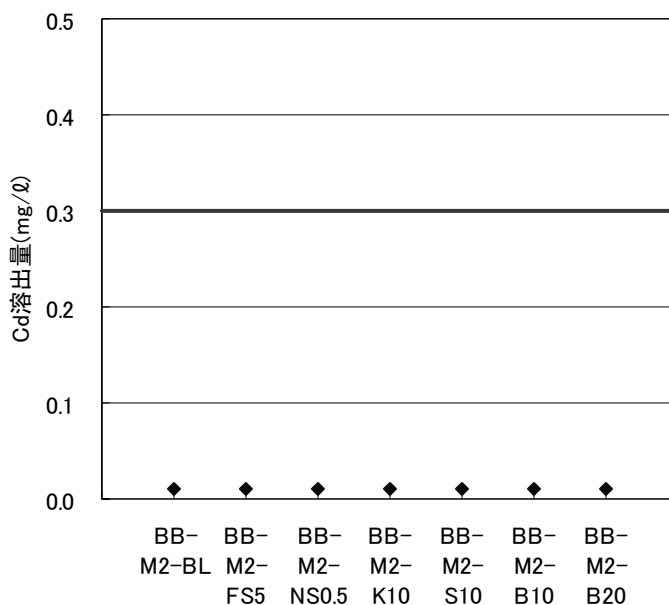
図中の太線は溶出基準値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%

S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

図4.1-9 BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))



図中の太線は、溶出基準値を示す。

全ての試験で測定値が検出限界値 (0.01mg/l) であったため、図中には検出限界値をプロットした。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%

S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

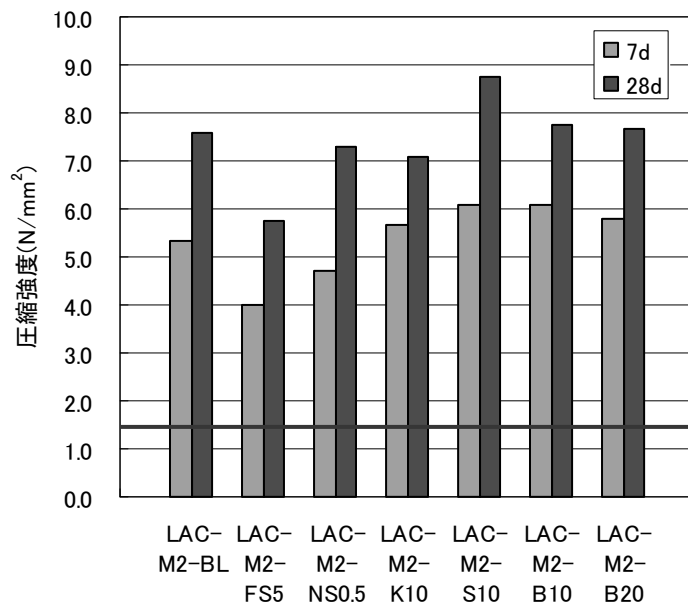
図4.1-10 BBを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)

③ 低アルカリ性セメント (LAC)

混練1日後に硬化し、体積膨張やブリーディング水は確認されなかった。

圧縮強度の試験結果を図4.1-11に示す。すべての試験で7日経過後の強度が1.47 N/mm<sup>2</sup>以上を示し、他のセメント材料に比べて高い強度が得られることを確認した。

不溶化剤を加えていない固化体の溶出試験の結果を図4.1-12、不溶化剤を加えた固化体の溶出試験結果を図4.1-13～図4.1-15に示す。低アルカリ性セメント自体の重金属の溶出抑制効果は、鉛、カドミウムに対しては溶出基準値以下に抑える効果が見られたが、クロム(VI)に対しては溶出基準値以下に抑えることができなかった。一方、不溶化剤の効果は、鉛に対しては、いずれの不溶化剤も測定値が検出限界以下であったため、不溶化剤自体の効果を確認することができなかった。クロム(VI)に対しては、硫酸鉄を入れた固化体で溶出基準値以下に抑えられたが、他の不溶化剤は効果が見られなかった。カドミウムに対しては、いずれの固化体も基準値以下に抑えられているが、不溶化剤を加えていない固化体と比べて顕著な差はなく不溶化剤自体の効果は見られなかった。



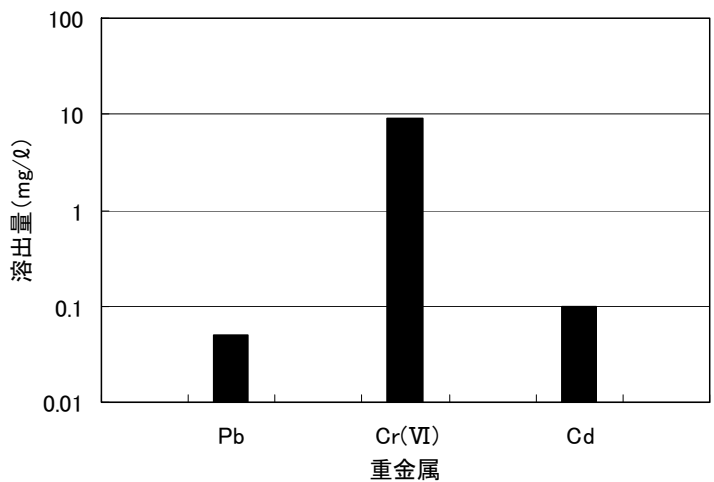
図中の太線は埋設告示値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10 : 天然ゼオライト 10%

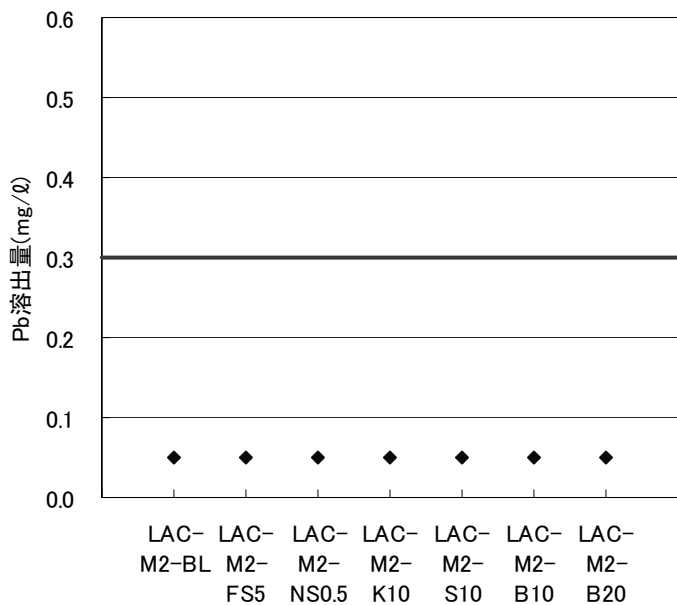
S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

図4.1-11 LACを用いたセメント固化体の圧縮強度試験結果



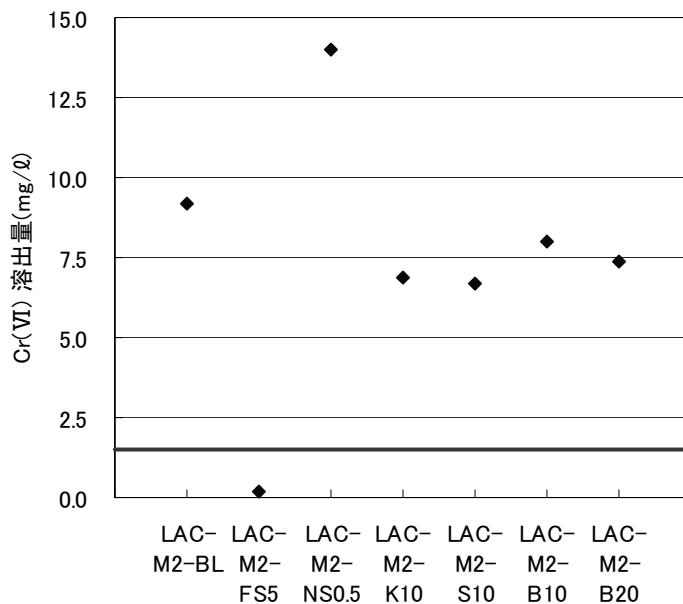
図中の太線は溶出基準を示す。  
 試験条件：灰量 30%、W/C 比 1  
 溶出基準値：Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4.1-12 LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(不溶化剤なし)



図中の太線は溶出基準値を示す。  
 全ての試験で測定値が検出限界値 (0.05mg/l) であったため、図中には検出限界値をプロットした。  
 M2：灰量 30%  
 BL：不溶化剤なし、FS5：硫酸鉄 5%、NS0.5：硫化ナトリウム 0.5%、K10：天然ゼオライト 10%  
 S10：人工ゼオライト 10%、B10：ベントナイト 10%、B20：ベントナイト 20%

図4.1-13 LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(鉛)

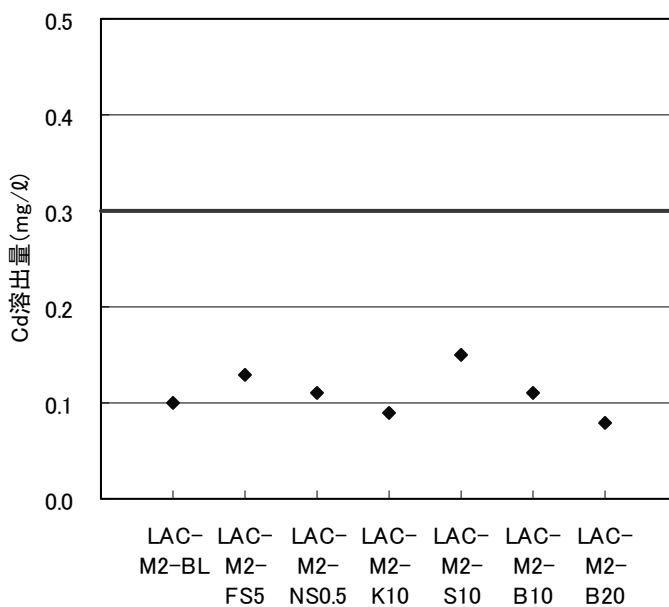


図中の太線は溶出基準値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%  
S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

図4.1-14 LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(クロム(VI))



図中の太線は溶出基準値を示す。

M2 : 灰量 30%

BL : 不溶化剤なし、FS5 : 硫酸鉄 5%、NS0.5 : 硫化ナトリウム 0.5%、K10:天然ゼオライト 10%  
S10 : 人工ゼオライト 10%、B10 : ペントナイト 10%、B20 : ペントナイト 20%

図4.1-15 LACを用いたセメント固化体の溶出試験結果(カドミウム)

④ 水砕スラグ系セメント (SC)

水砕スラグ系セメントを使った試験では、全ての試験で28日経っても硬化しなかった。原因の一つとして水砕スラグ系セメントを硬化させるために加える水酸化ナトリウム水溶液の添加量が適切でなかった可能性が高く、試験条件の見直しが必要となったため、これ以降の試験は省略することとした。

4.2 焼却灰充填率等の影響

4.1項セメント材料及び重金属不溶化剤の性能試験で、比較的良好な結果を得た高炉セメントと硫酸鉄及び低アルカリ性セメントと硫酸鉄の組合せで焼却灰の充填率や水セメント比を変えて混練状態や固化体の圧縮強度を調べた。また、混和剤を添加した場合の流動性（フロー値）への影響を調べた。

(1) 確認項目及び確認方法

ブリーディング、圧縮強度、溶出特性の確認は4.1項の確認項目及び確認内容と同じとした。また、流動性の確認はJASS 15 M-13「セルフレベリング材の品質基準」の測定方法に準拠して流動性を確認した。

(2) 試験に使用した試薬等

① セメント系材料と不溶化剤

高炉セメントB種 (BB) + 硫酸鉄 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 灰量の5 %

低アルカリ性セメント (LAC) + 硫酸鉄 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 灰量の5 %

② 焼却灰充填率及び水セメント比

一般的に焼却灰の充填率を上げた場合には、水セメント比を大きくする必要があり、これは同じ水セメント比でも焼却灰の充填率を変えると流動性や水和条件が大きく異なり、混練や硬化ができない事象が発生するためである。従って、固化条件の設定にあたっては事前に予備試験を実施して水セメント比を設定した。設定条件を表4.2-1に示す。

表4.2-1 焼却灰充填率等の影響確認試験の配合条件

灰充填率	水セメント比				
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
40% [M1]	—	—	○	○	○
30% [M2]	—	○	○	○	—
20% [M3]	○	○	○	—	—

③ 混和剤

化学混和剤レオビルドSP8（ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤）をセメントと焼却灰を合わせた粉体量に対して0.3%添加した場合と添加しない場合の比較を行った。

(3) 混練フロー

4.1項の試験と同じ操作とした。

## (4) 試験結果

## ① 焼却灰充填率、水セメント比、混和剤と圧縮強度との関係

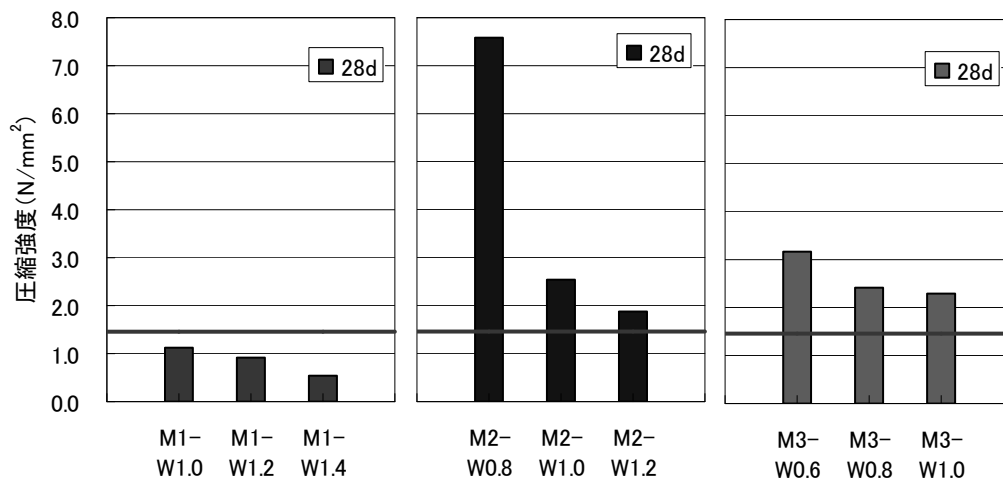
## i 高炉セメント (BB)

硬化に伴う体積膨張はなく、ブリーディング水は灰の充填量を30%、水セメント比を1とした固化体に少量のブリーディング水が確認されたが、他の固化体は確認されなかった。

圧縮強度の試験結果を図4.2-1、図4.2-2に示す。焼却灰の充填率と圧縮強度との関係は、一般的には焼却灰の充填率が高くなるほど圧縮強度が低下するが、高炉セメントではこの傾向が見られなかった。また、焼却灰の充填率を40%にした試験では28日経過した後でも十分な強度が得られなかった。これは硬化を阻害する成分が多く含まれていることや高炉セメントの安定性等が影響している可能性がある。水セメント比との関係では、灰の充填率が20%と30%の固化体で水セメント比が高くなるほど圧縮強度が低くなる傾向を示している。混和剤の添加の圧縮強度への影響はほとんど見られなかった。

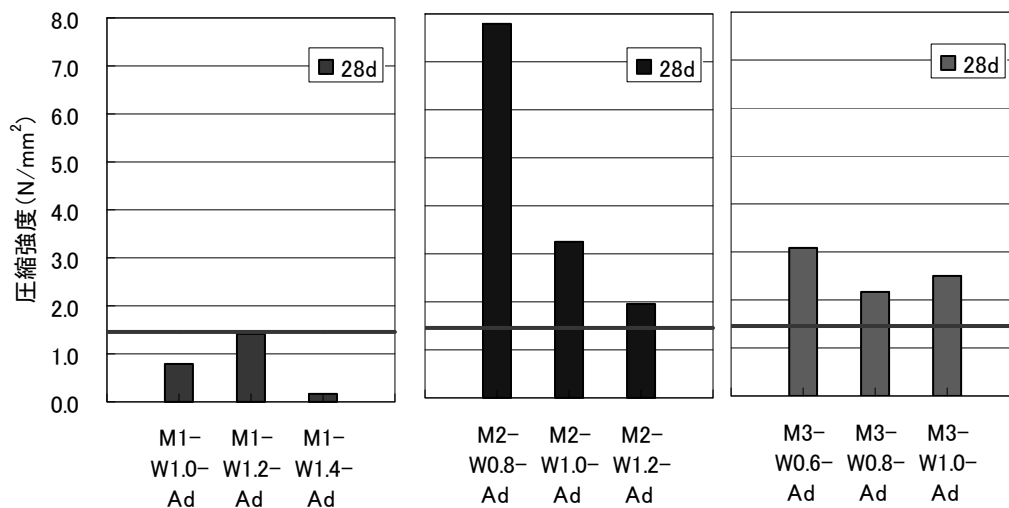
溶出試験の結果を図4.2-3、図4.2-4に示す。溶出試験では硬化が不十分だった焼却灰の充填率が40%の試験で鉛、クロム(VI)の濃度が高く基準値を上回った。カドミウムの濃度は全ての配合で測定下限値以下までに抑えることができた。充填率と溶出率との関係では、鉛、クロムが充填率40%の固化体で高い値を示したが、これは硬化が十分でないことが原因と推察され、充填率20%と30%の比較においては、大差はない。一方、カドミウムは全ての試験で検出下限値以下であったため傾向が確認できなかった。水セメント比との関係では、いずれの重金属も顕著な傾向は見られなかった。溶出率への混和剤の影響も小さかった。

フロー値の測定結果を図4.2-5に示す。灰の充填率が低くなるほど、また、水セメント比が高くなるほど流動性が高くなる傾向を示しているが、混和剤の有無による違いは大きくはなかった。



図中の太線は埋設告示値を示す。  
 Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す

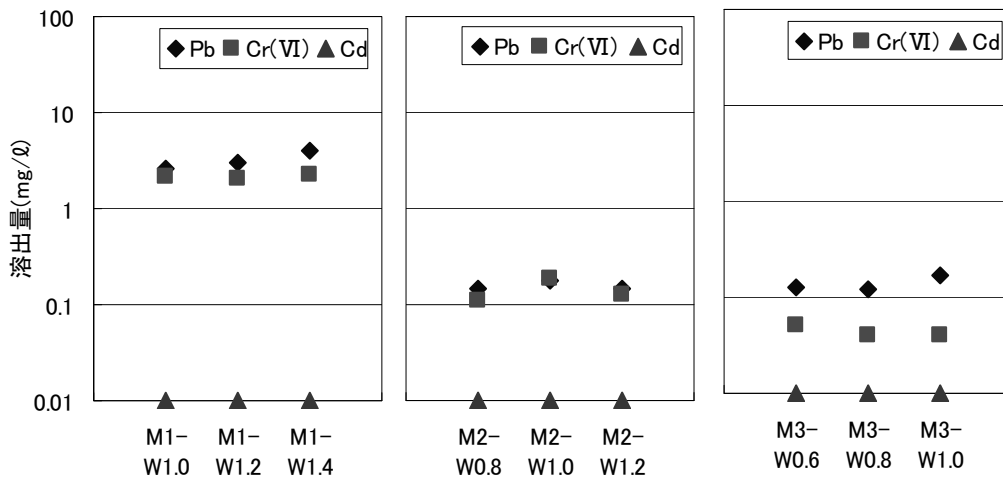
図4.2-1 BBを用いた固化体の圧縮強度測定結果（混和剤なし）



図中の太線は埋設告示値を示す。  
 Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す

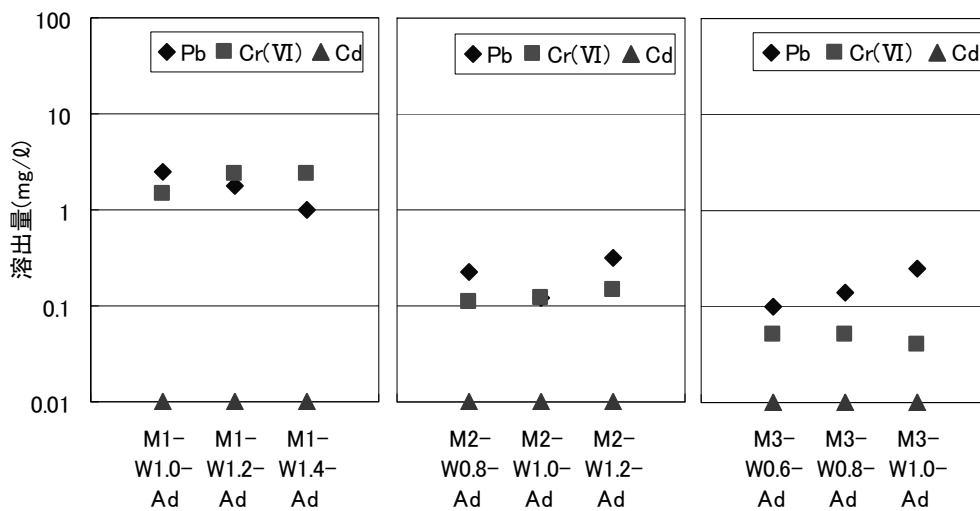
図4.2-2 BBを用いた固化体の圧縮強度測定結果（混和剤添加）





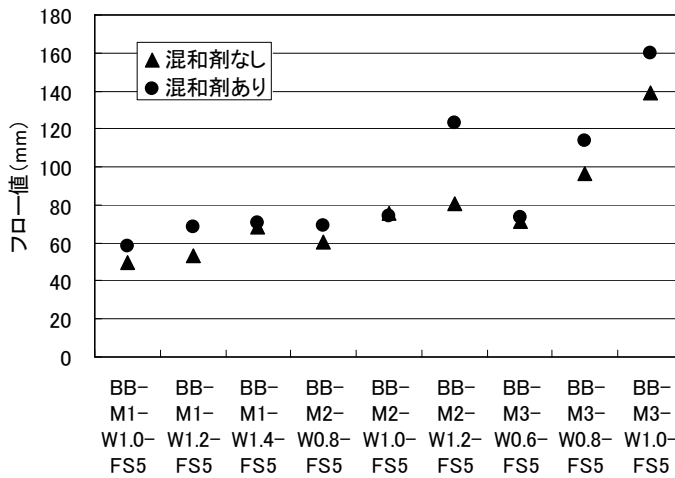
Cdについては全ての試験で検出限界値 (0.01mg/l) であったため、図中には検出限界値をプロットした。  
Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す  
溶出基準値：Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4. 2-3 BBを用いた固化体の溶出試験結果 (混和剤なし)



Cdについては全ての試験で検出限界値 (0.01mg/l) であったため、図中には検出限界値をプロットした。  
Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す  
溶出基準値：Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4. 2-4 BBを用いた固化体の溶出試験結果 (混和剤添加)



Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す

図4.2-5 フロー値の測定結果 (BB)

ii 低アルカリ性セメント (LAC)

混練1日後に硬化し、ブリーディング水も確認されなかったが、すべての固化体で1~4%の体積膨張が見られた。

圧縮強度試験の結果を図4.2-6、図4.2-7に示す。固化体の強度に関しては、高炉セメントでは7日経過しても硬化しなかったが、低アルカリ性セメントでは7日経過時点ですべての試験で1.47N/mm<sup>2</sup>を超える強度を示した。焼却灰の充填率と圧縮強度との関係では、焼却灰の充填率が高くなるほど圧縮強度が低下する傾向となった。水セメント比との関係も一般的な傾向と同様に水セメント比が高くなるほど圧縮強度が低くなる傾向であった。圧縮強度への混和剤の影響は小さかった。

溶出試験結果を図4.2-8、図4.2-9に示す。鉛とカドミウムは全ての試験で基準値以下まで抑えることができた。クロム(VI)は4.1項の試験で硫酸鉄を加えることで基準値以下に抑えることができたが、ここでは全て溶出基準値以上となった。この原因については、今後調べる予定である。焼却灰の充填率及び水セメント比と溶出濃度との関係では、鉛、クロムは顕著な傾向は見られなかったが、カドミウムは充填率が低い水準で溶出濃度が低くなる傾向が見られた。溶出率への混和剤の影響は小さかった。

フロー値の測定結果を図4.2-10に示す。灰の充填率が低くなるほど、また、水セメント比が高くなるほど流動性が高くなる傾向を示しているが、混和剤の有無による違いは大きくはなかった。

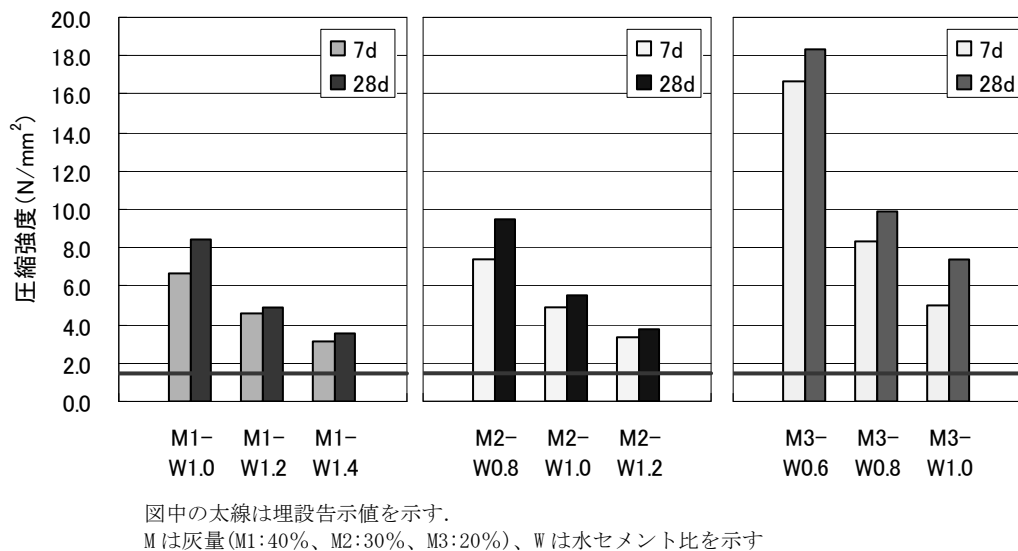


図4.2-6 LACを用いた固化体の圧縮強度試験結果（混和剤なし）

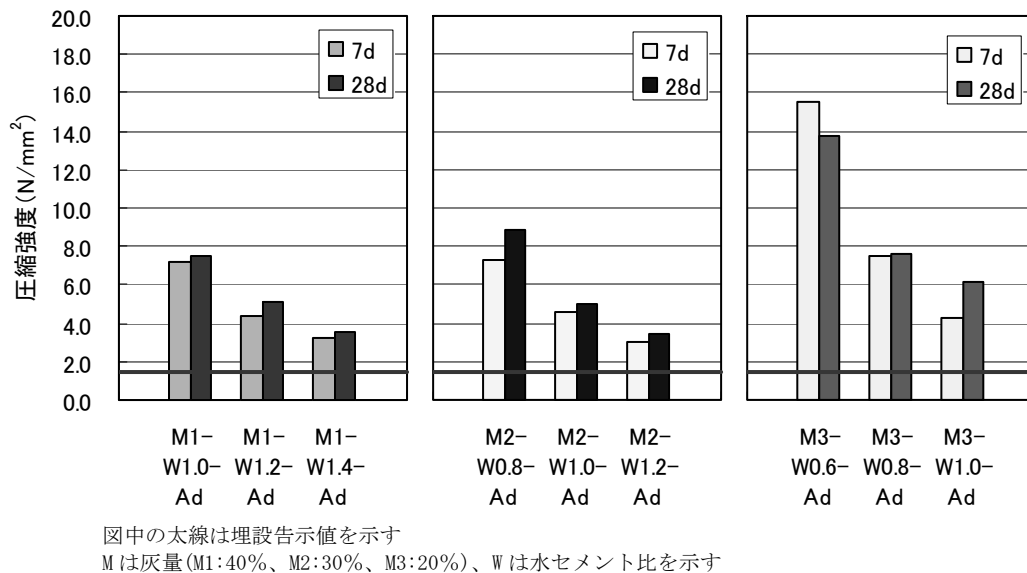
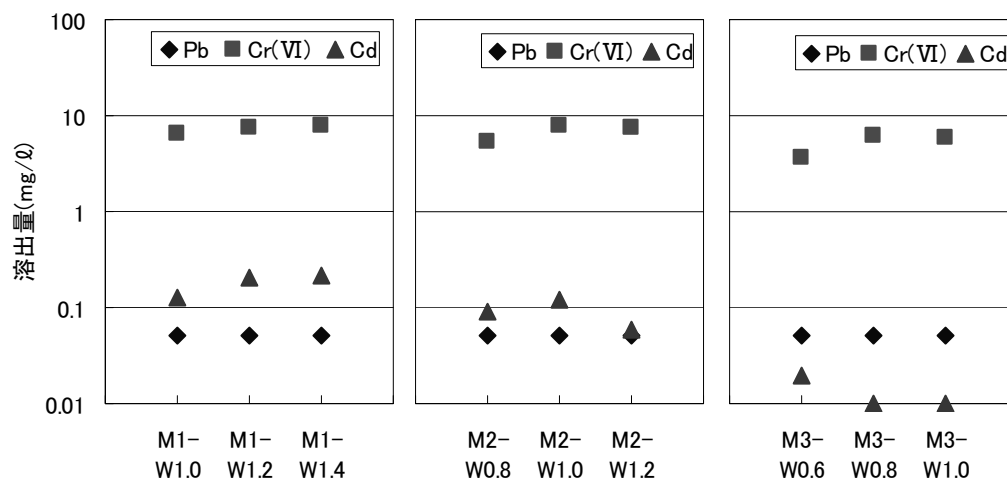
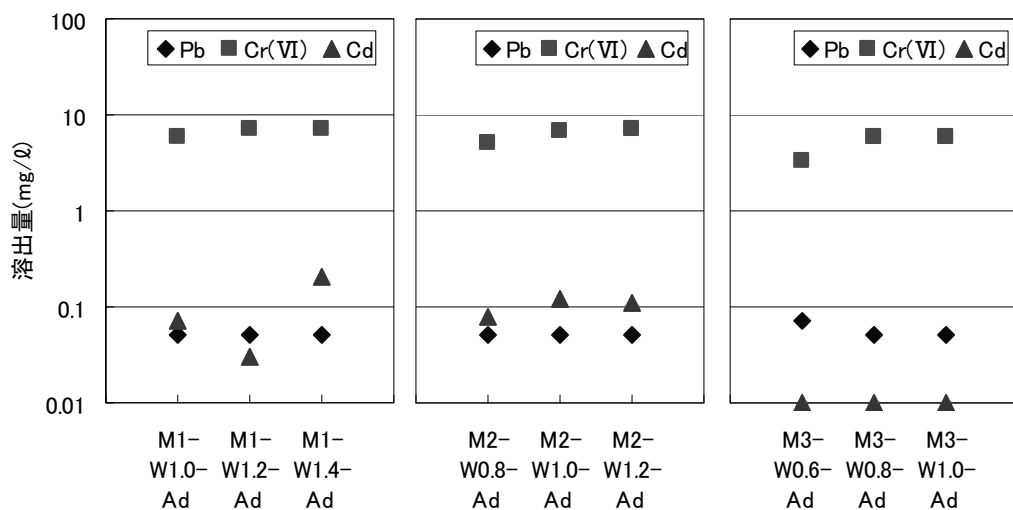


図4.2-7 LACを用いた固化体の圧縮強度試験結果（混和剤添加）



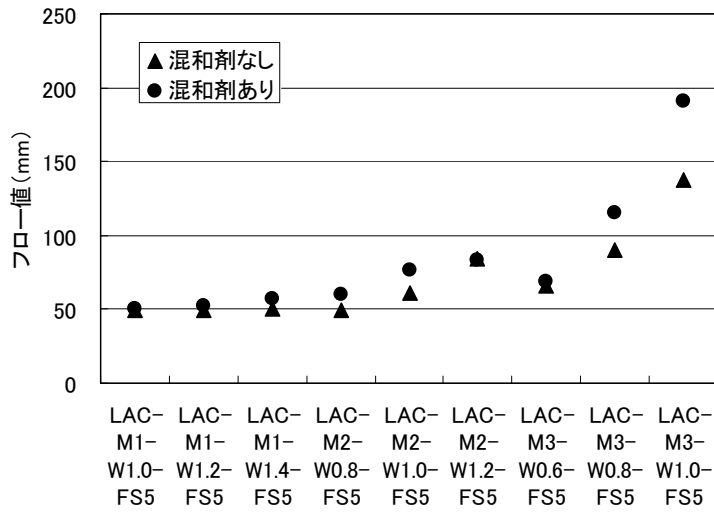
Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す  
M3-W0.8及びM3-W1.0の値は検出限界(0.01mg/l)以下であったため、検出限界値をプロットした。  
溶出基準値:Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4.2-8 LACを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤なし)



Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す  
M3-W0.6Ad、M3-W0.8Ad、M3-W1.0Adの値は検出限界(0.01mg/l)以下であったため、検出限界値をプロットした。  
溶出基準値:Pb 0.3mg/l、Cr(VI) 1.5mg/l、Cd 0.3mg/l

図4.2-9 LACを用いた固化体の溶出試験結果(混和剤添加)



Mは灰量(M1:40%、M2:30%、M3:20%)、Wは水セメント比を示す

図4.2-10 フロー値の測定結果 (LAC)

② 圧縮強度と溶出量の関係

セメント固化による重金属の固定化では、固化体組織の緻密化により固定能力の向上が期待できる。一般的には水和が進み緻密化と強度との関係は比例関係にあると考えられるため、ここでは圧縮強度と溶出量との関係を調べた。

i 鉛

圧縮強度と溶出量の関係を図4.2-11に示す。低アルカリ性セメントは高炉セメントに比べて全体的に圧縮強度が高く、ほとんどの固化体で溶出量は検出下限値以下まで抑えられている。高炉セメントの場合は強度の低い固化体で基準値を超えている。このことから鉛の溶出量を抑えるためには、セメントのアルカリ性環境を期待するだけでなくセメントの水和を十分に進行させ組織を緻密化させることも重要であると推察される。

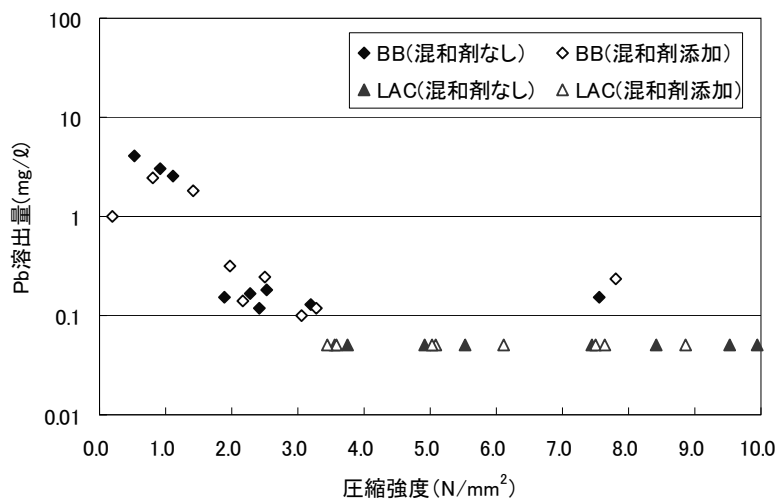


図4.2-11 圧縮強度と鉛溶出量の関係

ii クロム(VI)

圧縮強度と溶出量の関係を図4.2-12に示す。低アルカリ性セメントは固化体の圧縮強度に関らず全ての水準で溶出量が高いが、高炉セメントでは十分に硬化して強度が出ている固化体は基準値以下に抑えられている。高炉セメントにおけるクロム(VI)の溶出抑制効果は、スラグ中の還元物質とスラグの十分な水和が影響しているものと推察される。

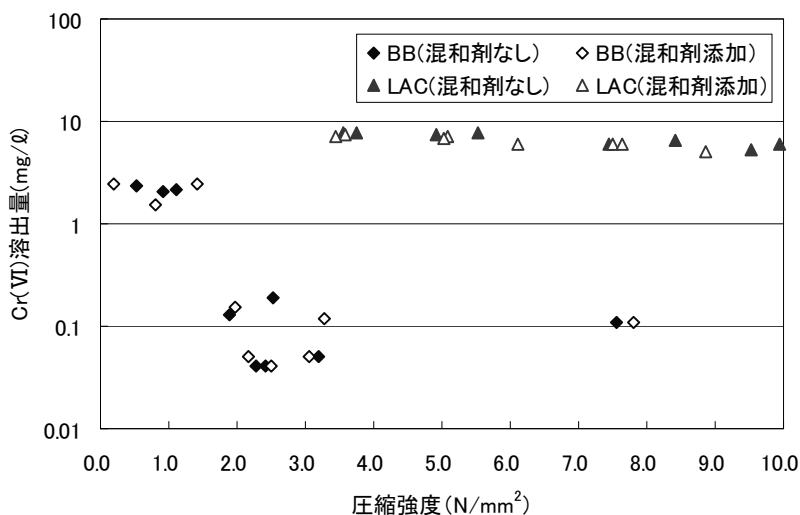


図4.2-12 圧縮強度とクロム(VI)溶出量の関係

iii カドミウム

圧縮強度と溶出量を図4.2-13に示す。低アルカリ性セメント及び高炉セメント共に全ての固化体（強度）で基準値以下の値を示した。圧縮強度の違いによる影響や傾向が見られないことから、カドミウムの溶出量に与える水和の進行の影響は小さいと考えられる。

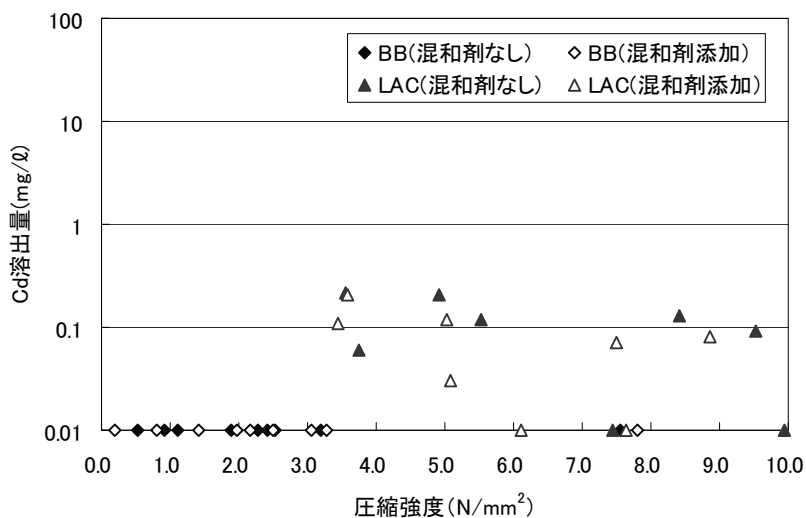


図4.2-13 圧縮強度とカドミウム溶出量の関係

4.3 固化遅延成分の影響

焼却灰の中には亜鉛成分や鉛成分などのセメント固化を遅延させる物質が含まれているものがあり、固化条件の設定にあたってはこれらの影響を確認しておくことが重要である。そこで高炉セメントと低アルカリ性セメントについて、焼却灰中の鉛と亜鉛成分を変化させて混練状態や固化体強度への影響を確認した。

(1) 確認項目及び確認方法

4.1項の確認項目及び確認内容と同じとした。

(2) 試験に使用した試薬等

① セメント系材料と不溶化剤

高炉セメントB種 (BB) + 硫酸鉄 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 灰量の5 %

低アルカリ性セメント (LAC) + 硫酸鉄 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 灰量の5 %

② 固化遅延物質含有量

硝酸鉛 ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) : 2.5、5.0、10.0 %

塩化亜鉛 ( $\text{ZnCl}_2$ ) : 7.5、10.0、12.5 %

灰の組成を表4.3-1に示す。

表4.3-1 試験に用いた焼却灰の組成

wt %

	各試験の組成比					
	Pb2.5	Pb5	Pb10	Zn7.5	Zn10	Zn12.5
Si	12.4	12.0	11.2	11.8	11.1	10.3
Al	7.6	7.4	6.9	7.3	6.8	6.3
Fe	2.9	2.8	2.6	2.7	2.6	2.4
Ca	29.6	28.6	26.8	28.2	26.4	24.5
Mg	2.6	2.5	2.4	2.5	2.3	2.2
S	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.2
Na	6.8	6.6	6.2	6.5	6.2	5.8
K	4.3	4.1	3.9	4.1	3.8	3.5
Ti	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.1
P	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.2
Cl	20.1	19.8	18.8	22.3	24.1	25.9
Cr	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Zn	4.9	5.0	5.0	7.5	9.9	12.5
Cd	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Pb	2.5	5.0	10.4	1.0	1.0	1.0

(3) 混練条件

① 配合条件

表4.3-2 固化遅延成分の影響確認試験の配合条件

セメント(g)	水(g)	焼却灰(g)	備考
800	800	686	W:C:A=3.5:3.5:3 灰充填率30wt %

※：Wは水、Cはセメント、Aは焼却灰を示す。

② 混和剤

使用せず

③ 混練フロー

4.1項の試験と同じ操作とした。

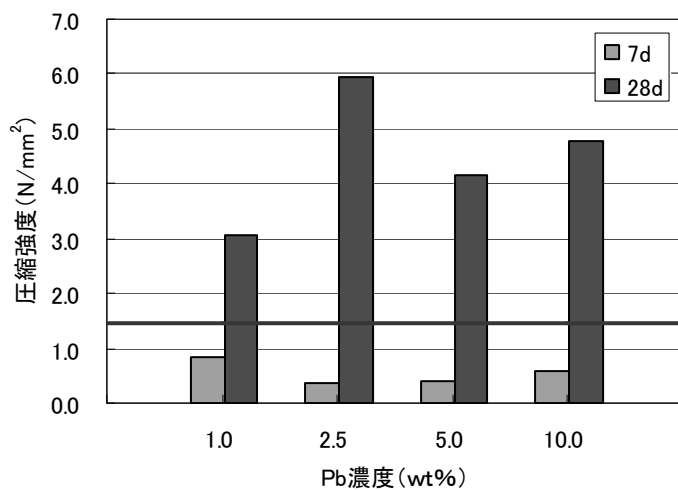
(4) 試験結果

① 鉛の影響

圧縮強度の試験結果を図4.3-1、図4.3-2に示す。高炉セメントの固化体は、灰中の鉛濃度と圧縮強度とに明確な傾向は見えないが、低アルカリ性セメントでは鉛量の増加に伴い圧縮強度が低下しているように見える。重金属がセメントの水和に与える影響は明確になっておらず、圧縮強度に影響する要因やメカニズム等は不明であるが、28日後の強度で見るといずれの固化体も1.47 N/mm<sup>2</sup>を超える強度が得られていることから、今回の濃度範囲では、強度を著しく低下させることがないことを確認した。

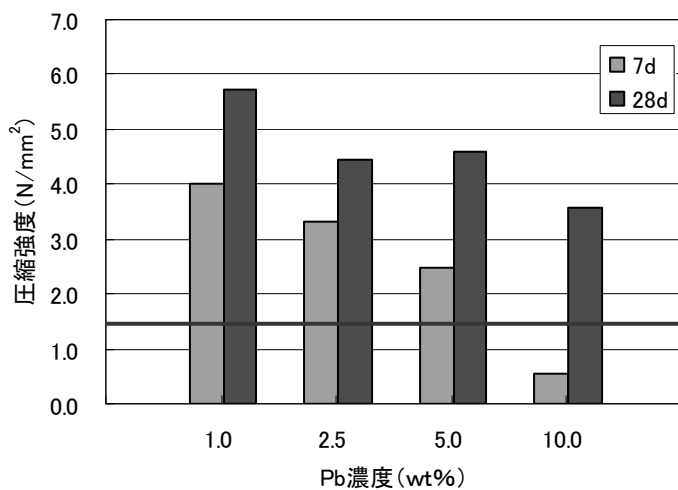
灰中の鉛量と重金属の溶出試験結果を図4.3-3、図4.3-4に示す。高炉セメントの固化体は、灰中の鉛量の増加に伴い鉛、クロム(VI)の溶出量も増加する傾向であるが、カドミウムはいずれも検出下限値以下で鉛濃度との相関は確認できなかった。特に鉛の溶出量の上昇傾向が大きい。これは灰中の鉛量が増加することで固定化しきれない鉛が増えたために溶出量が高くなったものと推察される。一方、低アルカリ性セメントの固化体では、灰中の鉛量が増加してクロム(VI)、カドミウム、鉛ともに溶出量はほとんど変化が見られず、鉛、カドミウムに対して高い固定化能を維持していることを確認した。クロム(VI)に関しては硫酸鉄の還元効果が現れていないことから、添加量等の適正化を検討する必要がある。





図中の太線は埋設告示値を示す.

図4. 3-1 灰の鉛濃度がBBセメント固化体の圧縮強度に与える影響



図中の太線は埋設告示値を示す.

図4. 3-2 灰の鉛濃度がLACセメント固化体の圧縮強度に与える影響

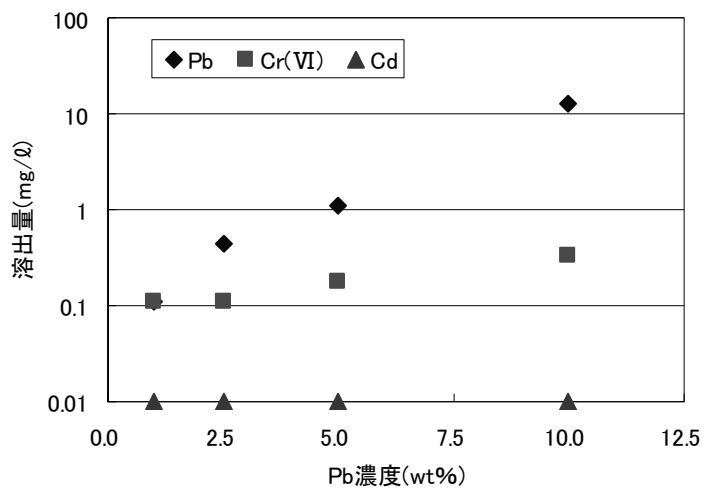


図4.3-3 重金属溶出量に及ぼす鉛濃度の影響  
(BB:高炉セメント固化体)

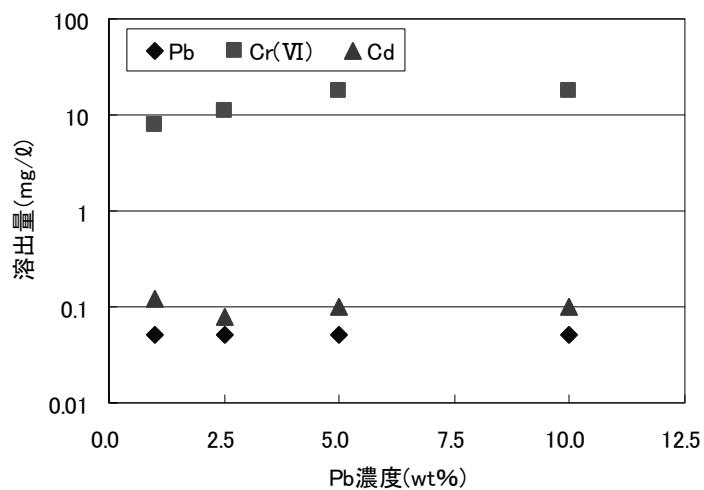


図4.3-4 重金属溶出量に及ぼす鉛濃度の影響  
(LAC:低アルカリ性セメント固化体)

② 亜鉛の影響

圧縮強度の試験結果を図4.3-5、図4.3-6に示す。高炉セメントの固化体は、亜鉛濃度と強度との相関に顕著な傾向は見られないが、低アルカリ性セメントの固化体では、亜鉛濃度が高くなるほど圧縮強度が低下する傾向を示した。いずれの固化体も28日後の強度では1.47 N/mm<sup>2</sup>を超える強度が得られており、今回の試験条件では強度を著しく低下させるような亜鉛濃度の影響は見られなかった。

亜鉛量を増加させた灰のセメント固化体からの重金属の溶出試験結果を図4.3-7、図4.3-8に示す。高炉セメントの固化体では、クロムが亜鉛の増加に伴って溶出量が高くなる傾向を示したが、鉛については顕著な傾向が見られなかった。また、カドミウムは検出限界以下で亜鉛濃度との相関を確認することができなかった。一方、低アルカリ性セメントの固化体は、いずれの重金属も亜鉛の増加で溶出量が大きく変化することなく、亜鉛の影響を受けにくいセメント材料であることが確認できた。

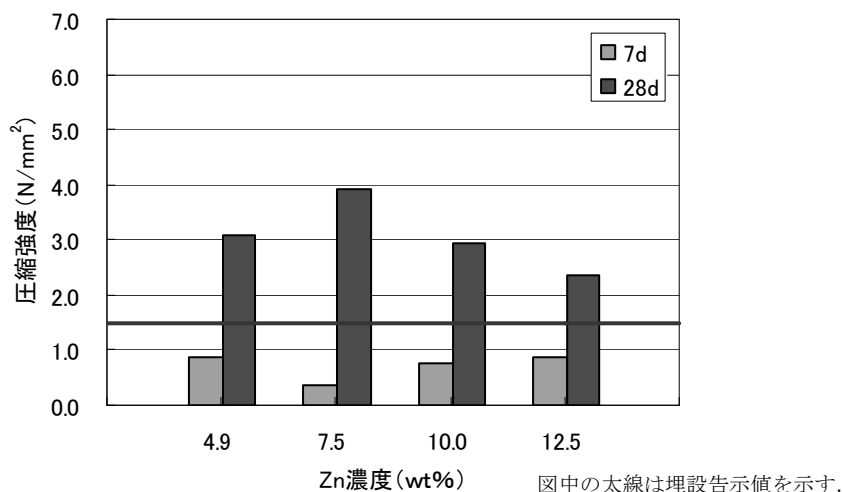


図4.3-5 灰の亜鉛濃度がBBセメント固化体の圧縮強度に与える影響

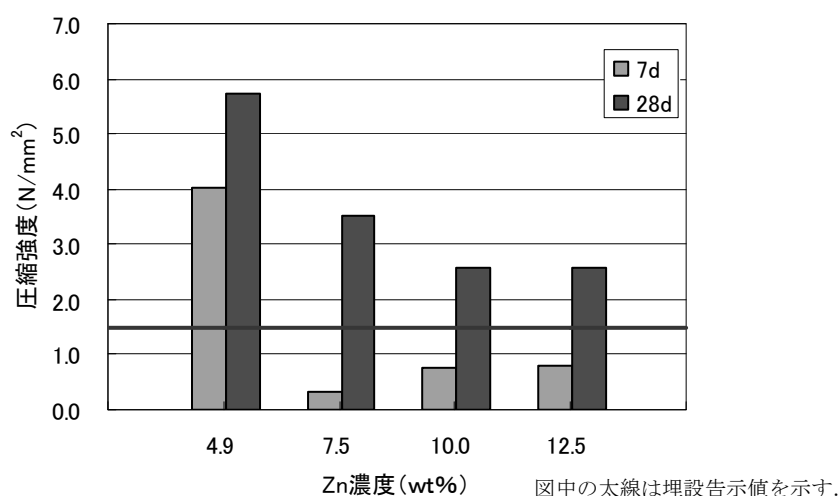


図4.3-6 灰の亜鉛濃度がLACセメント固化体の圧縮強度に与える影響

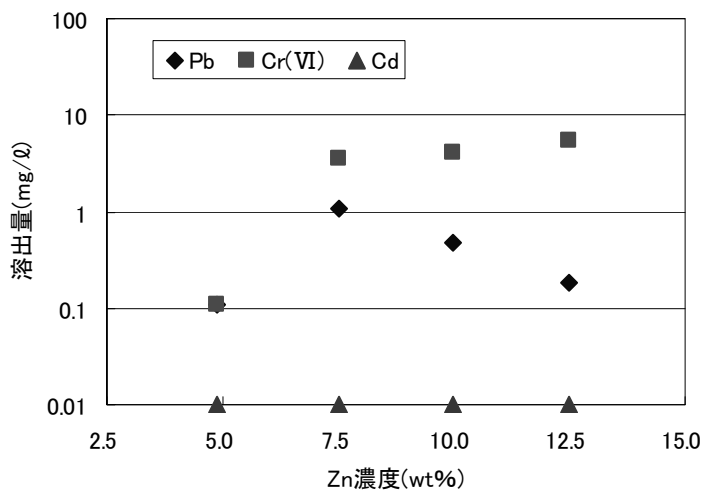


図4.3-7 重金属溶出量に及ぼす亜鉛濃度の影響 (BB:高炉セメント固化体)

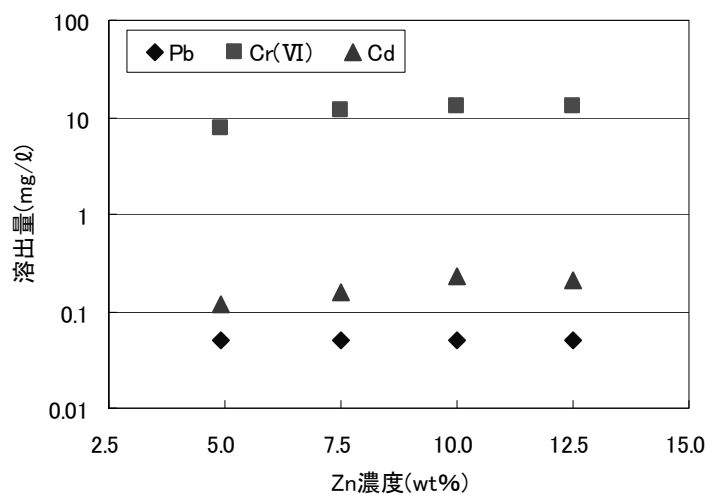


図4.3-8 重金属溶出量に及ぼす亜鉛濃度の影響 (LAC:低アルカリ性セメント固化体)

## 5. まとめ

焼却灰の基本的なセメント固化特性を把握するため、種々のセメント系材料と不溶化剤について、固化試験を実施し、固化体の圧縮強度や固化体からの重金属の溶出率等を調査した。また、合わせて焼却灰の充填率や水セメント比などの固化条件の影響を確認した。その結果、高炉セメントと低アルカリ性セメントが比較的良好な結果を示し、焼却灰の固型化材として候補材料となることが確認できた。

しかしながら、今回、試験に用いた焼却灰は飛灰であり、炉底灰に比べて灰の粒度や含有成分、組成比等が異なることから、炉底灰の固化処理に関しては、飛灰の固化条件と異なる可能性が高い。このため、セメント固化設備の設計にあたっては、更に炉底灰を使った固化試験を実施する必要がある。また、固化条件の検討に加え設備の安定運転や保守性の観点からもハンドリング性の良い配合条件を設定する必要があるとともに、固化体の品質を保証するためのデータ（均一性、空隙率、強度と超音波速度との相関データ等）の取得も必要である。更に処分評価や環境評価においては、重金属の不溶化や核種の閉じ込めなどについて固化体機能の向上が望まれることから、これらの点についても更に調査、試験しなければならない。

参考文献

- [1] 文部科学省：公開ホームページ  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shuppan/anzen/990301t.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/anzen/990301t.htm)
- [2] 若山正夫、他：集塵灰セメント固化物の浸漬試験、埼玉県公害センター研究報告、[23]、pp.39-44 (1996)
- [3] 小林信之、他：都市ごみ焼却灰のセメント固化への検討、第51回セメント技術大会講演要旨、pp.192-193 (1997)
- [4] 「廃棄物の焼却技術」志垣正信編・著、株式会社オーム社
- [5] 内川浩：セメントによる廃棄物、汚泥中の有害物の固定セラミックス12 (1977) No.2 pp.103-117
- [6] 「セメント化学雑論」セメント協会編
- [7] 社団法人セメント協会編、エンサイクロペディア
- [8] W.Lieber, Supplementary Paper II-22 The Influence of Lead and Zinc Compounds on the Hydration of Portland Cement, 5<sup>th</sup> ISCC, Vol. II, pp.444-453, 1968
- [9] 高橋秀夫、他、重金属を含む産業廃棄物のセメントによる固化に関する基礎的研究、小野田研究報告、第25巻、第3冊、第90号、pp.1-10(1973)
- [10] 公害防止の技術と法規編集委員会編：新・公害防止の技術と法規2009[水質編]分冊II、II-pp.208-217
- [11] 三木博史、他、複合汚染土壌の不溶化に関する室内試験、第3回環境地盤工学シンポジウム、pp.251-256 (1999)
- [12] 日東粉化工業株式会社：公開ホームページ  
<http://www.nittofunka.co.jp/HP/zeolit/zo-13.html>
- [13] 中部電力株式会社：公開ホームページ  
[http://www.chuden.co.jp/corporate/study/stu\\_other/circulash/yoto/index.html](http://www.chuden.co.jp/corporate/study/stu_other/circulash/yoto/index.html)
- [14] 秩父小野田株式会社「図表で見るコンクリートの基礎知識」
- [15] 「コンクリート総覧」笠井芳夫 編著
- [16] 福田延衛、山田盛男：ポルトランドセメント調合原料にセッコウを混合する実験、セメント技術年報、Vol.14、pp.124-129 (1960).
- [17] 蔵重勲、坂井悦郎：急伸する中国を訪ねてーセメント・コンクリート見聞録、セメント・コンクリート、No.699、May、pp.56-65 (2005).
- [18] L. Zhang and F. P. Glasser : New Concretes Based on Calcium Sulfoaluminate Cement, Modern Concrete Materials : *Binders, Additions and Admixtures*, R. K. Dhir and D. Dyer edited, Thomas Telford. London, pp.261-274 (1999).
- [19] 田熊靖久、藤田英樹、坂本浩幸、小林久美子、芳賀和子、宇智田俊一郎：アーウィン含有クリンカーセッコウスラグ系セメントの水和反応とpH挙動、日本セラミックス協会学術論文誌、第104巻 第11号、pp.1040-1047 (1996)
- [20] 藤田英樹、倉内英敏、半井健一郎、辻幸和：アーウィン系セメントを用いた低アルカリ性コンクリートのフレッシュ性状および硬化特性、セメント・コンクリート論文集、第61巻、pp.248-254 (2008)
- [21] 佐々木忠志、他：低レベル放射性廃棄物のスラグセメント減容固化処理技術、放射性廃棄物研究、Vol.3、No.2 (1997)

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	ルクス	lx		lm/m <sup>2</sup>
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		m <sup>2</sup> cd s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		SI単位	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
リットル	L, l	1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

