共同研究報告書
整理番号第311号

下水汚泥焼却灰の建設資材利用高度化のための焼却灰改質方法と安全性評価に関する共同研究報告書

（球形灰の耐酸性コンクリート材料への適用）

平成16年3月

独立行政法人土木研究所
株式会社クボタ
テイヒュー株式会社

Copyright © (2005) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第 311 号 2004 年 3 月

下水汚泥焼却灰の建設資材利用高度化のための焼却灰改質方法と安全性評価に関する共同研究報告書

リサイクルチーム　　上席研究員　鈴木穣＊
主任研究員　南山瑞彦＊＊
研究補助員　宮本綾子
＊　現、水質チーム　　上席研究員
＊＊　現、国土技術政策総合研究所　下水処理研究室　室長

株式会社クボタ　　古北克
武内晴彦
野邑尚史

テイヒュー株式会社　　瀬戸博
新田智博

要旨

下水汚泥焼却灰の有効利用推進を目的に、下水汚泥を溶融・球状化させて得られる球形灰を耐酸性コンクリートの材料に適用する検討を行った。テストプラントによる球形灰の製造及び特性分析、さらに耐酸性コンクリートの作成及び特性の検証実験を実施し、実用化に向けた評価を行った。球状化処理により焼却灰は低吸水性で流動性の高い球形灰へ改質され、またその重金属溶出は「鉄粉添加＋高温捕集」により土壌環境基準以下に抑制できた。また、耐酸性コンクリートは製品として求められる強度及び耐酸性を有していた。今後は，耐酸性コンクリートとして利用した場合のＲＣ構造物としての設計方法や力学的特性について把握することが必要である。

キーワード：下水汚泥焼却灰、建設資材利用、球形灰、耐酸性コンクリート、重金属

まえがき

下水道の普及に伴い下水汚泥の発生量は年々増加し、産業廃棄物総排出量の約 20%に達している。また、埋立処分地はひっ迫しており、循環型社会の形成のためにも廃棄物の減量化および有効利用が求められている。

下水汚泥の有効利用用途は現在のところセメント原料化が多くを占めているが、将来的にはセメント原料化による利用量の拡大は難しく、新たな利用技術の開発が必要である。

一方、下水道施設では、下水中の硫酸塩の影響でコンクリート構造物の腐食劣化する例が多く、耐酸性材料が求められている。

これまで、耐酸性コンクリートとして粉砕した下水汚泥溶融スラグを原料としたものが開発されていたが、粉砕スラグの代わりに下水汚泥焼却灰を粒子レベルで溶融・球状化させた球形灰を使用することで、材料物性の向上とコストの削減が期待できることがわかった。

このことから、平成 13 年度から平成 15 年度にかけて、独立行政法人土木研究所、株式会社クボタ、テイヒュー株式会社の 3 者で、球形灰を耐酸性コンクリート材料として適用するための共同研究を実施した。本報告書は、その成果をとりまとめたものである。

【 目　次 】

第１章　はじめに 1
1-1. 研究の背景 1
1-2. 研究の目的 1
1-3. 研究の名称 1
1-4. 実施期間 1
1-5. 共同研究者 1
1-6. 実施項目 1
第２章　建設資材の用途に応じた焼却灰特性の検討 2
2-1. はじめに 2
2-2. 灰に求められる物理特性 2
2-3. 灰に求められる化学特性 3
2-4. 灰に求められる安全性（重金属類溶出特性） 3
2-5. まとめ 4
第３章　焼却灰改質方法の研究開発 5
3-1. はじめに 5
3-2. 球状化設備について 5
3-2-1. 概略フロー 5
3-2-2. 主要諸元 5
3-2-3. 設備の外観 6
3-3. 球形灰の製造 6
3-3-1. 使用した原灰について 6
3-3-2. 炉の運転条件 10
3-3-3. 球形灰の定義 10
3-4. 分析項目と分析方法 11
3-5. 結果と考察 12
3-5-1. 球形灰の物理特性評価 12
3-5-2. 球形灰の化学組成評価 14
3-5-3. 球形灰の安全性評価（重金属類溶出性評価） 15
3-6. まとめ 17
3-7. モルタル・コンクリート試験への展開 18
第４章　耐酸性コンクリート製品への適応性調査 19
4-1. はじめに 19

4-2. 実験概要 19
4-2-1. モルタル試験 19
4-2-2. コンクリート試験 21
4-3. 結果と考察 24
4-3-1. モルタル試験 24
4-3-2. コンクリート試験 32
4-4. まとめ 52
第５章　実用化に関する検討 53
5-1. はじめに 53
5-2. 長期安定性評価 53
5-3. 耐酸性評価手法について 66
5-3-1. コンクリートの耐腐食性に関する評価手法の提案 66
5-3-2. 酸の浸透拡散抵抗性に関する評価手法の提案 67
5-4. 耐酸性コンクリートの適用範囲 67
5-5. 耐酸性コンクリートの販売価格 68
5-5-1. 試算条件 68
5-4-2. 耐酸性コンクリートの販売価格 68
5-6. 事業費の試算について 69
5-6-1. 想定する事業形態 69
5-6-2. 試算条件 70
5-6-3. 試算結果 70
第６章　まとめと今後の課題 72
6-1. まとめ 72
6-1-1. 焼却灰改質方法の研究開発 72
6-1-2. 耐酸性コンクリート製品への適応性調査 72
6-1-3. 実用化に関する検討 73
6-2. 今後の課題 76
第７章　添付資料 77
7-1. フローシート（球状化設備、灰溶融設備） 77
7-2. 耐酸性コンクリートに関する既存出典 77
7-3. 球形灰を用いた耐酸性コンクリートの発錆に関する実験 84
7-4. Si-K 灰, Ca-K 灰の作成方法 88
7-5. K 焼却灰の粉砕処理について 90

第１章　はじめに

1-1. 研究の背景

下水道施設では下水中に含まれる硫酸塩が嫌気条件下で硫酸塩還元菌により還元されて硫化水素となり、壁面等に付着後、硫黄酸化細菌により硫酸に酸化されて、コンクリート構造物やヒューム管の腐食劣化を引き起こす例が数多く報告されており、施設の高耐久化に向けた耐酸性材料の開発が望まれている。その様な状況の下、近年開発された「耐酸性コンクリート」は、耐酸性結合材であるアルカリ材料（水ガラス）とその硬化材であるガラス粉体材料を主原料とした耐酸性に優れたコンクリートであり、既に酸性腐食が進行しやすい温泉地での下水道管渠等で実績がある。また、硬化材であるガラス粉体材料には、水ガラスの硬化にプラスに作用するリンを多く含む材料が望ましいことから、現在下水由来のリンを多く含む下水スラグの粉砕物が有効利用されているが、粉砕プロセスによる製造コスト高が課題である。そこで、下水汚泥焼却灰（以下、焼却灰）を粒子レベルで溶融・球状化させて得られるパウダー状の球形灰が、粉砕スラグの代替として有効利用できれば、粉砕処理の削減による製造コストの低減に加え、球形灰のベアリング効果による流動性改善や加工性・施工性の向上といった効果が期待できる。

1-2. 研究の目的

上記背景より、本研究では

① 耐酸性コンクリートの材料に適した焼却灰の球状化技術の開発を行い、環境中での安全性を確認した上で、その物理的、化学的特性を把握すること、

② 球形灰の耐酸性コンクリートへの適応性を調査し、その製造技術を開発すること、

③ 球形灰を原料とした耐酸性コンクリート実用化に向けた総合評価（コンクリートの長期安定性、及びコスト評価）を行うこと、

の３点を目的とした研究を実施する。

1-3. 研究の名称

下水汚泥焼却灰の建設資材利用高度化のための焼却灰改質方法と安全性評価に関する研究

1-4. 実施期間

平成 13 年 12 月 から 平成 16 年 3 月 31 日まで　（３年間）

1-5. 共同研究者

独立行政法人土木研究所、株式会社クボタ、テイヒュー株式会社　（計３者）

1-6. 実施項目

① 建設資材の用途に応じた焼却灰特性の検討

② 焼却灰改質方法の研究開発（焼却灰の球状化処理技術）

③ 耐酸性コンクリート製品への適応性調査

④ 実用化に関する検討

第２章　建設資材の用途に応じた焼却灰特性の検討

2-1. はじめに

ここでは、まず建設資材として耐酸性コンクリート材料を用途とした際に求められる改質焼却灰（球形灰）の物理的、化学的特性、及び安全性を過去の出典（岡元ら；再生と利用、vol.23、No.86 (2000)、添付資料参照）から調べることを目的とする。

2-2. 灰に求められる物理特性

スラグを原料とした耐酸性コンクリートの強度発現性、耐酸性向上には、スラグを微細化して 5,000cm²/g 以上に比表面積（ブレーン値）を増大させ、水ガラスとの反応性を上げることが求められる（図 2-1)。一方、球形灰の比表面積は 2,000～2,500cm²/g 程度であり、スラグの代替に球形灰を使用する場合には留意が必要である。

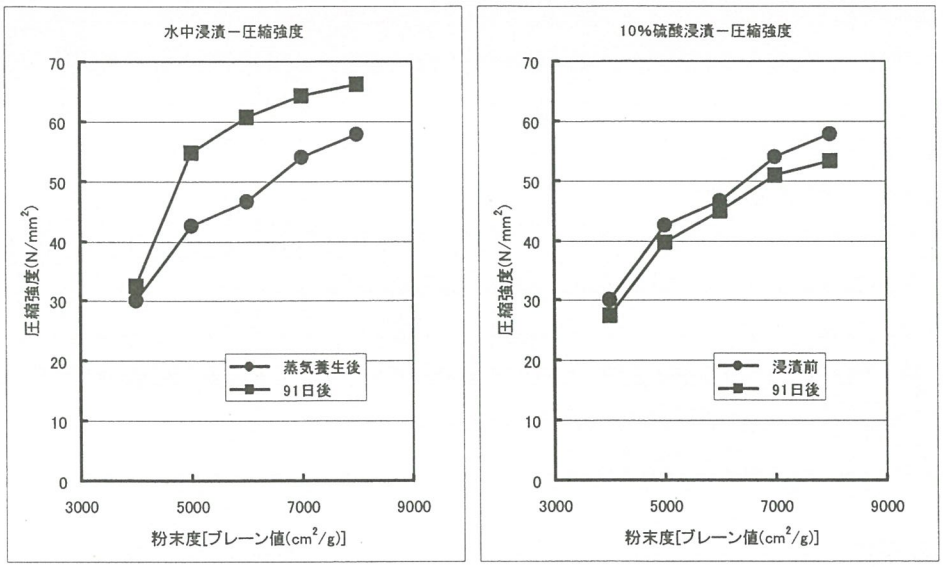


図 2-1　下水スラグのブレーン値と強度、耐酸性との関係

ここで、ブレーン値が 5,000cm²/g となる時の、球形灰の粒径（メジアン径）を算出する。
なお、算出に当たっては、球形灰は 100%真球化で、真比重を 2.5g/cm³ と仮定する。

$$\text{ブレーン値} = \frac{\text{粒当り表面積}(\mu m^2)\times 10^4\,(\mu m/cm)}{\text{粒当り体積}(\mu m^3)\times \text{真比重}\,(g/cm^3)}$$

$$= \frac{4\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2\times 10^4}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\times 2.5} = \frac{6\times 10^4}{d\times 2.5} = 5{,}000 \quad (cm^2/g)$$

これを解くと、　　メジアン径 d ＝ 4.8 μm

従って、ブレーン値 5,000cm²/g 以上を目指すのであれば、メジアン径を 4.8μm 以下まで微細化する必要がある。

2-3. 灰に求められる化学特性

(1) 塩基度（CaO/SiO_2 モル比）

耐酸コンクリート原料としてのスラグは、シリカ分が多くカルシウム分が低い、即ち低塩基度（0.5 以下）であることが望ましい。

(2) P_2O_5

スラグや球形灰は P_2O_5 を含むリン酸塩ガラスの一種とも考えられる。また、リンはガラスを不安定化させる作用があり、その不安定箇所から水ガラスが侵食され反応が進行すると考えられる。従って、P_2O_5 分はガラスの不安定化作用に加え、水ガラスの硬化材としての機能が期待できる。

2-4. 灰に求められる安全性（重金属類溶出特性）

下水汚泥焼却灰は有害物質として重金属類が濃縮されているため、安全性確保の観点からそれらの溶出を抑制することが求められる。最終処分場への埋立処分の際は、重金属類の溶出量が埋立て基準（金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令）以下であることが法律上求められる。一方、建設資材等として有効利用する場合、法的規制は定められていないが、埋立基準よりも厳しい基準である土壌環境基準（平成３年環境庁告示第 46 号）が指標として用いられることが多い。従って、本実験においては将来的な安全性に関する規制強化等を想定し、埋立基準よりもより厳しい「土壌環境基準」を指標に、球形灰の安全性を評価した。（表 2-1 参照）

表 2-1　焼却灰の処分、資源化に関する規定

基　準	判定因子	根拠となる法律・告示	備　考
埋立基準	溶出量	金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令（昭和 48 年総理府令第 5 号） 産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法（昭和 48 年環境庁告示第 13 号）	産業廃棄物の**埋立処分**における判定基準および検定方法
土　壌 環境基準	溶出量	土壌の汚染に係る環境基準について（平成 3 年環境庁告示第 46 号）	法的な規制基準ではないが、**資源化への指標**になるケースが多い

2-5. まとめ

上記検討結果より、耐酸コンクリート原料として球形灰に求められる特性を以下にまとめる。

表 2-2　球形灰に求められる特性

大区分	小区分	望ましい領域	備考
物理特性	比表面積	5000cm²/g 以上	既存出典※1 より
化学特性	塩基度	0.5 以下	既存出典※1 より
	P_2O_5	含有していること	既存出典※1 より
安全性	重金属類溶出特性	土壌環境基準を満たすこと	

※1：岡元ら、下水スラグを用いたヒューム管等の耐酸性コンクリート製品について、再生と利用、vol.23、No.86 (2000)

第３章　焼却灰改質方法の研究開発

3-1. はじめに

ここでは、第２章での検討結果をベースに、耐酸性コンクリート材料に適した焼却灰の球状化処理技術の検討を行う。

3-2. 球状化設備について

3-2-1. 概略フロー

焼却灰球状化テストプラントの概略フローを図 3-1 に示す。処理能力は約 100kg-灰/h で、焼却灰は炉頂に設置した球状化バーナから供給され 1800℃以上の火炎中を通過する際に粒子レベルで浮遊溶融し、その表面張力で球状となる。炉は円筒縦型であり、上部壁面を水冷構造とすることで溶融した灰の付着を防止しており、さらに中間部から冷却空気を供給する構造となっている。炉の主な特長は、①建設費が安価なこと、②炉内部に可動部がなく運転管理が容易なこと、③スラグの接触が少なく耐火物の浸食劣化が少ないこと、の３点である。球状化した灰は、排ガスと共に熱回収された後サイクロン及びバグフィルタで捕集される。

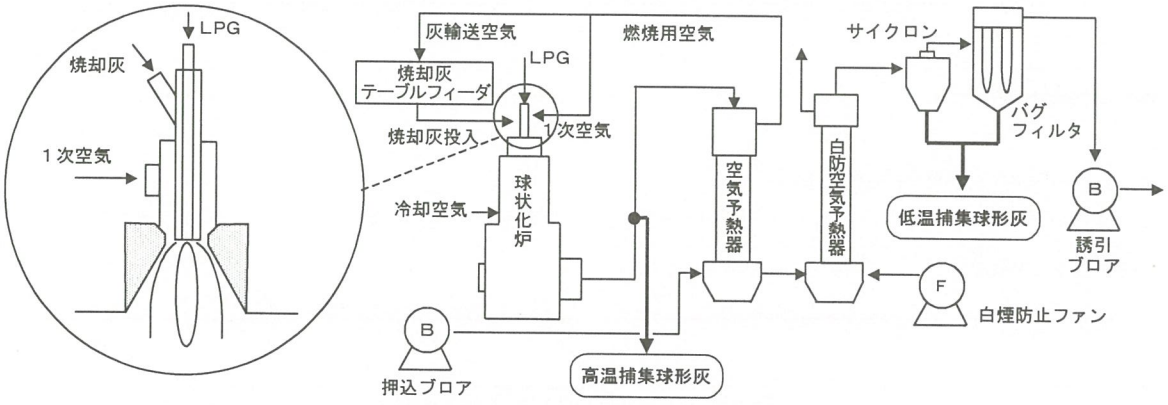


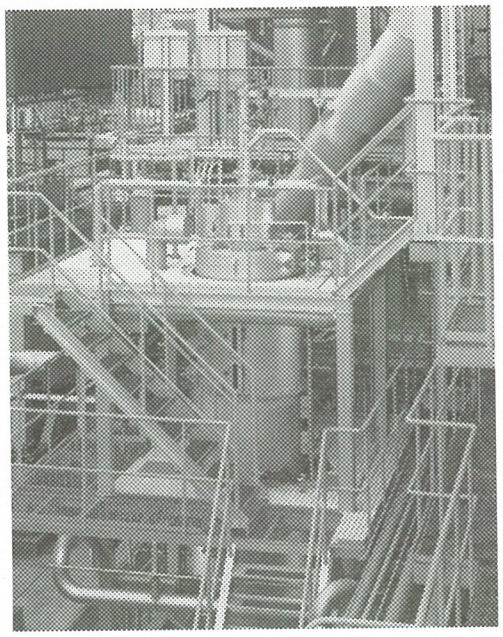
図 3-1　下水汚泥焼却灰球状化テストプラントの概略フロー

3-2-2. 主要諸元

表 3-1　球状化テストプラント　主要諸元

項　　目	内　　容
設 備 名 称	焼却灰球状化炉テストプラント
処 理 対 象	下水汚泥流動焼却灰（乾灰）
生　成　物	球形灰
処 理 規 模	30 ～ 40 kg-灰/h
炉　型　式	円筒縦型噴霧炉
概 略 寸 法	内径φ1100mm×高さ 4300mm
炉 内 温 度	約 1,400℃
燃　　料	LPG

3-2-3. 設備の外観



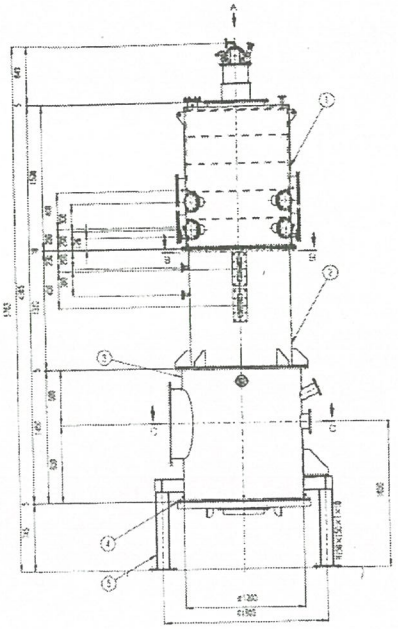


図3-2　球状化炉（テスト炉）外観図　（左図：外観図、右図：外形図）

3-3. 球形灰の製造

3-3-1. 使用した原灰について

(1) 原灰の種類

本実験では、下記６種類の原灰について、球状化処理による焼却灰改質を行った。

表 3-2　本実験で使用した原灰

No.	原灰名称	灰採取処理場	添加材		粉砕処理		備　　考
			種類	添加率		目標粒径	
1	K灰	K処理場（合流式）	—	—	—		
2	粉砕K灰	↑	—	—	○	10μm	
3	Ｃａ-K灰	↑	$Ca(OH)_2$	11.1 %/灰	—		N灰と同等の塩基度を目標とする
4	Ｓｉ-K灰	↑	SiO_2	14.4 %/灰	—		塩基度＝0.1 を目標とする
5	N灰	N処理場（分流式）	—	—	—		
6	Ｆｅ-Ｉ灰	Ｉ処理場（合流式）	鉄粉	5 %/灰	—		

以下に、各灰について説明する。

表 3-3　各試料の内容と球状化目的

試料名	内 容	球状化の目的
K　灰	合流式処理場からの焼却灰	基準の原灰
粉砕K灰	基準原灰をボールミルでメジアン径を10μm以下にまで微粉砕した灰である	球形灰の比表面積増大によるモルタル強度、及び耐酸性向上を目的とする
Ｃａ-K灰	基準原灰に消石灰を添加し、N灰と同等の塩基度としたもの	球形灰からの重金属類溶出の抑制、及びN灰との比較を目的とする
Ｓｉ-K灰	基準原灰にシリカ粉末を添加し、低塩基度(=0.1)としたもの	球形灰のガラス化率向上によるモルタル強度、耐酸性向上を目的とする
N　灰	分流式処理場からの焼却灰である	下水流入方式の違い、特にＰ含有量の違いとモルタルの強度、耐酸性との相関を調べることを目的とする
Ｆｅ-Ｉ灰	合流式処理場からのＩ灰に化学用鉄粉を5%添加した灰である。	球形灰からの砒素溶出抑制を目的とする。

(2) 原灰の理化学特性

① 物理性状

各原灰の物理性状を表 3-4 に示す。

K 灰を粉砕処理した粉砕 K 灰は、粒径（メジアン径）が 6.17μm であり、K 灰に比べブレーン値、吸水率が高くなった。

表 3-4　各原灰の物理性状

		K灰	粉砕K灰	Ca-K灰	Si-K灰	N灰	Fe-I灰
ブレーン値	cm^2/g	4,943	11,400	4,145	4,000	4,980	6,392
メジアン径	μm	35.6	6.17	37.6	36.9	24.6	23.8
吸水率	%	3.51	4.30	1.67	1.50	2.95	—
見掛比重	—	0.76	1.01	0.79	0.82	0.52	0.86
真比重	—	2.45	2.73	2.73	2.00	2.61	2.74

なお粉砕 K 灰を球状化することにより 100%真球になるものと想定すると、粉砕 K 球状灰の理論比表面積（ブレーン値）は、下記の通りになる。

$$\text{ブレーン値} = \frac{\text{粒当り表面積}(\mu m^2) \times 10^4\,(\mu m/cm)}{\text{粒当り体積}(\mu m^3) \times \text{真比重}\,(g/cm^3)}$$

$$= \frac{4\pi(\frac{d}{2})^2 \times 10^4}{\frac{4}{3}\pi(\frac{d}{2})^3 \times \gamma}$$

$$= \frac{6 \times 10^4}{d\ \gamma} = 3{,}560\ (cm^2/g)$$

ただし、 d = メジアン径 (μm)

γ = 真比重 (g/cm³)

② 化学組成

各原灰の化学組成を表 3-5 に示す。

いずれの灰も塩基度は 0.5 以下と、望ましい領域にある。

表 3-5　各原灰の化学組成

		K灰	粉砕K灰	Ca-K灰	Si-K灰	N灰	Fe-I灰
SiO_2	%	39.0	—	32.3	43.8	37.5	22.9
CaO	%	5.34	—	11.4	4.09	13.0	13.7
Al_2O_3	%	20.5	—	18.6	16.8	12.0	14.3
P_2O_5	%	14.2	—	16.9	16.1	14.4	26.2
Fe_2O_3	%	10.7	—	9.41	9.07	2.02	7.8
As	mg/kg	22.0	—	19.0	19.0	17.0	25.7
Se	mg/kg	5.0	—	5.0	5.0	1.0	2.9
Cd	mg/kg	5.7	—	5.7	5.3	6.2	6.6
Cr^{6+}	mg/kg	< 2	—	< 2	< 2	< 2	< 2
T-Hg	mg/kg	0.3	—	0.20	0.19	0.02	0.01
Pb	mg/kg	210	—	180	170	56	114
塩基度	—	0.14	—	0.35	0.09	0.35	0.49

③ 重金属類溶出特性

各原灰の重金属類溶出特性を表 3-6 に示す。

Ca-K 灰を除くいずれの灰についても砒素(As)とセレン(Se)の溶出が見られている。またK灰については、砒素、セレンに加え総水銀(T-Hg) の溶出が見られており、球形灰とした際に、それらの溶出が抑えられているか確認が必要である。

なお、Ca-K 灰は砒素、セレンともに土壌環境基準値未満の溶出量であった。これは、消石灰の添加により砒素とセレンがアルカリ条件で難溶性を示すカルシウム塩の形態で存在しているためであると考えられる。

表 3-6　各原灰の重金属類溶出特性

		K灰	粉砕K灰	Ca-K灰	Si-K灰	N灰	Fe-I灰	埋立基準	土壌環境基準
As	mg/L	0.12	—	< 0.01	0.02	< 0.01	0.23	0.3	0.01
Se	mg/L	0.14	—	< 0.01	0.29	0.04	0.09	0.3	0.01
Cd	mg/L	< 0.01	—	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.3	0.01
Cr^{6+}	mg/L	< 0.05	—	< 0.05	< 0.05	< 0.05	—	1.5	0.05
Pb	mg/L	< 0.01	—	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.3	0.01
T-Hg	mg/L	0.0006	—	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	—	0.005	0.0005
溶出液pH	—	7.7	—	11.3	7.0	11.7	—	—	—

注）埋立基準：金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令（埋立処分時の基準）
土壌環境基準：平成三年環境庁告示第 46 号（有効利用時の指標に用いられるケース有り）

(3) 添加材の性状

本実験で添加材に用いた珪砂、消石灰、鉄粉の性状を以下に示す。

表 3-7　添加材の性状（参考値）

項目		単位	SiO_2 粉末（珪砂）	$Ca(OH)_2$（消石灰）	鉄粉（化学還元用）
化学組成	SiO_2	%	99.85	—	—
	CaO	%	—	73.16	—
	Al_2O_3	%	0.0328	—	—
	Fe_2O_3	%	0.0251	—	—
	T-Fe	%	—	—	97.68
	M-Fe	%	—	—	94.63
	強熱減量	%	—	24.54	—
融点		℃	1600	—	—
真比重		—	2.60	—	—
見掛比重		—	—	—	2.11
粒径		μm	53～75 (200～300 メッシュ)	—	75 程度 (メジアン径)
粒度分布	150-250μm	%	—	—	1.8
	75-150μm	%	—	—	49.7
	53-75μm	%	—	—	16.0
	45-53μm	%	—	—	10.0
	<45μm	%	—	—	22.5

(4) 粉砕K灰、Ｃａ-K灰、Ｓｉ-K灰の調製方法

添付資料を参照。

3-3-2. 炉の運転条件

本実験では、球状化炉の運転を表 3-8 に示す条件を目安に行った。

表 3-8　球状化炉の運転条件（目安値）

項 目		単 位	値	備 考
温度	灰輸送空気	℃	80	
	燃焼用空気	℃	150 ～ 200	
	炉内（下部）	℃	800	
	炉出口	℃	780 ～ 800	高温捕集球形灰捕集温度
	サイクロン入口	℃	200 ～ 250	低温捕集球形灰捕集温度
	バグフィルタ入口	℃	130 ～ 170	低温捕集球形灰捕集温度
流量	炉内投入焼却灰量	kg/h	100	
	燃焼用空気	Nm_3/h	220	
	灰輸送空気	Nm_3/h	150	
	冷却空気	Nm_3/h	120	
	炉出口排ガス	Nm_3/h	510	
	LPG 量	Nm_3/h	14.0	
炉内圧力		mmH_2O	-15 ～ -20	

3-3-3. 球形灰の定義

本実験では、捕集方法別に 2 種類の球形灰を製造した。

(1) 低温捕集球形灰

サイクロン、バグフィルタで回収した灰を採取重量比で混合した球形灰である。なお、捕集温度は、130～250℃である。

(2) 高温捕集球形灰

排ガス中の砒素、セレンが、低温時において球形灰表面に再付着することを防止して球形灰を安全化（砒素とセレンを溶出抑制）することを目的に、球状化炉出口のダクトに図 3-4 に示す簡易型のろ過装置を設置し、高温で捕集した球形灰である。なお、捕集温度は 780～800℃である。

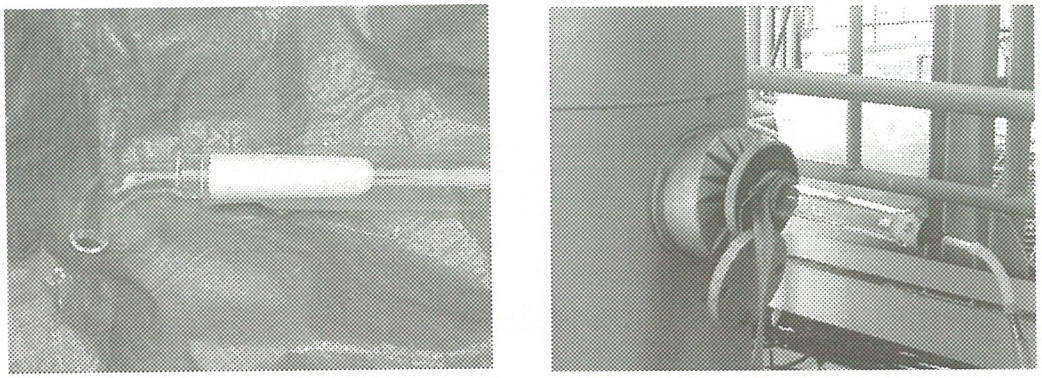


図 3-3　簡易型煙道ろ過装置　（左図：装置本体、右図：装置設置状況）

3-4. 分析項目と分析方法

本研究で製造したK球形灰の分析項目、及びその方法を表 3-9 に示す。

表 3-9　球形灰の分析項目と分析方法

項目＼条件		K灰		粉砕K灰		Ca-K灰		Si-K灰		N灰		Fe-Ⅰ灰		分析方法
		低温	高温	低温	高温	低温	高温	低温	高温	低温	高温	低温	高温	
化学組成	SiO_2	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	JIS K 0101
	CaO	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	環水管第 127 号
	Al_2O_3	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	環水管第 127 号
	P_2O_5	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	環水管第 127 号
	Fe_2O_5	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	環水管第 127 号
	As	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	環水管第 127 号
	Se	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	○	○	環水管第 127 号
	Cd	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	環水管第 127 号
	Cr^{6+}	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	環水管第 127 号
	T-Hg	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	環水管第 127 号
	Pb	○	○	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	環水管第 127 号
物理性状	比表面積	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	ブレーン法
	ﾒｼﾞｱﾝ径	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	レーザー回折法
	粒度分布	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	レーザー回折法
	吸水率	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	—	—	JIS A 1109
	見掛比重	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	JIS Z 8807
	真比重	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	JIS Z 8807
溶出試験	As	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	平成 3 年環告 46 号
	Se	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	平成 3 年環告 46 号
	Cd	○	—	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	平成 3 年環告 46 号
	Cr^{6+}	○	—	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	平成 3 年環告 46 号
	T-Hg	○	—	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	平成 3 年環告 46 号
	Pb	○	—	—	—	○	—	○	—	○	—	—	—	平成 3 年環告 46 号
	溶出液pH	○	○	○	○	○	—	○	—	○	—	○	○	平成 3 年環告 46 号

3-5. 結果と考察

3-5-1. 球形灰の物理特性評価

球形灰の物理性状を表 3-10 に示す。

表 3-10　球形灰の物理性状（1 / 2）

		K灰			粉砕K灰			Ca-K灰		
		原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰
ブレーン値	cm^2/g	4943	2105	2100	11400	2200	3500	4145	2534	—
メジアン径	μm	35.6	46.5	38.1	6.17	21.8	28.9	37.6	57.4	—
吸水率	%	3.51	1.66	—	4.30	3.91	—	1.67	1.44	—
見掛比重	—	0.76	1.44	1.37	1.01	1.57	1.34	0.79	1.37	—
真比重	—	2.45	2.40	2.43	2.73	2.44	2.48	2.73	2.53	—

表 3-10　球形灰の物理性状（2 / 2）

		Si-K灰			N灰			Fe-I灰		
		原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰（鉄無添加）	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰
ブレーン値	cm^2/g	4000	2085	—	4980	2400	—	6392	2863	1366
メジアン径	μm	36.9	52.2	—	24.6	21.9	—	23.8	15.3	42.3
吸水率	%	1.50	1.65	—	2.95	1.57	—	—	—	—
見掛比重	—	0.82	1.45	—	0.52	1.30	—	0.86	1.70	1.50
真比重	—	2.00	2.09	—	2.61	2.41	—	2.74	2.75	2.74

(1) 粒径分布

いずれの灰について、球状化処理により灰の粒径は増加する傾向が見られた。これは、球状化過程において隣接する粒子（焼却灰）が凝集したことに起因する、と推測される。

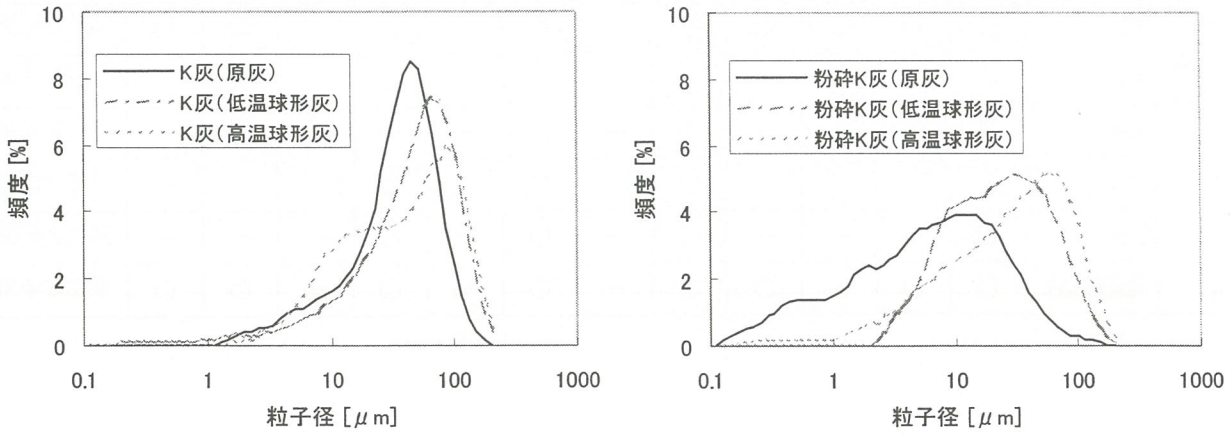


図 3-4　灰の粒度分布（左図：K 灰、右図：粉砕 K 灰）

(2) 比表面積（ブレーン値）

原灰に比べて球形灰の比表面積は低下する結果となった。この要因は、球状化処理により多孔性であった原灰の表面が球状化（円滑化）したこと、隣接粒子の凝集が起こり球形灰の粒径が大きくなったこと、の２つが考えられる。

なお、粉砕K灰の球形灰については、原灰を粉砕していないK球形灰に比べて比表面積を僅かに増大させることができた。しかし、当初の目標値であった 5,000cm²/g には至らず、球形灰の比表面積をそのレベルまで増大するには、原灰を微粉砕して球状化するのではなく、球形灰そのものを粉砕処理する必要がある、と考えられる。

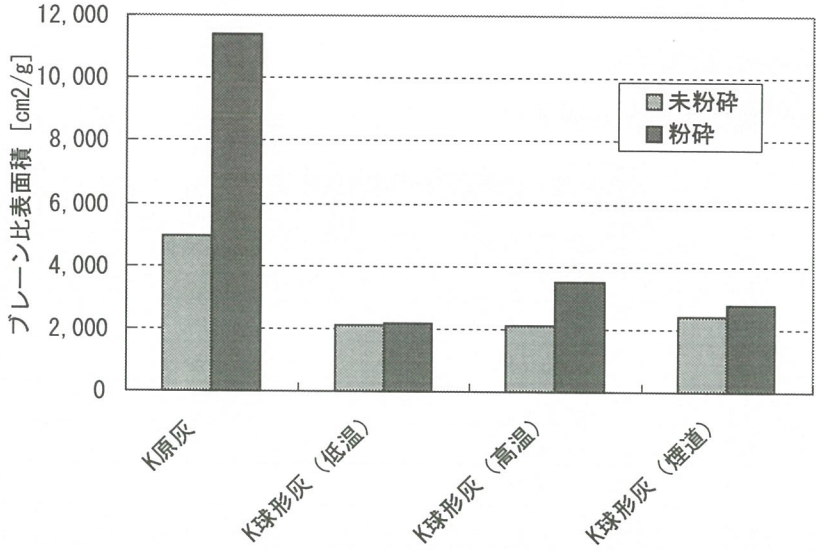


図 3-5　原灰、球形灰の比表面積（K灰）

(3) 吸水率

球状化により吸水率は低下する結果となった。これは、比表面積の場合と同様で、球状化処理により多孔性であった原灰の表面が球状化（円滑化）したことによる、と推察できる。

(4) 比重

見掛け比重は球状化により増加する結果となった。これは、焼却灰表面の空孔が球状化処理により灰の無機分で充填されたためである。また、真比重については、原灰、球形灰で違いは見られなかった。

(5) 球状化率について

K灰の原灰、低温捕集球形灰の顕微鏡写真を図 3-6 に示す。

これより、多孔性で凹凸がある原灰粒子は、球状化処理によりほぼ真球形状になっていることが確認できた。

また、球状化度合いの指標として定義した球状化率（粒子総数に対する真球粒子数の割合）は、この顕微鏡写真では 90%以上であった。

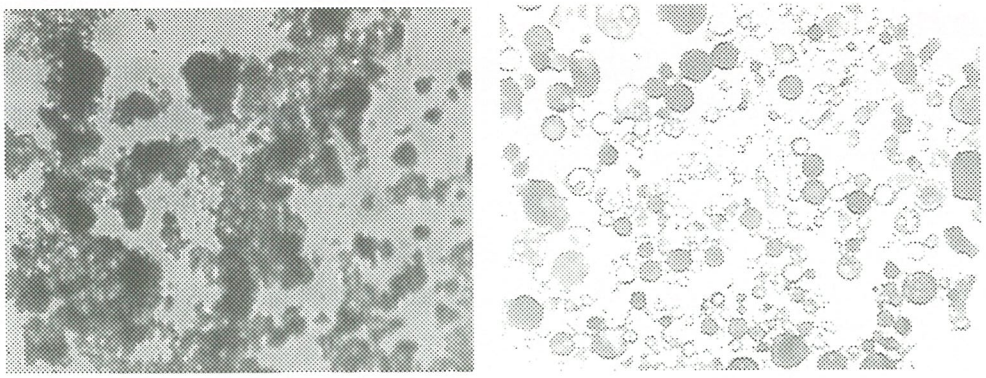


図 3-6　K 灰の顕微鏡写真（倍率 40 倍、左図：原灰、右図：低温捕集球形灰）

3-5-2. 球形灰の化学組成評価

球形灰の化学組成を表 3-11 に示す。

表 3-11　球形灰の化学組成（1 / 2）

		K灰			粉砕K灰			Ca-K灰		
		原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰
SiO_2	%	39.0	32.6	36.2	—	—	—	32.3	30.5	—
CaO	%	5.34	6.06	5.74	—	—	—	11.4	12.4	—
Al_2O_3	%	20.5	19.9	21.8	—	—	—	18.6	19.9	—
P_2O_5	%	14.2	14.4	15.6	—	—	—	16.9	9.71	—
Fe_2O_3	%	10.7	9.9	10.6	—	—	—	9.41	10.1	—
As	mg/kg	22.0	22.0	27.0	—	—	—	19.0	20.0	—
Se	mg/kg	5.00	2.00	< 1	—	—	—	5.00	5.00	—
Cd	mg/kg	5.70	6.50	5.60	—	—	—	5.70	6.00	—
Cr^{6+}	mg/kg	< 2	< 2	< 2	—	—	—	< 2	< 2	—
T-Hg	mg/kg	0.3	< 0.01	< 0.01	—	—	—	0.20	< 0.01	—
Pb	mg/kg	210	220	28	—	—	—	180	190	—

表 3-11　球形灰の化学組成（2 / 2）

		Si-K灰			N灰			Fe-I灰		
		原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰	原灰 (鉄無添加)	低温捕集球形灰	高温捕集球形灰
SiO_2	%	43.8	40.6	—	37.5	24.0	—	24.4	22.5	27.2
CaO	%	4.09	4.95	—	13.0	14.4	—	11.9	9.4	7.7
Al_2O_3	%	16.8	17.2	—	12.0	15.0	—	—	—	—
P_2O_5	%	16.1	14.7	—	14.4	27.5	—	25.1	28.1	22.4
Fe_2O_3	%	9.07	9.28	—	2.02	3.23	—	12.2	19.2	21.7
As	mg/kg	19.0	17.0	—	17.0	27.0	—	24	21	14
Se	mg/kg	5.00	2.00	—	1.00	3.00	—	4	6	< 1
Cd	mg/kg	5.30	6.50	—	6.20	6.90	—	—	—	—
Cr^{6+}	mg/kg	< 2	< 2	—	< 2	< 2	—	—	—	—
T-Hg	mg/kg	0.19	< 0.01	—	0.02	0.01	—	—	—	—
Pb	mg/kg	170	220	—	56.0	120	—	—	—	—

これより、Fe-I 灰以外の灰については、原灰と低温捕集球形灰との間に大きな組成変化はなく、高温捕集により原灰に比べてセレン(Se)と鉛(Pb)の含有量が減少する結果となった。

一方、Fe-I 灰では高温捕集により Se に加え、砒素(As)の含有量が減少した。これは、鉄粉が還元剤として作用して As の揮発が促進し、さらに高温捕集により揮発した As が一部排ガス側へ移行したため、と推察できる。(ヒ酸塩の融点：1000℃以上、As 昇華点：613℃)

3-5-3. 球形灰の安全性評価（重金属類溶出性評価）

(1) 低温捕集球形灰

サイクロン、バグフィルタで捕集した低温捕集球形灰からの重金属類溶出量を表 3-12 に、また結果に対する考察を以下に示す。

① K 灰，粉砕 K 灰，Si-K 灰，N 灰について

原灰、球形灰ともに、As と Se が土壌環境基準を超えて溶出する結果となった。その原因として、高温下での球状化処理により揮発した As と Se（昇華点：砒素単体＝613℃、二酸化セレン＝317℃）が、昇華点以下での捕集過程において、球形灰表面に凝縮付着したことによると推察される。

なお、他の重金属類については、原灰、球形灰ともに土壌環境基準を満足している。

② Ca-K 灰について

原灰、球形灰ともに今回分析した全ての重金属類について土壌環境基準未満の溶出量となった。これは、溶出試験時において、原灰に添加したカルシウム成分と重金属類が反応してアルカリ条件下で難溶性であるカルシウム塩を生成したことによる、と考えられる。

③ Fe-I 灰について

原灰に比べて As の溶出量は低下したが、土壌環境基準以下にはできなかった。鉄粉の添加には①還元作用（As の揮発促進）、②難溶性ヒ酸鉄の生成、の 2 つの作用が考えられるが、低温捕集の場合では As の揮発を促進させても球形灰表面への As の凝縮付着は回避できなかったため、土壌環境基準を超えて As が溶出したものと考えられる。

表 3-12　球形灰の重金属類溶出特性（低温捕集球形灰）

		K灰	粉砕K灰	Ca-K灰	Si-K灰	N灰	Fe-I灰	埋立基準	土壌環境基準
As	mg/L	0.12	0.11	< 0.01	0.13	< 0.01	0.03	0.3	0.01
Se	mg/L	0.14	0.18	< 0.01	0.14	0.09	0.10	0.3	0.01
Cd	mg/L	< 0.01	—	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.3	0.01
Cr^{6+}	mg/L	< 0.05	—	< 0.05	< 0.05	< 0.05	—	1.5	0.05
Pb	mg/L	< 0.01	—	< 0.01	< 0.01	< 0.01	—	0.3	0.01
T-Hg	mg/L	< 0.0005	—	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	—	0.005	0.0005
溶出液pH	—	7.7	7.6	13.0	7.8	10.9	7.4	—	—

注）埋立基準：金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令（埋立処分時の基準）
土壌環境基準：平成三年環境庁告示第 46 号（有効利用時の指標に用いられるケース有り）

(2) 高温捕集球形灰

低温捕集による球形灰表面へのAsとSeの凝縮付着を防止するため、簡易ろ過装置による770℃程度での高温捕集を試みた。高温捕集球形灰からのAs、Se溶出量を表3-13に、結果に対する考察を以下に示す。

① K灰，粉砕K灰について

高温捕集によりSeの含有量が大幅に減少（3-4-2.項参照）したことから、溶出量も土壌環境基準以下にまで抑制出来た。しかし、Asの溶出量については低温捕集時に比べ4～6割まで低減できたものの土壌環境基準を満足することはできなかった。

なお、高温捕集により低温捕集に比べ溶出液のpHが高くなる傾向が見られた。原因として、原灰中の固定S分由来のSOx等、排ガス中の酸性ガスが関与している可能性も想定されるが、詳細は不明である。

② Fe-I灰について

鉄粉添加に高温捕集を組み合わせることでAs、Seの溶出量を土壌環境基準未満にすることができた。Seについては、前述の通り鉄粉を添加しなくとも土壌環境基準以下に溶出抑制することが可能である。一方、Asについては、

1) 鉄粉の添加によりAsの揮発が促進し、さらに高温捕集することで球形灰とAsが効率よく分離したこと、

2) 一部球形灰に残留したAsが鉄粉と難溶性のヒ酸鉄を生成したこと、

の2つの要因により効果的に溶出抑制されたものと推察できる。

表3-13　球形灰の重金属類溶出特性（高温捕集球形灰）

		K灰	粉砕K灰	Ca-K灰	Si-K灰	N灰	Fe-I灰	埋立基準	土壌環境基準
As	mg/L	0.07	0.04	—	—	—	<0.01	0.3	0.01
Se	mg/L	<0.01	<0.01	—	—	—	<0.01	0.3	0.01
溶出液pH	—	10.0	9.3	—	—	—	7.1	—	—

注）埋立基準：金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令（埋立処分時の基準）
土壌環境基準：平成三年環境庁告示第46号（有効利用時の指標に用いられるケース有り）

以上より、球形灰からのAsとSeの溶出を土壌環境基準以下にまで抑制する手段として、「鉄粉添加＋高温捕集」が有効であることが実証された。

3-6. まとめ

(1) 物理性状について

- 球形灰は原灰に比べて、低吸水性で、比表面積が小さく、平均粒径が大きい粉体である。
- 粉砕 K 球形灰は K 球形灰に比べ僅かに比表面積が広くなったが、目標ブレーン値の 5,000cm²/g には至らなかった。

(2) 化学組成について

- P は全ての球形灰に含有されている。
- 低温捕集時では、原灰と球形灰に大きな化学組成の違いはない。
- 高温捕集時では、原灰に比べ球形灰の Se, Pb 含有量が減少する。さらに原灰に鉄粉を添加した球形灰では、As の含有量も減少する。

(3) 重金属類溶出特性について

- K 灰，粉砕 K 灰，Si-K 灰，N 灰については、原灰、球形灰（低温捕集）ともに、As と Se が土壌環境基準を超えて溶出した。
- 消石灰を添加した Ca-K 灰については、原灰、球形灰ともに土壌環境基準を満足した。
- 添加材のない球形灰を高温捕集した場合、Se の溶出量を土壌環境基準以下とできた。しかし、As については土壌環境基準以下にできなかった。
- 鉄粉を添加した Fe-I 灰について球形灰の高温捕集を実施した結果、As, Se を含む全ての重金属類の溶出量を土壌環境基準以下と出来た。

表 3-14　各種原灰、球形灰の性状一覧（抜粋）

		ブレーン値	塩基度	P 含有量	As 溶出量	Se 溶出量
		cm²/g	—	mg/kg	mg/L	mg/L
K 灰	原灰	4943	0.14	14.2	0.12	0.14
	低温捕集球形灰	2105	0.19	14.4	0.12	0.10
	高温捕集球形灰	2100	0.16	15.6	0.07	
粉砕 K 灰	原灰	11400	—	—	—	—
	低温捕集球形灰	2200	—	—	0.11	0.04
	高温捕集球形灰	3500	—	—	0.04	< 0.01
Si-K 灰	原灰	4000	0.09	16.1	0.20	0.13
	低温捕集球形灰	2085	0.12	14.7	0.29	0.14
Ca-K 灰	原灰	4175	0.35	16.9	< 0.01	< 0.01
	低温捕集球形灰	2534	0.41	9.7	< 0.01	< 0.01
N 灰	原灰	4980	0.35	14.4	< 0.01	< 0.01
	低温捕集球形灰	2400	0.60	27.5	0.04	0.09
Fe-I 灰	原灰(鉄無添加)	6392	0.49	25.1	0.23	0.09
	低温捕集球形灰	2863	0.42	28.1	0.03	0.10
	高温捕集球形灰	1366	0.28	22.4	< 0.01	< 0.01
望ましい領域		5000 以上	0.5 以下	含むこと	0.01 以下	0.01 以下

※ P_2O_5 として

3-7. モルタル・コンクリート試験への展開

球状化実験の結果をもとに、モルタル・コンクリート試験において確認すべき項目と使用する灰を表 3-15 に示す。

これより、次章以降のモルタル試験においては、「モルタル試験Ⅰ」の項で項目(1)～(2)を、「モルタル試験Ⅱ」の項で項目(3)～(4)について確認する。

なお、全ての試験条件において、スラグを 100%使用した試験体を比較対照に適用した。

表 3-15　モルタル・コンクリート試験で確認すべき項目と使用する灰

確認すべき項目	使用する灰
(1)　球形灰中のガラス不安定化成分（リン含有量）の違いによるモルタル特性を確認する	①K 球形灰 ②N 球形灰(P が多い)
(2)　塩基度の違いによるモルタル特性を確認する	①Si-K 球形灰(低塩基度) ②Ca-K 球形灰 ③K 球形灰
(3)　球形灰の比表面積の違いによるモルタル特性を確認する	①K 煙道灰 ②粉砕 K 煙道灰※
(4)　球形灰の耐酸性コンクリート原料としての適用性を原灰使用時との比較により確認する	①K 球形灰 ②K 原灰

※：炉出口の煙道下部に堆積した球形灰であり、高温捕集球形灰とほぼ同等の理化学特性、重金属類溶出特性を示す。



図 3-7　炉出口煙道下部（左図：煙道灰堆積時、右図：煙道灰払い出し後）

第４章　耐酸性コンクリート製品への適応性調査

4-1. はじめに

ここでは、第３章で製造した球形灰について、耐酸性コンクリート材料としての適応性を評価するための実験を実施した。

4-2. 実験概要

4-2-1. モルタル試験

１）モルタル試験Ⅰ

はじめに、球形灰を材料とした耐酸性コンクリートの製造技術を開発する手がかりとして、原灰の成分調整を行った球形灰を用いたモルタルについて試験を行った。その要因と水準については下表の通り。

表 4-1　モルタル試験Ⅰの要因と水準

要　　因	水　　準
原　　灰	N灰　，　K灰
成分調整	Si 調整　、　Ca 調整（K 灰についてのみ）
球形灰置換率（%）※1	0（基本配合※2）　，25　，　50　，　75　，　100
調査項目	モルタルフロー　，　圧縮強度　，　耐酸性　，重金属溶出

※１：使用する現行スラグ（下水溶融スラグ粉砕品）に対する球形灰置換率（%）

※２：現行スラグ（下水溶融スラグ粉砕品）100%使用配合（現行タイプ）

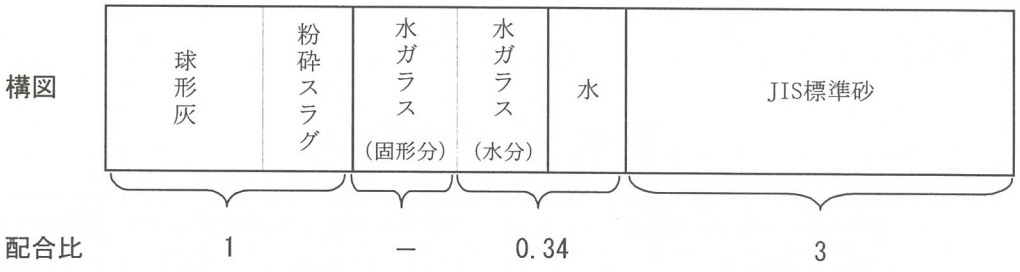


図 4-1　モルタルの配合条件

①モルタルフロー試験・・・・・　JIS R 5201（モルタルフロー試験）に準拠

②圧縮強度試験・・・・・・・・　JIS A 1108 に準拠　材齢：1 日，14 日

n＝3　φ5×10cm

③耐酸性試験・・・・・・・・・・20℃－10%硫酸水溶液

質量変化率を測定　測定日：浸漬 28 日、60 日

質量変化率：十分に吸水させた供試体の溶液浸漬前における質量に対する試験によって変化した供試体質量の割合

④重金属溶出試験・・・・・・・ 環境庁告示第46号（平成3年8月23日）
カドミウム、鉛、六価クロム、
砒素、総水銀、セレン

2）モルタル試験Ⅱ

前項実験において、球形灰から土壌環境基準値以上の重金属（砒素、セレン）が溶出したことと、粉砕スラグ（現行使用品）に比べ圧縮強度が若干低下することを改善するべく、球形灰の採取方法及び仕様を変化させたものについてモルタル試験を行った。

表4-2　モルタル試験Ⅰの要因と水準

要　因	水　準
原　灰	K灰
種　別	K原灰　，　K煙道灰　，粉砕K煙道灰
球形灰置換率（%）※1	0（基本配合※2）　，　100
調査項目	モルタルフロー　，　圧縮強度　，　耐酸性　，重金属溶出

※1：使用する現行スラグ（下水溶融スラグ粉砕品）に対する球形灰置換率（%）
※2：現行スラグ（下水溶融スラグ粉砕品）100%使用配合（現行タイプ）

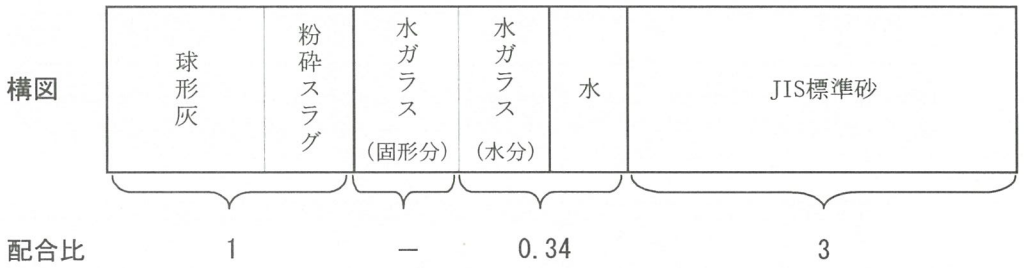


図4-2　モルタルの配合条件

①モルタルフロー試験・・・・・ JIS R 5201（モルタルフロー試験）に準拠
②圧縮強度試験・・・・・・・・ JIS A 1108に準拠　材齢：1日，14日
n＝3　φ5×10cm
③重金属溶出試験・・・・・・・ 環境庁告示第46号（平成3年8月23日）
砒素、セレン

4-2-2. コンクリート試験

K球形灰を用いた耐酸性コンクリートとしての諸物性を従来型耐酸性コンクリートのそれと比較しながら把握することを目的として実験を行った。

コンクリート試験に用いた配合内容は以下の通り。

基本配合　：　下水溶融スラグからなる耐酸性セメントを用いた耐酸性コンクリート（従来型耐酸性コンクリート）

K-100　：　従来型耐酸性コンクリートの耐酸性セメントをK球形灰に全量置換

K-50　：　従来型耐酸性コンクリートの耐酸性セメントをK球形灰に50%置換

表4-3　耐酸性コンクリートと普通コンクリートの配合

コンクリート種類	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
			W	耐酸性ｾﾒﾝﾄ	K球形灰	ｱﾙｶﾘ材料	S	G
基本配合	42.6	48.0	149	350	—	116	867	958
K-100				—	350			
K-50				175	175			

1）フレッシュ性状

①スランプ：JIS A 1101に準拠し、練り混ぜ直後に行った。

②空 気 量：JISA1128に準拠し、練り混ぜ直後に行った。

③コンクリート温度：練り混ぜ直後に棒温度計を用いて測定した。

2）圧縮強度

JIS A 1108に準拠し、円柱供試体(φ10×20cm)の材齢1日、14日、90日で実施した。なお、n＝3。

3）静弾性係数

JIS A 1149に準拠し、圧縮試験と同時に材齢14日で実施した。なお、n＝3。

4）曲げ強度

JIS A 1106に準拠し、供試体は10×10×40cm角柱供試体を用いる。試験材齢は14日、n＝3。

5）引張強度

JIS A 1113に準拠し、φ15×30cm円柱供試体を用いて割裂によって測定する。

試験材齢は14日、n＝3。

6）熱膨張係数

熱膨張係数は、中心に埋め込み型ひずみ計(株式会社東京測器研究所社製KM-100BT)を埋設したコンクリート試験体(100×100×400mm)を水中に浸漬し、タバイ社製恒温恒湿槽を用いて、水温と試験体中心温度が平衡を保つように徐々に温度を変化(約5℃→80℃→5℃：0.5℃／h)させながらひずみを測定し、温度－ひずみ曲線における傾きを熱膨張係数とした。

7）透水係数

透水試験供試体は、前述に示すコンクリート試験体をφ150×150mmに切断し、恒温恒湿環境下(室温20±2℃、相対湿度60±5%)で1週間自然乾燥させた後、試験体側面に樹脂を塗布したものを試験に供した。

透水試験は、試験体を透水試験装置に設置し、一方から水圧を作用させた後、試験体を割裂し、表面からの水の浸透深さを測定した。本試験では、水圧は2.5kgf/cm²(0.245N/mm²)および7.5kgf/cm²(0.735 N/mm²)、加圧時間は48(48×60²=172800秒)および240(240×60²=864000秒)時間の条件で試験を行った。

コンクリート中の水の拡散係数および透水係数は次式を用いて算出した。

$$\beta_i^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4\ t\ \xi^2}$$

ここに、β_i^2：拡散係数（cm²/sec）

D_m：平均浸透深さ（cm）

t：水圧を加えた時間（sec）

α：水圧を加えた時間に関する係数（表4-4参照）

ξ：水圧の大きさに関する係数（表4-5参照）

表4-4　水圧を加えた時間に関する係数

t（sec）	1	24×60²	48×60²	72×60²	240×60²
α	1	130.5	175.7	209.0	350.1

表4-5　水圧の大きさに関する係数

水圧(kgf/cm²)	2.5	5	7.5	10	15	20
ξ	0.594	0.905	1.034	1.163	1.301	1.386

$$K = p \frac{\Delta q}{\Delta t} \times \frac{l}{AP}$$

ここに、K：透水係数（cm/sec）

q：試験体に圧入された水量（cc）

l：平均浸透深さ（cm）

t：時間（sec）

A：流水に直角な平均面積（cm²）

P：水圧（kgf/cm²）

p：水の単位容積質量（kg/cm³）

8）吸水率

吸水率試験は、JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準拠して行う。

9）細孔径分布

① 試　　料　試料は、コンクリート試験体の表面より深さ方向に 90～110mm の位置を切り出し、アセトンに浸漬し、室内にて自然乾燥させたその後、試料平面の中心に約 80mm の円を描き、この円内から粗骨材を取り除きながら約 5mm 角に砕き、さらに凍結乾燥器にて 1 週間乾燥させたものである。

② 試験方法　細孔径分布測定は、水銀圧入式ポロシメータ（micromeritics 社製 AUTOPURE Ⅱ 9220）により測定した。

10）耐薬品性

耐薬品性試験を表 4-5 の仕様で行った。なお、溶液の交換は、浸漬期間 30 日まで適宜中和滴定による溶液濃度の測定を行い、溶液の濃度が基準濃度よりも±1wt%以上変化した場合に新たな基準濃度の溶液に交換した。n＝3。

表 4-6　耐薬品性試験諸元

項　目	内　　容
使用薬品	硫酸，塩酸，水酸化ナトリウム，硫酸ナトリウム，ラード，綿実油，軽油
試薬濃度	油類は原液、その他は 10mass%水溶液
試薬温度	20℃
浸漬期間	180 日
試験材齢	14 日，31 日，60 日，90 日，180 日
評価方法	質量変化率　{(所定材齢質量－浸漬前質量）／浸漬前質量×100[%]}
供試体形状	円柱供試体（φ10×20cm）

11）耐凍結融解性

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法(水中凍結・水中融解試験方法)に準拠した。

12）中性化

中性化程度は促進中性化試験によって評価され、その方法は日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説付 1 コンクリートの促進中性化試験方法（案)」に準拠した。

13）発錆

発錆試験は、社団法人 日本コンクリート工学協会「JCI-SC2 塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法－オートクレーブ法－」に準拠した。

14）耐摩耗性

耐摩耗試験は、JIS K 7204「プラスチック－摩耗輪による摩耗試験方法」に準拠した。

4-3. 結果と考察

4-3-1. モルタル試験

1）モルタル試験Ⅰ

① モルタルフロー試験

モルタルフロー試験結果を下表に示す。

N 球形灰については、置換率の増大によってフロー値が向上している。これは、球形灰の形状に起因するボールベアリング効果によって現れた現象と推察される。その他試料のフレッシュ性状への影響について言及できないものの、コンクリートへ展開した場合において弊害となるものではないと推察される。

表 4-7　モルタルフロー試験結果

球形灰置換率（%）	モルタルフロー値(mm)			
	N 球形灰	K 球形灰	Si－K 球形灰	Ca－K 球形灰
0	132.05			
25	145.13	159.30	145.32	149.93
50	146.34	149.65	148.55	137.00
75	151.57	142.45	143.93	138.33
100	152.09	139.68	130.93	127.78

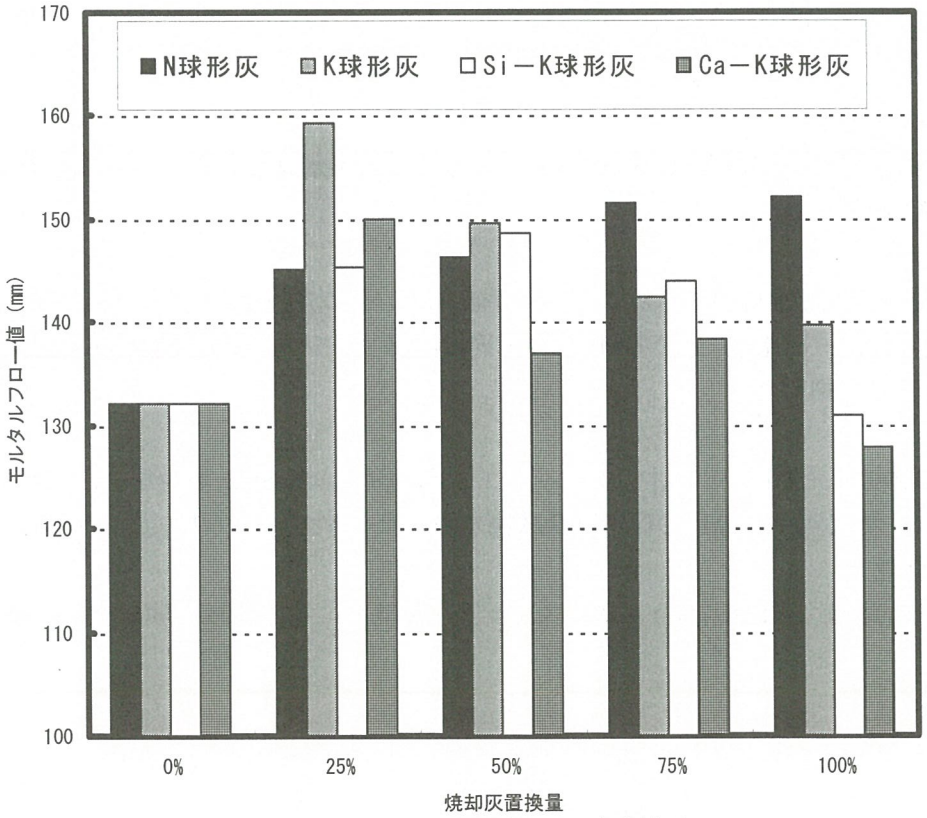


図 4-3　モルタルフロー試験結果

② 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を下表に示す。

球形灰の種類にかかわらず、下水溶融スラグへの置換率を増大させるごとに圧縮強度は低下するようである。塩基度（CaO/SiO_2）0.5 の範囲内で Ca 添加による強度発現性を期待したが、その効果はほとんど見られなかった。なお、本実験の結果から置換量に関わらずコンクリートへ展開した場合においても殆どの製品に適用可能と推察される。

表 4-8　圧縮強度試験結果（材齢 1 日）

球形灰置換率（%）	圧縮強度(N/mm²)			
	N 球形灰	K 球形灰	Si－K 球形灰	Ca－K 球形灰
0	74.7			
25	70.9	70.8	69.0	64.7
50	63.3	65.0	60.1	66.7
75	62.4	60.6	59.7	62.4
100	60.2	57.0	51.9	49.3

表 4-9　圧縮強度試験結果（材齢 7 日）

球形灰置換率（%）	圧縮強度(N/mm²)			
	N 球形灰	K 球形灰	Si－K 球形灰	Ca－K 球形灰
0	76.3			
25	73.9	70.8	73.1	70.5
50	68.4	65.0	76.8	71.5
75	69.8	60.6	61.9	65.7
100	64.2	57.0	55.3	60.5

表 4-10　圧縮強度試験結果（材齢 28 日）

球形灰置換率（%）	圧縮強度(N/mm²)			
	N 球形灰	K 球形灰	Si－K 球形灰	Ca－K 球形灰
0	77.1			
25	71.8	87.3	77.4	73.5
50	65.2	63.4	76.0	73.0
75	71.9	58.3	61.7	66.5
100	62.5	60.5	57.5	61.2

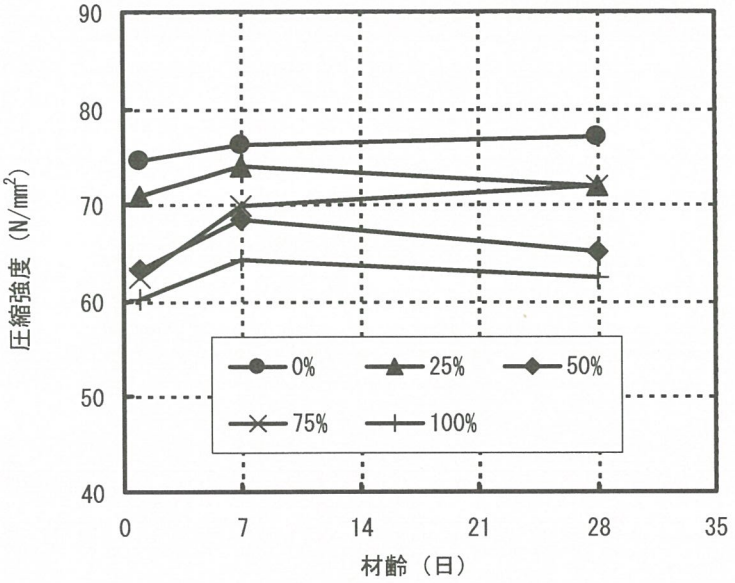


図 4-4　置換率と圧縮強度関係（N 球形灰）

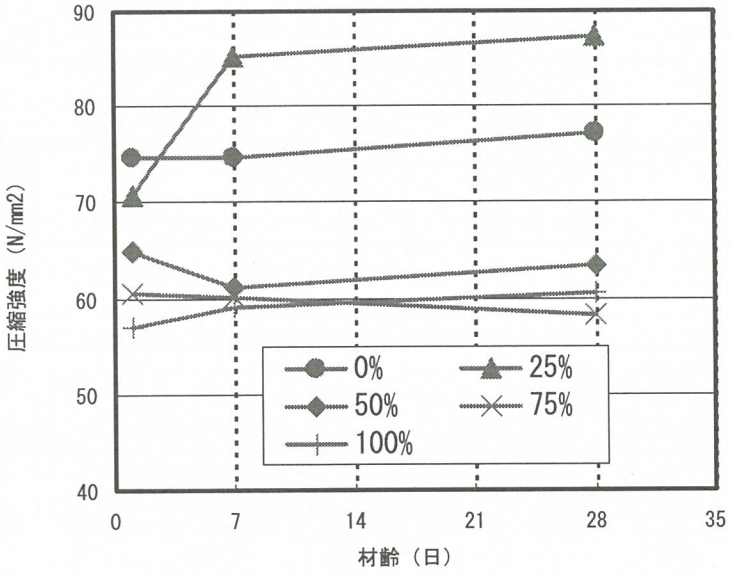


図 4-5　置換率と圧縮強度関係（K 球形灰）

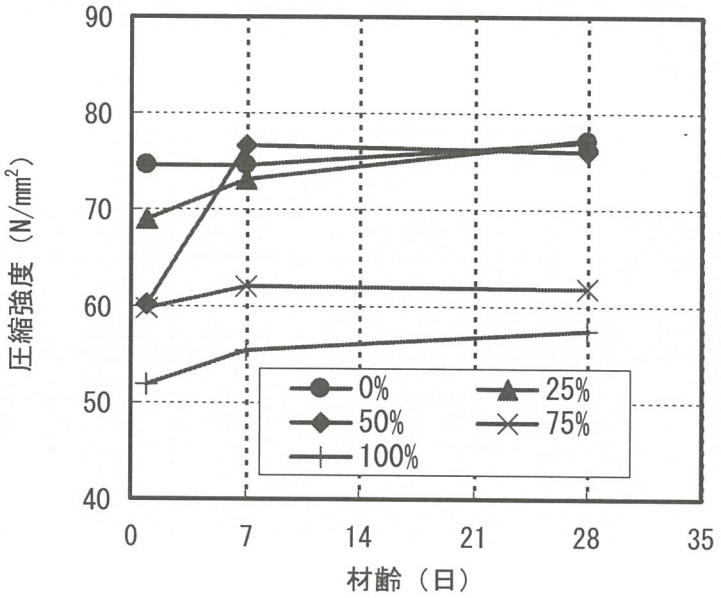


図 4-6　置換率と圧縮強度関係　（Si－K 球形灰）

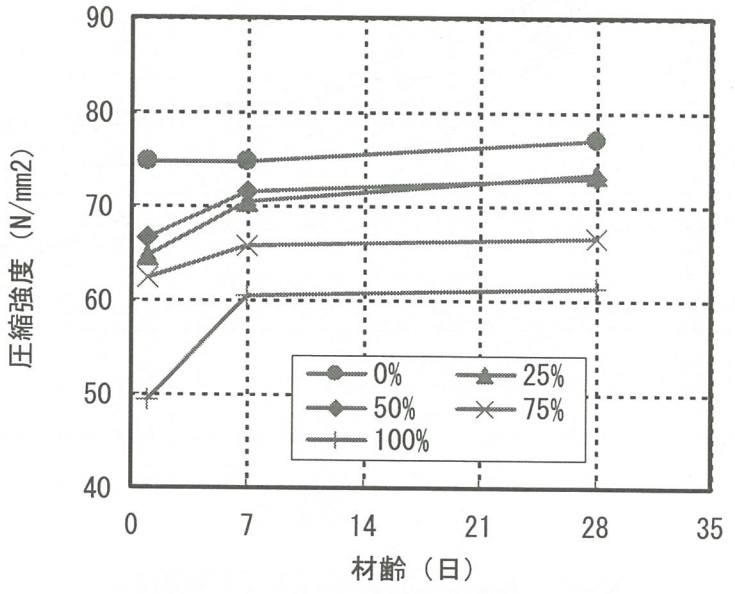


図 4-7　置換率と圧縮強度関係　（Ca－K 球形灰）

③ 耐酸性試験

10%硫酸水溶液による耐酸性試験の結果を以下の表 4-11、図 4-8～4-11 に示す。

圧縮試験結果同様、球形灰の種別にかかわらず、その置換率が増すごとに耐酸性は若干ながら低下する傾向が見られる。これは組織骨格強度、言い換えれば圧縮強度に相関するものと考えられる。

表 4-11　耐酸性試験結果（質量変化率）

球形灰置換率（%）	質量変化率(%)							
	N 球形灰		K 球形灰		Si－K 球形灰		Ca－K 球形灰	
	28 日	60 日	28 日	60 日	28 日	60 日	28 日	60 日
0	-1.12	-1.36	-1.12	-1.36	-1.12	-1.36	-1.12	-1.36
25	-1.01	-1.61	-1.15	-1.79	-0.98	-1.84	-1.24	-1.92
50	-1.55	-1.66	-1.25	-2.14	-1.43	-1.89	-1.34	-2.09
75	-2.01	-2.21	-1.01	-2.26	-1.68	-2.07	-1.68	-1.99
100	-1.32	-2.58	-1.48	-2.30	-1.66	-2.24	-1.89	-2.16

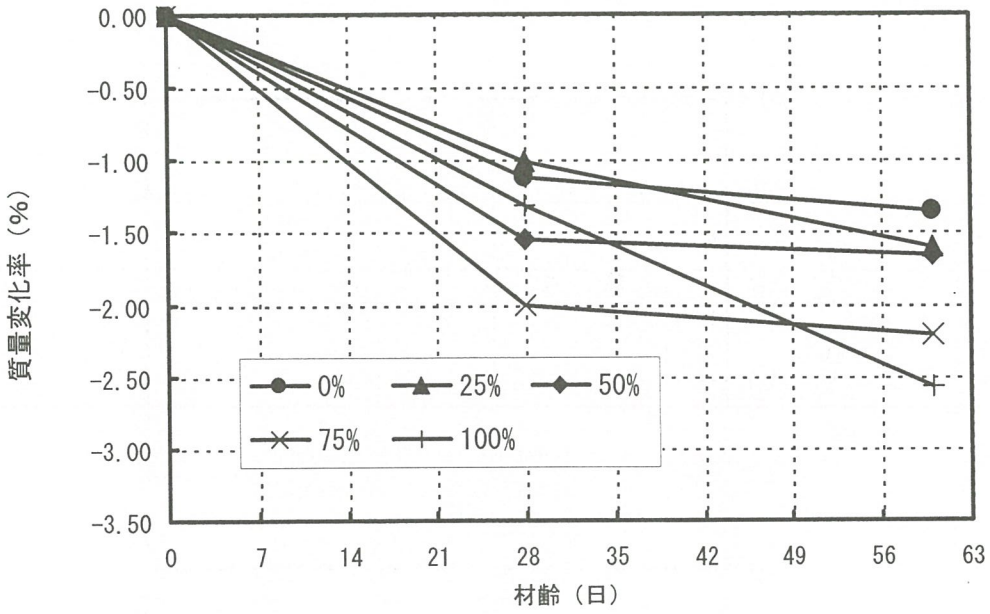


図 4-8　置換率と耐酸性関係（N 球形灰）

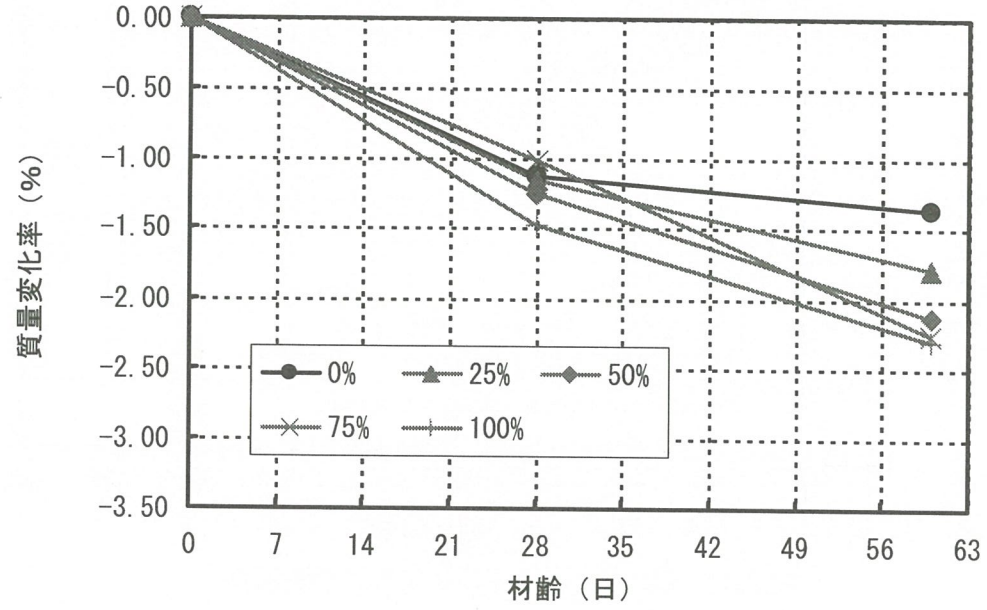


図 4-9　置換率と耐酸性関係（K 球形灰）

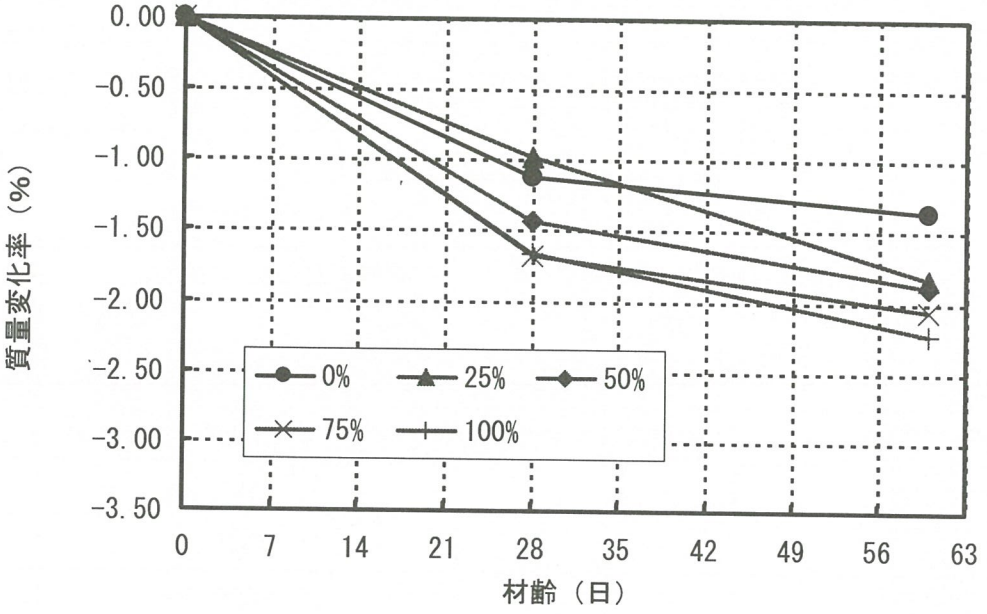


図 4-10　置換率と耐酸性関係（Si－K 球形灰）

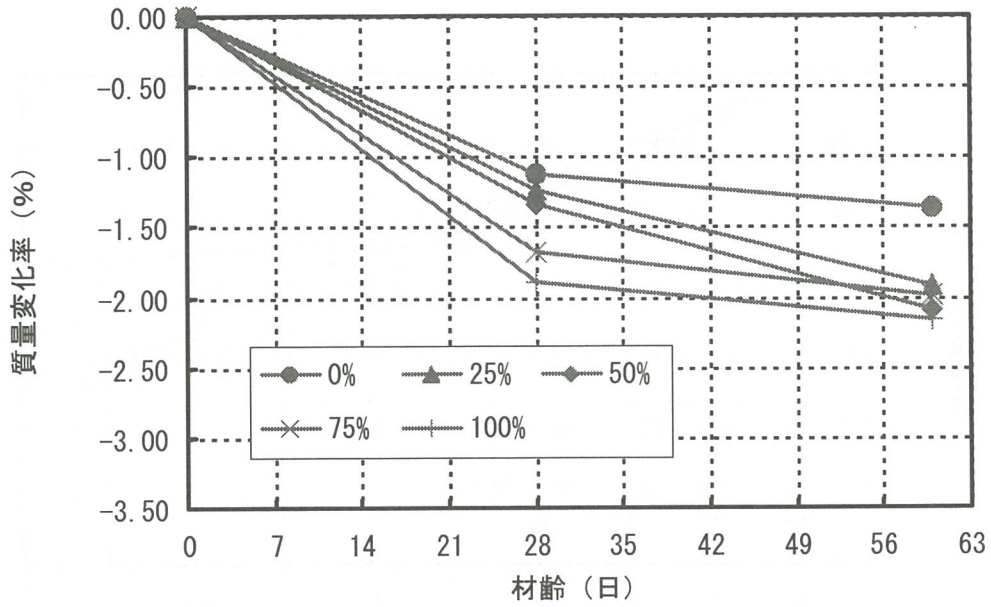


図 4-11　置換率と耐酸性関係（Ca－K 球形灰）

④ 重金属溶出試験

重金属溶出試験結果を下表に示す。

基本配合を除く全ての配合から砒素及びセレンが基準値以上に溶出する結果であった。球形灰そのものからの溶出が認められていない Ca-K 球形灰についても、耐酸性モルタルとすることで溶出している。また、K 球形灰の置換率が増すごとに溶出量が増大する傾向にあることから、これらはアルカリ材料との反応に起因するものと推察され、基本配合とは異なった硬化組成になっているものと考えられるが、詳細は不明である。

表 4-12　耐酸性モルタルの重金属溶出試験結果

試料名	項目(mg/litre)					
	Cd	Pb	Cr6+	As	T-Hg	Se
基本配合	<0.005	<0.01	<0.02	<0.002	<0.0005	<0.002
N 球形灰－100%	<0.005	<0.01	<0.02	0.053	<0.0005	0.015
K 球形灰－25%	－	－	－	0.01	－	0.008
K 球形灰－50%	－	－	－	0.022	－	0.012
K 球形灰－75%	－	－	－	0.037	－	0.012
K 球形灰－100%	<0.005	<0.01	<0.02	0.051	<0.0005	0.015
Si－K 球形灰－100%	<0.005	<0.01	<0.02	0.024	<0.0005	0.016
Ca－K 球形灰－100%	<0.005	<0.01	0.02	0.044	<0.0005	0.03
定量下限値	0.005	0.01	0.02	0.002	0.0005	0.002
土壌環境基準	0.01	0.01	0.05	0.01	0.0005	0.01

2）モルタル試験Ⅱ

① モルタルフロー試験

基本配合に比べ全ての試料モルタルのフロー値が低下した。しかしながらコンクリートとした場合のフレッシュ性状に与える影響は少ないと思われる。

表 4-13　フレッシュ性状

配合名	モルタルフロー(mm)			モルタル温度 (℃)
	①	②	Ave.	
基本配合	108.8	107.0	107.9	14.5
K 原灰	96.8	96.9	96.9	15.0
K 煙道灰	102.0	104.8	103.4	14.5
粉砕 K 煙道灰	101.9	102.5	102.2	15.0

② 圧縮強度試験

基本配合に比べ K 原灰及び粉砕K煙道灰は圧縮強度が著しく低下する結果となった。基本配合である耐酸性コンクリートでは、現行スラグを使用することの理由としてガラス化していることがあげられる。K 原灰は当然のことながら、粉砕K煙道灰は K 煙道灰と成分に大きな相違があるとは考えにくいことから、何らかの理由によりこれを確保できなかったものと推察される。

表 4-14　圧縮強度（材齢 1 日）

配合名	圧縮強度(N/mm²)			
	①	②	③	Ave.
基本配合	60.6	63.1	62.5	62.1
K 原灰	3.1	3.7	3.5	3.4
K 煙道灰	49.5	51.1	51.5	50.7
粉砕K煙道灰	21.3	21.5	23.2	22.0

③ 重金属溶出試験

前項の実験結果をもとに砒素とセレンに着目して重金属溶出試験を行った。原灰、及び粉砕K煙道灰については砒素、セレンともに土壌環境基準を超えて溶出したが、K煙道灰はともに土壌環境基準を満足した。

表 4-15　重金属溶出試験結果

No.	種別	砒素(mg/l)			セレン(mg/l)		
		基準値	定量下限値	測定値	基準値	定量下限値	測定値
1	K 原灰	0.01	0.002	0.082	0.01	0.002	0.041
2	K 煙道灰			0.008			0.004
3	粉砕K煙道灰			0.045			0.009

4-3-2. コンクリート試験

1）フレッシュ性状

各資料のスランプ、空気量、コンクリート温度を表 4-16 に示す。外気温は設備上常温で行ったためバラツキがある。材料は恒温室で 24 時間以上保管したものを使用した。

スランプは球形灰の置換率が増すごとに増大する傾向がうかがえる。これは、モルタル試験で得られた傾向に同じく、球形灰がボールベアリングの働きをしたことで材料の降伏値を低下させたと推察される。

表 4-16　各試料のフレッシュ性状

試料名	スランプ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)	外気温(℃)
基本配合	18.2	1.6	21.5	21.0
K-50	22.3	1.7	20.0	16.5
K-100	24.2	2.9	20.0	16.5

2）圧縮強度及び静弾性係数

各試料の圧縮強度、静弾性係数及びポアソン比を表 4-17、図 4-12 に示す。

圧縮強度は球形灰の置換率の増大に伴って低下する傾向にあり、モルタル試験で得られた傾向に合致している。絶対値としてはコンクリート２次製品に適用できる程度と判断できそうである。

製品に用いられるコンクリートの設計基準強度は、その種類によって異なるが、一般的には 18N/mm²～50N/mm²程度である。これを勘案すると全ての配合は製品用材料として用いることができると思われる。

表 4-17　圧縮強度及び静弾性係数試験結果

試料名	圧縮強度(N/mm²)			静弾性係数(GPa)	ポアソン比
	1 日	14 日	31 日		
基本配合	69.5	70.2	76.4	24.6	0.20
K-50	60.8	63.8	65.8	25.5	0.20
K-100	56.8	59.9	64.7	26.9	0.19

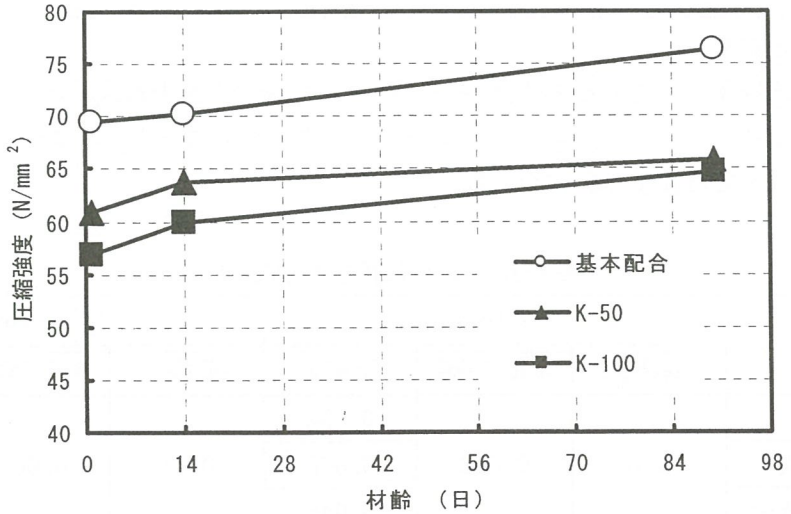


図 4-12　材齢経過に伴う圧縮強度の変化

3） 曲げ強度及び引張強度

曲げ強度及び引張強度の試験結果を表 4-18、図 4-13 に示す。

圧縮強度の傾向同様、曲げ強度及び引張強度は球形灰の置換率が増大するごとに低下する傾向にあるようである。

表 4-18　曲げ強度及び引張強度試験結果

試料名	曲げ強度（N/mm²）				引張強度（N/mm²）			
	1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.
基本配合	7.6	6.9	7.9	7.5	5.3	4.5	5.1	5.0
K-50	7.4	6.2	7.7	7.1	3.6	2.9	4.6	3.7
K-100	7.0	5.6	7.8	6.8	2.7	3.8	2.9	3.1

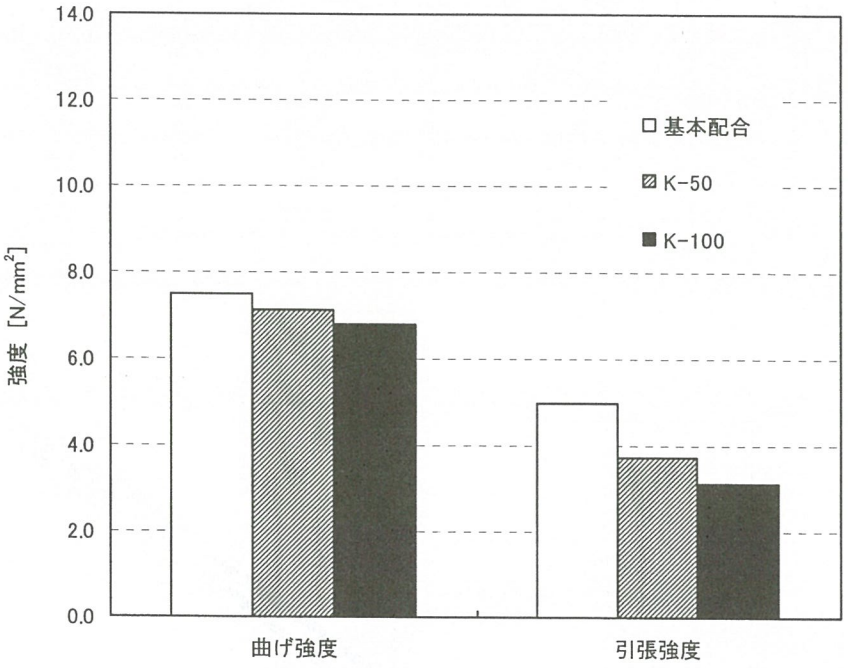


図 4-13　各試料の曲げ強度及び引張強度

4）熱膨張係数

表 4-19 に各試料の熱膨張係数の結果を示す。なお、基本配合のデータは過去に行った試験結果（温度上昇時のみ）を記載した。

鉄筋コンクリートとして成立する理由としてコンクリートと鉄筋の線膨張係数が同等であることがあげられる。鉄筋コンクリートが温度変化を受けた場合、両材料の界面にせん断が生じ、本来有する鉄筋の補強効果が得られないことになる。下表に示す値から、K-100 の値は一般的なコンクリートの線膨張係数（基本配合の線膨張係数）と比べ若干小さいようではあるが、複合材料として成立するものと推察される。

表 4-19　熱膨張係数測定結果

試料名		熱膨張係数(×10⁻⁶/℃)		
		温度上昇時 (9～74℃)	温度下降時 (74～9℃)	平均
基本配合	平均	12.0	—	12.0
K-100	No.1	5.7	6.0	5.9
	No.2	5.4	5.6	5.5
	No.3	5.4	5.8	5.6
	平均	—	—	5.7

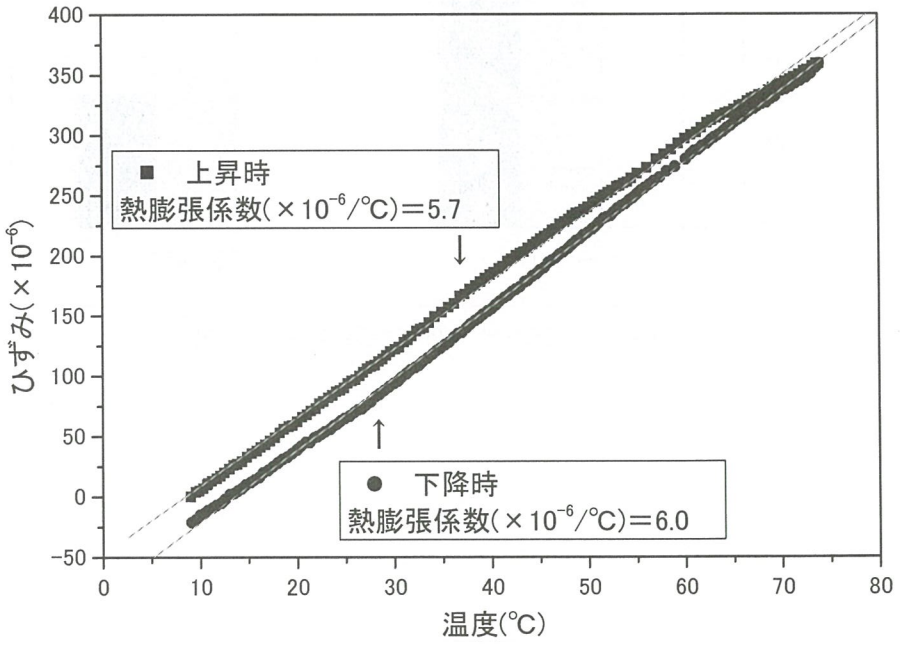


図 4-14　熱膨張係数測定試験時ひずみ履歴（K-100 No.1）

5）透水係数

透水係数測定試験結果を表 4-20～4-22 に示す。

全ての透水係数が×10^{-10}と極めて小さな値を示しており、コンクリート２次製品とした場合、ほとんどの供用環境において支障なく使用できる値と判断できる。なお、透水係数に球形灰置換率の相関は見られないようである。

表 4-20　透水係数測定試験結果（基本配合）

試験体番号		No.1	No.2	No.3
水圧	(kgf/cm^2)	2.5 (0.245 N/mm^2)	7.5 (0.735 N/mm^2)	7.5 (0.735 N/mm^2)
平均浸透深さ	(cm)	1.07	4.04	4.46
水圧を加えた時間	(sec)	172800	864000	864000
水圧を加えた時間に関する係数		175.7	350.1	350.1
水圧の大きさに関する係数		0.594	1.034	1.034
拡散係数	(cm^2/sec)	8.31×10^{-4}	15.47×10^{-4}	18.85×10^{-4}
		14.21×10^{-4}		
供試体に圧入された水量	(cc)	20.1	69.1	88.9
流水に直角な平均面積	(cm^2)	78.5		
水の単位質量	(kg/cm^3)	0.001		
透水係数	(cm/sec)	6.36×10^{-10}	5.49×10^{-10}	7.79×10^{-10}
		6.55×10^{-10}		

表 4-21　透水係数測定試験結果（K-50）

試験体番号		No.1	No.2	No.3
水圧	(kgf/cm^2)	2.5 (0.245 N/mm^2)	7.5 (0.735 N/mm^2)	7.5 (0.735 N/mm^2)
平均浸透深さ	(cm)	0.69	1.88	1.31
水圧を加えた時間	(sec)	172800	864000	864000
水圧を加えた時間に関する係数		175.7	350.1	350.1
水圧の大きさに関する係数		0.594	1.034	1.034
拡散係数	(cm^2/sec)	3.39×10^{-4}	3.36×10^{-4}	1.62×10^{-4}
		2.79×10^{-4}		
供試体に圧入された水量	(cc)	31.2	79.1	88.9
流水に直角な平均面積	(cm^2)	78.5		
水の単位質量	(kg/cm^3)	0.001		
透水係数	(cm/sec)	6.30×10^{-10}	2.93×10^{-10}	2.28×10^{-10}
		3.84×10^{-10}		

表 4-22　透水係数測定試験結果（K-100）

試験体番号		No.1	No.2	No.3
水圧	(kgf/cm²)	2.5 (0.245 N/mm²)	7.5 (0.735 N/mm²)	7.5 (0.735 N/mm²)
平均浸透深さ	(cm)	0.54	1.30	0.89
水圧を加えた時間	(sec)	172800	864000	864000
水圧を加えた時間に関する係数		175.7	350.1	350.1
水圧の大きさに関する係数		0.594	1.034	1.034
拡散係数	(cm²/sec)	2.10×10^{-4}	1.59×10^{-4}	0.76×10^{-4}
		1.48×10^{-4}		
供試体に圧入された水量	(cc)	51.1	106.5	126.2
流水に直角な平均面積	(cm²)	78.5		
水の単位質量	(kg/cm³)	0.001		
透水係数	(cm/sec)	8.14×10^{-10}	2.71×10^{-10}	2.22×10^{-10}
		4.36×10^{-10}		

6）吸水率

吸水率試験結果を表 4-23 に示すが、球形灰の置換による吸水率の大きな変化はみられない。

表 4-23　吸水率測定試験結果

試験体番号		表乾質量 (g)	水中質量 (g)	絶乾質量 (g)	水の密度 (g/cm^3)	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
基本	No.1	7425.9	4346.9	6997.6	0.99820	2.41	2.27	6.12
	No.2	7459.1	4364.1	7022.2	0.99820	2.41	2.27	6.22
	No.3	7440.7	4348.7	7003.6	0.99820	2.40	2.27	6.24
	平均	—	—	—	—	2.41	2.27	6.19
K-50	No.1	7355.9	4267.1	6914.9	0.99820	2.38	2.24	6.38
	No.2	7347.8	4267.6	6913.9	0.99820	2.38	2.24	6.28
	No.3	7323.8	4252.8	6882.2	0.99820	2.38	2.24	6.42
	平均	—	—	—	—	2.38	2.24	6.36
K-100	No.1	7324	4233.7	6874.9	0.99820	2.37	2.22	6.53
	No.2	7377.7	4266.2	6917.3	0.99820	2.37	2.22	6.66
	No.3	7282.1	4203.9	6835.7	0.99820	2.36	2.22	6.53
	平均	—	—	—	—	2.36	2.22	6.57

7）細孔径分布

細孔径分布測定結果を表 4-24、図 4-15～4-17 に示す。

全細孔容積及び全空隙率は球形灰の置換率が増すにつれて大きくなるようである。これらの現象は球形灰を用いた場合の耐酸性コンクリートの反応機構が従来型のそれと相違する点等を明確にすることではじめて推察することができるものであり、現時点では言及できない。

表 4-24　細孔径分布測定結果

試験体番号	全細孔容積 (ml/g)	全空隙率 (%)
基本	0.0523	11.31
K-50	0.0768	16.20
K-100	0.0962	19.68

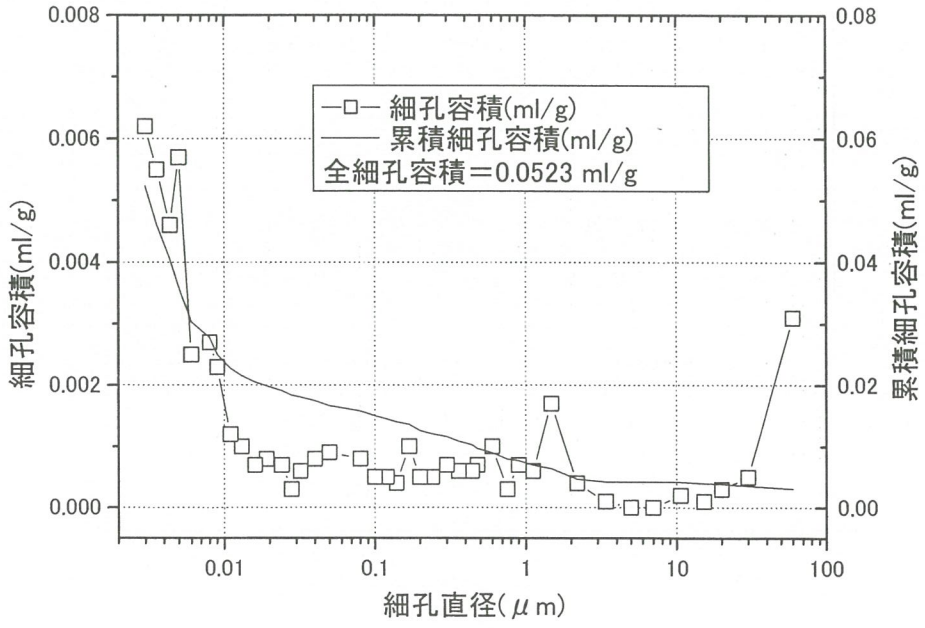


図 4-15　細孔径分布測定結果（基本配合）

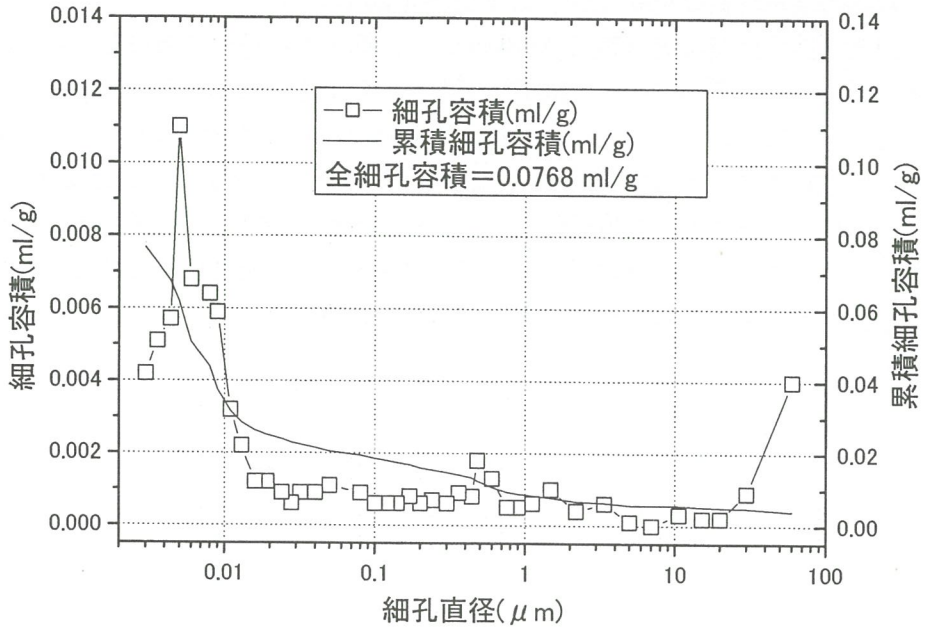


図 4-16　細孔径分布測定結果（K-50）

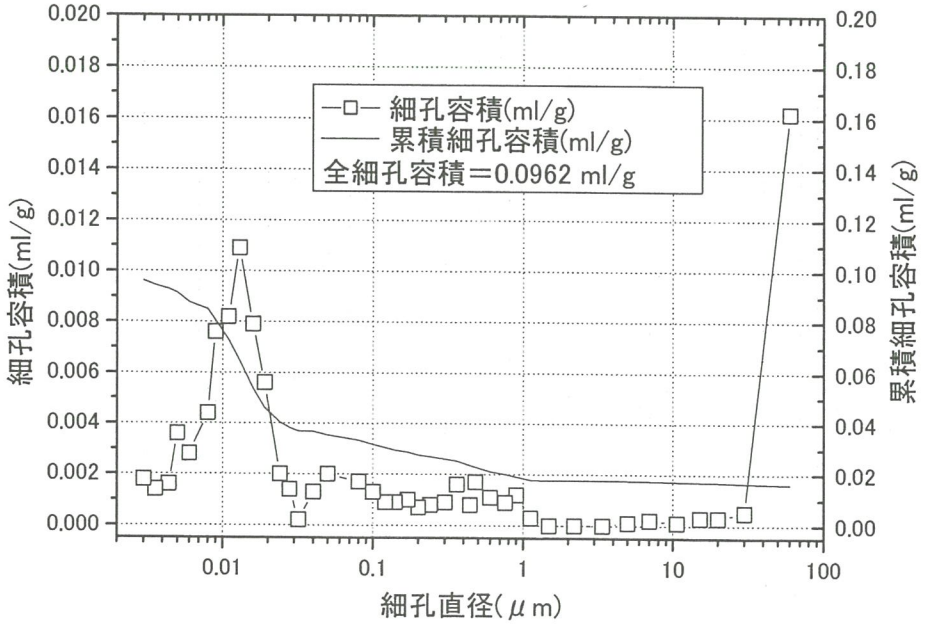


図 4-17　細孔径分布測定結果（K-100）

8）耐薬品性

耐薬品性試験結果を表 4-25、図 4-18～4-24 に示す。

耐薬品性能は球形灰の置換率が増すごとに低下する傾向にあるものの、耐塩酸試験以外ではその差は僅かであり、質量変化率も十分小さい値である。

この結果については、モルタル同様基本配合との相対評価にとどまり、耐酸性評価手法が明確化されていない現状では、材料として絶対評価を行うことは難しい。しかし、下水道施設における実供用環境下で求められる耐硫酸性は、５章で後述する東京都下水道局のコンクリート改修技術マニュアルの基準値を余裕を持って満足しており、耐酸性コンクリート製品として成立するものと思われる。

表 4-25　耐薬品性試験結果

浸漬期間（日）			0	14		31		60		90		180	
試薬	配合	No.	供試体重量（g）	供試体重量（g）	質量変化率（%）	供試体重量（g）	質量変化率（%）	供試体重量（g）	質量変化率（%）	供試体重量（g）	質量変化率（%）	供試体重量（g）	質量変化率（%）
10mass%硫酸水溶液	基本配合	⑦	3772.8	3767.0	−0.15	3758.8	−0.37	3760.4	−0.33	3738.7	−0.90	3696.8	−2.01
		⑧	3746.6	3737.0	−0.26	3726.0	−0.55	3722.2	−0.65	3703.3	−1.16	3681.1	−1.75
		⑨	3771.7	3765.2	−0.17	3756.9	−0.39	3756.0	−0.42	3736.3	−0.94	3711.9	−1.59
		平均			−0.19		−0.44		−0.47		−1.00		−1.78
	K−50	④	3738.0	3710.7	−0.73	3698.7	−1.05	3692.4	−1.22	3682	−1.50	3677.9	−1.61
		⑤	3741.0	3717.6	−0.63	3705.7	−0.94	3703.5	−1.00	3693.6	−1.27	3681.6	−1.59
		⑥	3749.0	3724.1	−0.66	3713.6	−0.94	3710.0	−1.04	3701	−1.28	3684.2	−1.73
		平均			−0.67		−0.98		−1.09		−1.35		−1.64
	K−100	①	3667.4	3631.4	−0.98	3611.8	−1.52	3596.0	−1.95	3582.5	−2.31	3573.3	−2.57
		②	3707.3	3672.8	−0.93	3655.7	−1.39	3643.3	−1.73	3629.8	−2.09	3615.2	−2.48
		③	3708.2	3670.8	−1.01	3654.8	−1.44	3642.2	−1.78	3632.8	−2.03	3622.3	−2.32
		平均			−0.97		−1.45		−1.82		−2.15		−2.46
10mass%水酸化ナトリウム水溶液	基本配合	⑦	3772.50	3780.6	0.21	3786.6	0.37	3791.7	0.51	3792.9	0.54	3795.2	0.60
		⑧	3742.90	3752.1	0.25	3758.6	0.42	3764.2	0.57	3765.5	0.60	3768.3	0.68
		⑨	3779.50	3788.1	0.23	3793.9	0.38	3798.7	0.51	3799.6	0.53	3802.7	0.61
		平均			0.23		0.39		0.53		0.56		0.63
	K−50	④	3733.90	3744.4	0.28	3751.9	0.48	3758.5	0.66	3760.3	0.71	3765	0.83
		⑤	3730.40	3740.3	0.27	3747.2	0.45	3753.5	0.62	3755.5	0.67	3759.7	0.79
		⑥	3759.40	3769.4	0.27	3776.8	0.46	3783.4	0.64	3785.2	0.69	3789.5	0.80
		平均			0.27		0.47		0.64		0.69		0.81
	K−100	①	3711.10	3718.6	0.20	3727.3	0.44	3736.2	0.68	3739.8	0.77	3748.1	1.00
		②	3686.40	3694.1	0.21	3702.5	0.44	3711.0	0.67	3714.3	0.76	3721.4	0.95
		③	3694.90	3701.1	0.17	3710.4	0.42	3718.9	0.65	3721.6	0.72	3727.5	0.88
		平均			0.19		0.43		0.66		0.75		0.94
10mass%硫酸ナトリウム水溶液	基本配合	⑦	3772.60	3774.5	0.05	3779.6	0.19	3782.5	0.26	3781.8	0.24	3783.7	0.29
		⑧	3742.50	3744.4	0.05	3749.6	0.19	3752.6	0.27	3752.2	0.26	3753.7	0.30
		⑨	3738.00	3740.0	0.05	3744.8	0.18	3747.7	0.26	3747.5	0.25	3749.3	0.30
		平均			0.05		0.19		0.26		0.25		0.30
	K−50	④	3744.70	3747.2	0.07	3751.6	0.18	3754.1	0.25	3753.2	0.23	3754.4	0.26
		⑤	3731.70	3733.6	0.05	3738.8	0.19	3741.4	0.26	3741.2	0.25	3743.2	0.31
		⑥	3734.50	3735.8	0.03	3741.4	0.18	3744.0	0.25	3743.7	0.25	3745	0.28
		平均			0.05		0.19		0.26		0.24		0.28
	K−100	①	3703.70	3703.5	−0.01	3706.3	0.07	3713.3	0.26	3710.6	0.19	3711.1	0.20
		②	3685.40	3686.2	0.02	3689	0.10	3695.1	0.26	3693.2	0.21	3693.3	0.21
		③	3693.70	3693.2	−0.01	3696.8	0.08	3703.9	0.28	3701.2	0.20	3701.7	0.22
		平均			0.00		0.08		0.27		0.20		0.21
10mass%塩酸水溶液	基本配合	⑦	3774.7	3733.5	−1.09	3671.5	−2.73	3613.0	−4.28	3580.7	−5.14	3519.2	−6.77
		⑧	3761.6	3724.8	−0.98	3658.2	−2.75	3598.2	−4.34	3566.9	−5.18	3505.7	−6.80
		⑨	3784.7	3740.1	−1.18	3678.0	−2.82	3618.6	−4.39	3586.6	−5.23	3527	−6.81
		平均			−1.08		−2.77		−4.34		−5.18		−6.79
	K−50	④	3756.0	2938.9	−21.75	2813.6	−25.09	2694.5	−28.26	2649.3	−29.46	2591.3	−31.01
		⑤	3726.4	3670.4	−1.50	3611.1	−3.09	3541.9	−4.95	3510.7	−5.79	3444.6	−7.56
		⑥	3771.6	2812.9	−25.42	2671.3	−29.17	2543.2	−32.57	2500.3	−33.71	2443.9	−35.20
		平均			−16.23		−19.12		−21.93		−22.99		−24.59
	K−100	①	3712.1	2044.6	−44.92	1923.3	−48.19	1856.9	−49.98	1827.4	−50.77	1782.8	−51.97
		②	3718.7	1853.0	−50.17	1778.2	−52.18	1656.8	−55.45	1625.1	−56.30	1579.9	−57.51
		③	3703.0	1958.2	−47.12	1802.1	−51.33	1701.5	−54.05	1676.2	−54.73	1637.4	−55.78
		平均			−47.40		−50.57		−53.16		−53.94		−55.09
軽油（鉱物油）	基本配合	⑦	3790.3	3785.1	−0.14	3786.6	−0.10	3788.3	−0.05	3787.6	−0.07	3788.4	−0.05
		⑧	3746.0	3739.2	−0.18	3741.0	−0.13	3743.1	−0.08	3742.4	−0.10	3743.8	−0.06
		⑨	3745.4	3737.9	−0.20	3740.5	−0.13	3742.8	−0.07	3742	−0.09	3743.6	−0.05
		平均			−0.17		−0.12		−0.07		−0.09		−0.05
	K−50	④	3763.5	3749.1	−0.38	3750.8	−0.34	3753.5	−0.27	3751.1	−0.33	3752.5	−0.29
		⑤	3774.3	3760.4	−0.37	3763.3	−0.29	3765.2	−0.24	3763.5	−0.29	3765.7	−0.23
		⑥	3768.3	3755.6	−0.34	3757.7	−0.28	3760.2	−0.21	3757.8	−0.28	3759.7	−0.23
		平均			−0.36		−0.30		−0.24		−0.30		−0.25
	K−100	①	3671.0	3660.9	−0.28	3660.3	−0.29	3660.4	−0.29	3658.4	−0.34	3658.9	−0.33
		②	3730.5	3719.9	−0.28	3719.4	−0.30	3720.0	−0.28	3718.4	−0.32	3718.9	−0.31
		③	3683.9	3671.6	−0.33	3671.4	−0.34	3672.7	−0.30	3670.5	−0.36	3672.4	−0.31
		平均			−0.30		−0.31		−0.29		−0.34		−0.32
ラード（動物油）	基本配合	⑦	3760.0	3758.7	−0.03	3754.9	−0.14	3755.9	−0.11	3752.4	−0.20	3748.9	−0.30
		⑧	3733.3	3731.2	−0.06	3732.1	−0.03	3731.4	−0.05	3727.4	−0.16	3724.4	−0.24
		⑨	3757.9	3754.3	−0.10	3754.3	−0.10	3751.1	−0.18	3750.3	−0.20	3747.3	−0.28
		平均			−0.06		−0.09		−0.11		−0.19		−0.27
	K−50	④	3748.4	3739.4	−0.24	3741.4	−0.19	3737.0	−0.30	3738.4	−0.27	3736.7	−0.31
		⑤	3808.6	3803.3	−0.14	3802.4	−0.16	3801.0	−0.20	3798.9	−0.25	3799.3	−0.24
		⑥	3742.8	3735.7	−0.19	3736.4	−0.17	3736.6	−0.17	3733.7	−0.24	3731.5	−0.30
		平均			−0.19		−0.17		−0.22		−0.25		−0.29
	K−100	①	3698.9	3691.1	−0.21	3691.0	−0.21	3687.9	−0.30	3689.1	−0.26	3688.6	−0.28
		②	3676.1	3669.6	−0.18	3670.7	−0.15	3667.2	−0.24	3665.8	−0.28	3664.5	−0.32
		③	3688.3	3677.7	−0.29	3681.0	−0.20	3676.9	−0.31	3676.8	−0.31	3677.6	−0.29
		平均			−0.23		−0.19		−0.28		−0.29		−0.29
綿実油（植物油）	基本配合	⑦	3725.9	3717.7	−0.22	3709.0	−0.45	3710.8	−0.41	3710.4	−0.42	3705.5	−0.55
		⑧	3771.6	3764.1	−0.20	3759.0	−0.33	3759.2	−0.33	3758.2	−0.36	3754.3	−0.46
		⑨	3754.0	3742.7	−0.30	3739.7	−0.38	3740.0	−0.37	3737.7	−0.43	3733.0	−0.56
		平均			−0.24		−0.39		−0.37		−0.40		−0.52
	K−50	④	3741.2	3727.6	−0.36	3718.8	−0.60	3717.3	−0.64	3718.0	−0.62	3714.4	−0.72
		⑤	3767.0	3751.5	−0.41	3745.1	−0.58	3740.4	−0.71	3740.2	−0.71	3734.4	−0.87
		⑥	3778.8	3760.3	−0.49	3756.8	−0.58	3750.9	−0.74	3749.6	−0.77	3747.5	−0.83
		平均			−0.42		−0.59		−0.69		−0.70		−0.80
	K−100	①	3674.4	3656.1	−0.50	3638.9	−0.97	3628.0	−1.26	3623.9	−1.37	3621.3	−1.45
		②	3695.9	3676.6	−0.52	3661.9	−0.92	3650.9	−1.22	3648.0	−1.30	3645.3	−1.37
		③	3711.3	3685.7	−0.69	3637.8	−1.98	3662.0	−1.33	3661.8	−1.33	3660.7	−1.36
		平均			−0.57		−1.29		−1.27		−1.33		−1.39

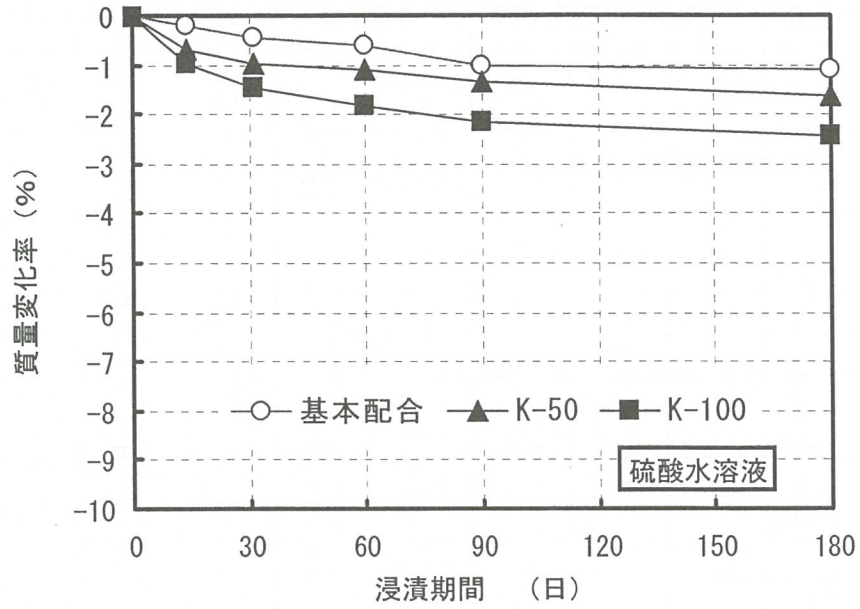


図 4-18　耐薬品性試験結果（10mass%硫酸水溶液）

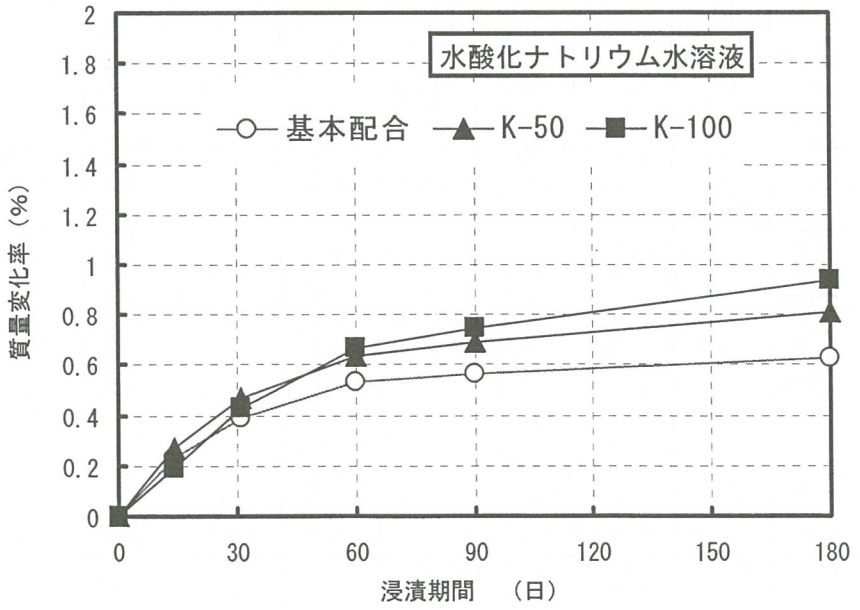


図 4-19　耐薬品性試験結果（10mass%水酸化ナトリウム水溶液）

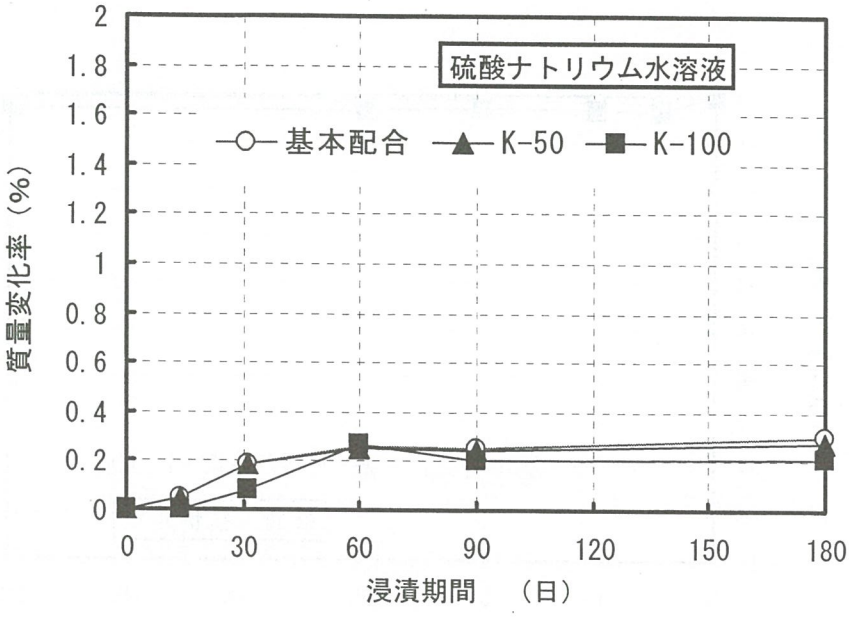


図 4-20　耐薬品性試験結果（10mass%硫酸ナトリウム水溶液）

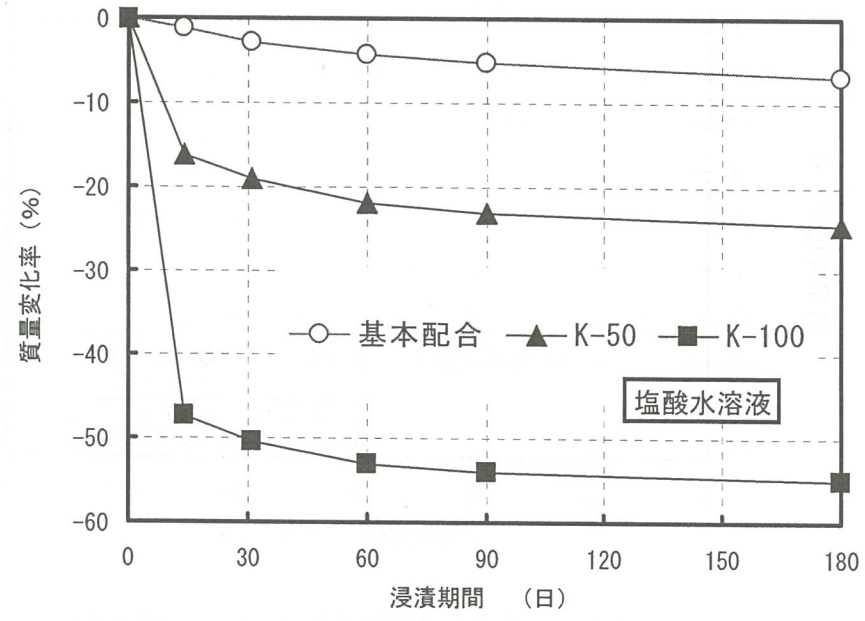


図 4-21　耐薬品性試験結果（10mass%塩酸水溶液）

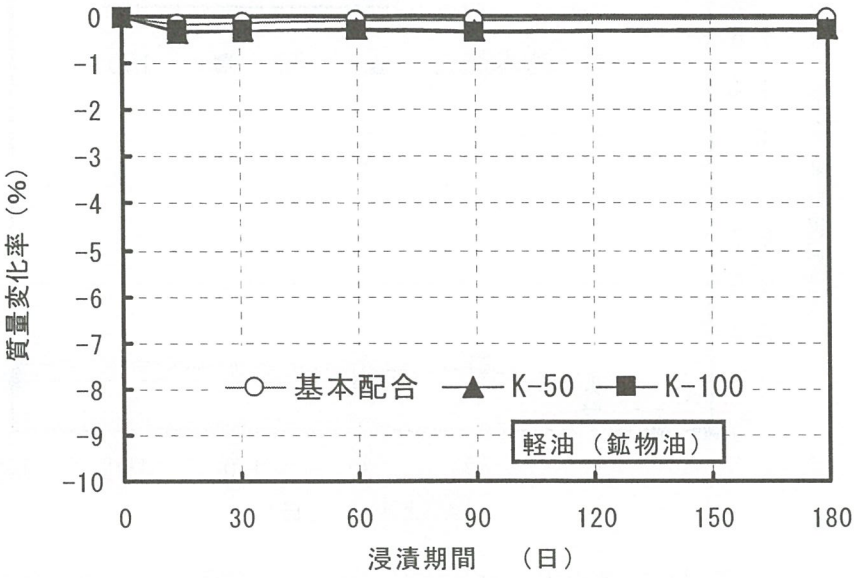


図 4-22　耐薬品性試験結果（軽油［鉱物油］）

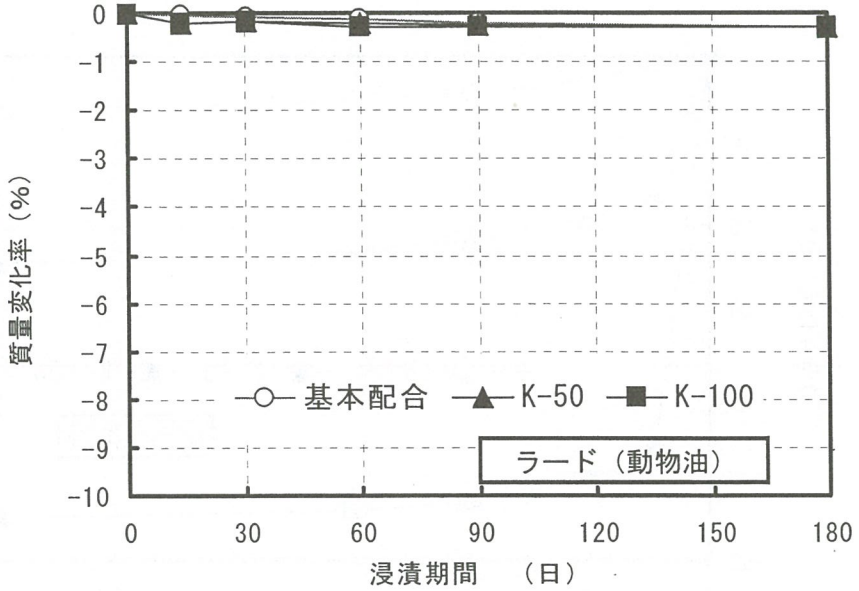


図 4-23　耐薬品性試験結果（ラード［動物油］）

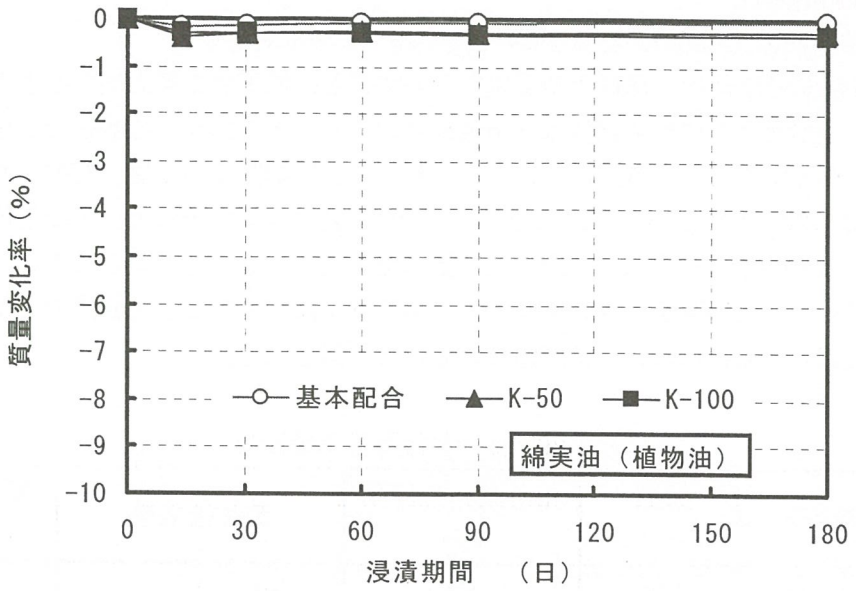


図 4-24　耐薬品性試験結果（綿実油［植物油］）

9）耐凍結融解性

耐凍結融解性試験結果を表 4-26、図 4-25～4-27 に示す。

耐凍結融解性能は、球形灰の置換率が増すごとに低下する傾向にあるようである。ここに、基本配合を含め全試料は non-AE コンクリートであり、各配合で硬化体組成物に大きな相違があるとは考えにくい。したがって、圧縮強度の差異、有効とされる気泡間隔係数（200～250μm）が確保できていない、吸水率等の差によって硬化体中の水分が異なった等の原因が錯綜して耐久性指数に差が生じたものと考えられる。

ただし、これは耐酸性コンクリート用 AE 剤を添加することで回避できるものと思われ、実際の製品化においては問題ないものと推察される。

表 4-26　耐凍結融解性試験結果

試験体番号		最終サイクル	相対動弾性係数 (%)	耐久性指数		質量減少率 (%)
基本	No.1	300	88	88	85	1.1
	No.2	300	84	84		0.2
	No.3	300	84	84		0.2
K-50	No.1	300	83	83	82	7.4
	No.2	300	81	81		13.1
	No.3	300	82	82		9.6
K-100	No.1	300	12	8	31	16.0
	No.2	300	26	21		19.2
	No.3	300	63	63		14.0

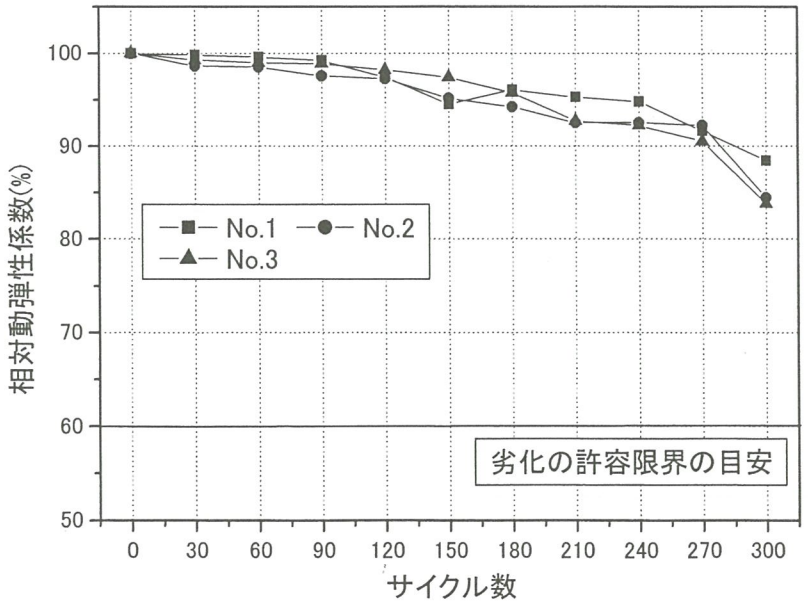


図 4-25　凍結融解性試験結果（相対動弾性係数履歴：基本配合）

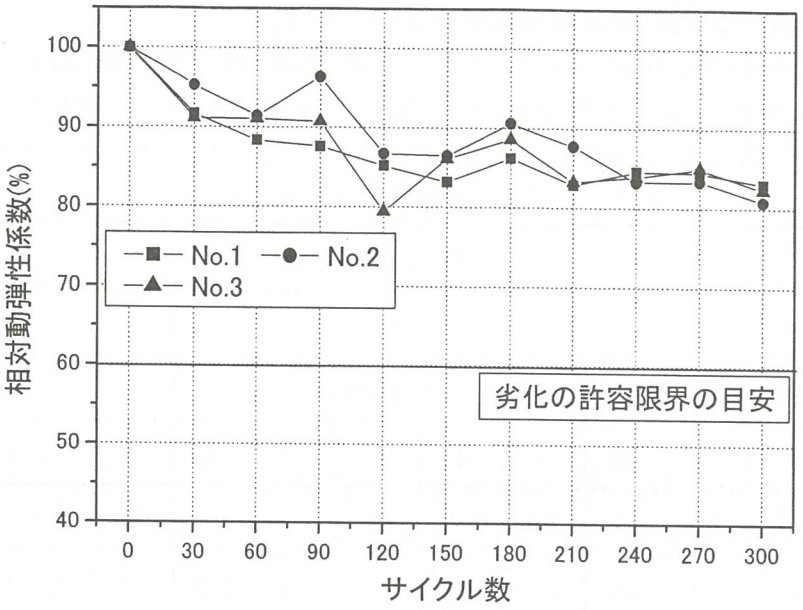


図 4-26　凍結融解性試験結果（相対動弾性係数履歴：K-50）

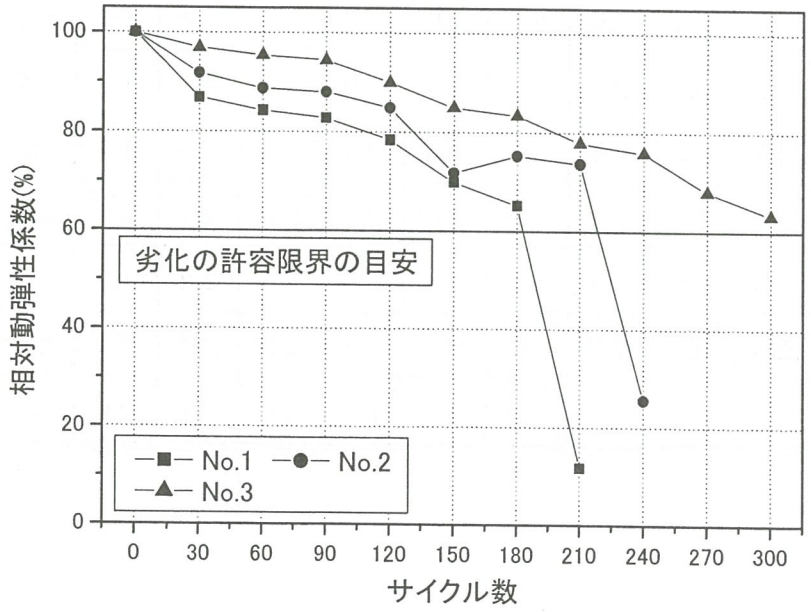


図 4-27　凍結融解性試験結果（相対動弾性係数履歴：K-100）

10）中性化

中性化に関する試験の結果を表 4-27～4-29 に示す。

これら促進中性化試験によって得られた結果と置換された球形灰の率に相関は見られなかった。基本的な硬化体組成物に変化があったとは考えにくく、中性化の進行速度の差に大きく影響を及ぼす連続的な空隙等の要因に変化がなかったためと考えられる。

表 4-27　促進中性化試験結果（基本配合）

測定点	中性化深さ(mm)														
	No.1					No.2					No.3				
	材齢(週)					材齢(週)					材齢(週)				
	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26
①	2.9	1.9	2.8	2.5	2.3	1.5	3.2	2.3	2.2	2.7	2.5	2.0	2.3	2.5	2.4
②	1.8	1.7	2.7	2.1	2.6	1.2	2.8	2.3	2.9	2.3	1.7	1.5	1.8	2.3	3.0
③	1.5	1.4	2.4	1.8	2.9	1.6	3.1	2.2	2.1	2.7	2.6	3.4	2.9	2.8	2.6
④	2.0	1.8	2.2	2.0	1.7	1.8	2.5	2.3	2.7	2.9	2.1	1.4	2.2	3.1	2.9
⑤	2.0	2.8	2.4	2.4	2.0	2.8	2.9	2.8	2.7	2.4	1.5	2.9	2.4	2.7	2.2
⑥	1.3	2.9	2.2	2.1	2.6	4.1	2.4	3.0	2.6	3.0	1.2	2.2	1.9	2.2	2.7
⑦	1.0	1.7	2.7	1.8	2.1	2.3	2.5	2.4	2.4	2.6	1.5	3.6	2.6	2.8	2.5
⑧	1.6	1.5	2.4	1.8	2.6	1.9	2.5	2.2	2.3	2.4	2.9	1.9	2.6	3.1	3.0
⑨	2.0	1.5	1.9	1.8	2.4	2.8	2.4	2.8	3.3	2.2	1.8	2.0	2.2	2.7	2.8
⑩	1.3	3.0	2.5	2.3	2.2	1.7	2.5	2.3	2.6	2.4	2.1	2.0	2.2	2.5	3.0
平均	1.7	2.0	2.4	2.1	2.3	2.2	2.7	2.5	2.6	2.6	2.0	2.3	2.3	2.7	2.7

表 4-28　促進中性化試験結果（K-50）

測定点	中性化深さ(mm)														
	No.1					No.2					No.3				
	材齢(週)					材齢(週)					材齢(週)				
	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26
①	3.6	3.5	3.4	3.0	3.8	1.9	2.7	2.8	4.2	2.9	1.6	3.8	2.9	3.1	4.0
②	2.5	3.0	3.1	3.7	2.9	3.0	2.9	3.1	3.0	3.5	2.0	3.1	3.2	4.4	4.1
③	3.2	3.2	3.3	3.6	3.8	3.7	4.0	3.5	4.4	3.1	2.8	2.6	2.7	2.7	3.5
④	3.3	3.3	3.1	2.6	3.0	2.9	4.2	4.6	2.0	2.6	3.6	3.3	3.0	2.1	4.0
⑤	2.6	3.8	2.9	2.5	2.6	3.2	4.5	3.4	2.4	3.7	3.0	2.4	2.8	3.0	3.6
⑥	1.8	3.0	2.6	3.1	2.9	2.6	3.1	2.9	2.7	2.5	3.4	3.5	3.4	3.3	2.9
⑦	2.3	2.6	2.4	2.2	2.8	3.0	2.2	3.0	4.2	3.0	2.9	4.1	3.5	3.5	3.4
⑧	2.7	3.3	3.5	4.5	3.6	3.2	3.8	4.0	3.6	4.0	4.9	4.3	4.0	2.8	3.7
⑨	2.9	4.2	4.1	5.2	3.8	6.2	2.9	3.0	4.6	4.6	3.8	2.2	3.3	3.9	3.3
⑩	2.5	3.6	2.8	2.4	3.9	3.1	2.3	3.4	2.8	3.6	3.5	4.4	4.6	5.7	4.6
平均	2.7	3.3	3.1	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4	3.2	3.4	3.3	3.5	3.7

表 4-29　促進中性化試験結果（K-100）

測定点	中性化深さ(mm)														
	No.1					No.2					No.3				
	材齢(週)					材齢(週)					材齢(週)				
	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26
①	1.7	1.7	2.0	1.4	2.0	2.2	1.3	2.9	3.6	4.0	2.1	0.9	1.7	2.0	1.6
②	1.9	0.8	2.7	1.0	1.9	1.8	2.7	1.3	4.7	3.3	2.5	2.2	2.3	2.3	2.2
③	0.0	2.1	2.2	2.9	3.0	2.0	2.9	3.3	3.2	2.9	0.0	3.2	1.8	2.1	2.6
④	0.0	1.7	1.3	2.5	2.2	1.9	0.8	2.7	0.8	2.5	2.3	0.3	1.6	2.3	1.8
⑤	3.8	3.1	1.9	2.5	3.2	1.3	3.7	2.2	4.5	2.8	1.8	2.2	1.8	1.3	3.0
⑥	1.7	3.8	2.0	1.9	2.6	3.0	1.0	2.4	3.7	1.3	2.0	1.3	1.8	2.2	2.6
⑦	2.7	3.4	1.5	1.1	2.2	2.5	1.3	2.2	2.3	3.0	2.8	3.5	3.1	3.1	2.4
⑧	1.7	3.1	1.0	2.6	2.5	1.2	3.6	1.5	1.9	2.6	1.7	2.3	1.9	1.8	2.1
⑨	0.0	1.1	2.1	1.7	2.0	2.4	1.3	3.2	2.3	2.8	0.9	1.0	1.3	1.9	2.1
⑩	4.3	1.3	2.2	1.9	1.7	1.7	1.5	2.9	0.8	3.0	1.5	2.0	1.8	1.9	2.5
平均	1.8	2.2	1.9	2.0	2.3	2.0	2.0	2.5	2.8	2.8	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3

11）発錆

発錆試験結果を表 4-30, 4-31 に示す。

発錆面積率は、球形灰の置換率が増すごとに増大するようである。現行スラグ及び球形灰を用いた耐酸性コンクリートの反応機構において、普通コンクリートでいうところの CSH やブリーデル氏塩のような Cl^-を固定化する物質の生成に差が生じたとは考えにくい。また、球形灰と粉砕スラグの酸化還元電位の違いによる要因も考えられたがその差はわずかであり、決定的な発錆要因と言及できない。さらに、基本配合に比べ球形灰使用品の方が未反応の水ガラスが多く、それを介した発錆も考えられたため、水ガラス浸漬下での鉄筋の発錆について調べたが、７日の浸漬期間では発錆はみられなかった。

これらの結果から、現時点では、球形灰を用いたコンクリート製品を設計する場合には、無筋コンクリートとするか、鉄筋コンクリートとする場合にはエポキシ塗装鉄筋を用いるなどの留意が必要になると思われる。

表 4-30　発錆試験結果

試験体番号		鉄筋番号	錆面積 (mm^2)	錆面積率(%)		
				測定値	平均値	
基本配合	No.1	1	0	0	0.0	2.4
		2	0	0		
		3	0	0		
		4	0	0		
	No.2	1	0	0	3.3	
		2	25	0.5		
		3	0	0		
		4	628	12.5		
	No.3	1	0	0	3.9	
		2	312	6.2		
		3	55	1.1		
		4	412	8.2		

表 4-31　発錆試験結果

試験体番号		鉄筋番号	錆面積 (mm^2)	錆面積率(%)		
				測定値	平均値	
K-50	No.1	1	0	0	20.7	12.0
		2	3795	75.5		
		3	0	0		
		4	362	7.2		
	No.2	1	0	0	6.2	
		2	161	3.2		
		3	266	5.3		
		4	824	16.4		
	No.3	1	141	2.8	9.2	
		2	794	15.8		
		3	437	8.7		
		4	468	9.3		
K-100	No.1	1	1392	27.7	52.6	56.9
		2	3881	77.2		
		3	3624	72.1		
		4	1679	33.4		
	No.2	1	2644	52.6	68.5	
		2	2428	48.3		
		3	3976	79.1		
		4	4725	94.0		
	No.3	1	2202	43.8	49.5	
		2	1981	39.4		
		3	1981	39.4		
		4	3785	75.3		

12）耐摩耗性

耐摩耗性試験結果を表 4-32 に示す。

耐摩耗性は、球形灰の置換率にかかわらずほぼ一定の値であった。この結果から、一般的なコンクリート製品と同様の使用用途に適用できるものと思われる。

表 4-32　耐摩耗性試験結果

試験体番号		質量(g)		質量減少量 (g)	質量減少率 (%)	
		試験前	試験後			
基本	No.1	263.120	261.984	1.136	0.43	0.40
	No.2	283.353	282.308	1.045	0.37	
	No.3	287.398	286.278	1.120	0.39	
K-50	No.1	278.699	277.536	1.163	0.42	0.40
	No.2	263.762	262.670	1.092	0.41	
	No.3	288.178	287.090	1.088	0.38	
K-100	No.1	267.308	266.222	1.086	0.41	0.41
	No.2	272.298	271.189	1.109	0.41	
	No.3	274.974	273.853	1.121	0.41	

4-4. まとめ

本実験より、基本配合と比べ球形灰を用いた耐酸性コンクリートのフレッシュ性状は向上することが示された。また、機械的特性及び耐久性は、粉砕 K 煙道灰を除いて基本配合と同程度もしくは若干下回るものの、一般的なコンクリート製品用の材料として適用可能な範囲にあると言える。ただし、凍結融解抵抗性及び鉄筋の発錆等の耐久性が低い項目もあることから、材料の選定及び配合設計において留意が必要である。

第５章　実用化に関する検討

5-1. はじめに

ここでは、球形灰を原料とした耐酸性コンクリートの実用化に向けた総合評価として、製品の長期安定性に関する検討、及び事業化を想定したコスト評価を行う。

5-2. 長期安定性評価

以下の内容につき長期安定性評価を行った。

１）目的

耐酸性コンクリートを実際に硫化水素が発生する槽の気相中へ暴露させ、同条件の対照材料と所定の項目について比較することで、その耐酸性能を評価することを目的とした。

２）試験概要

（１）暴露場所

Ａ処理センター内

①汚泥濃縮槽

②最初沈殿地　　計２箇所

（２）暴露期間

平成 15 年度から　１年間

（３）供試体の種類と本数

表 5-1　供試体の種類と本数

No.	名　　称	設置本数	設置箇所	合計
1	耐酸性コンクリート	４本	２箇所	８本
2	従来の耐酸性コンクリート	４本	２箇所	８本
3	普通コンクリート	４本	２箇所	８本

（４）供試体の仕様

表 5-2　供試体の仕様

No.	名　　称	結合材	形状	質量	設計基準強度
1	Ｋ球形灰	球形灰 （Ｋ球形灰）	φ10×20cm 円柱供試体	3.8 (kg/本)	50 (N/mm^2)
2	基本配合	現行スラグ			
3	普通コンクリート	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ			

（５）試験項目及びその方法

①質量変化率測定試験 …… 予め供試体は20℃の水中で十分（恒量になるまで）吸水させ、曝露試験開始直前に表面の水分を十分に拭き取った後、その質量（基準質量）を測定する。その後曝露を開始し、所定の時期に引き上げ、表面をウエス等で水分や脆弱部を除去した後質量を測定、基準質量に対する質量差の比を質量変化率として表す。

計測時期：試験開始時、
1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月、12ヶ月
計6回　　母数：3本

②中性化深さ測定試験 …… 供試体は、両端面をエポキシ樹脂等の耐酸材料でコーティングし、質量変化率測定試験同様十分に吸水させる。試験前に供試体直径をノギス等で測定し、曝露試験開始する。所定の時期に一方の端面から約25mmの位置で供試体を切断し、切り出された断面に1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧し、表面の赤色に呈色した部分の直径を測定する。試験前に測定した直径から呈色した部分の直径を減じ、1/2にしたものを中性化深さとする。（表面（侵食され断面欠損がある場合は試験前の表面）から赤色に呈色した部分までの距離を測定（算出）する）。測定方法はJIS A 1152に準拠し、測定位置は直交する直径位置とし平均値を中性化深さとする。測定後は切断面にエポキシ樹脂等を再度塗布する。

計測時期：試験開始時、1ヶ月、3ヶ月、
6ヶ月、9ヶ月、12ヶ月　計6回

③寸法変化 …… (2)にて測定した試験前の供試体直径を初期値とし、曝露試験開始後所定の時期に試験体の直径を測定した測定値との差を寸法変化量とする。

④圧縮強度試験 …… JIS A 1108に準拠する。

供試体：円柱供試体φ10×20cm
試験時期：曝露試験開始直前
母数：3

⑤環境測定 …… 所定の時期に以下に示す項目について所定の器具を用い計測する。一方、同項目を一定の間隔で連続的に測定する拡散式硫化水素測定器(GHS-7AT㈱ガステック社製)を使用し、月に一度データ回収することも可能。

a．硫化水素濃度：ガス検知器
b．温度：デジタル式温度計
c．湿度：デジタル式湿度計

3）試験結果

（1）環境測定

環境測定結果を表 5-3 に示す。

表 5-3　環境測定結果

測定場所	測定項目	曝露期間					
		開始日	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	12ヶ月
汚泥濃縮槽	硫化水素濃度(ppm)	3000	1500	250	200	140	500
	槽内温度(℃)	31.0	36.0	16.0	14.0	33.0	33.0
	槽内湿度(%)	81	60	—	—	47	—
	外気温(℃)	30.0	31.0	15.0	15.0	33.0	32.0
	外湿度(%)	59	30	—	37	31	—
最初沈澱池	硫化水素濃度(ppm)	45	55	30	50	240	80
	槽内温度(℃)	30.0	28.0	18.5	15.0	27.0	31.9
	槽内湿度(%)	80	25	—	—	48	—
	外気温(℃)	34.0	27.0	15.0	14.0	33.0	31.0
	外湿度(%)	37	29	—	35	35	—

（2）圧縮強度試験結果

曝露前圧縮強度試験結果を表に示す。

表 5-4　圧縮強度試験結果

配合名	材齢(日)	圧縮強度平均 (N/mm²)
K球形灰	23	54.0
基本配合		61.2
普通ｺﾝｸﾘｰﾄ		57.5

（3）質量変化率測定試験結果

汚泥濃縮槽、最初沈澱池の質量変化率測定試験結果をそれぞれ図 5-1 に示す。平均して硫化水素濃度の高い汚泥濃縮槽では、現行スラグ及びK球形灰を使用した耐酸性コンクリートの質量変化率が普通コンクリートのそれに比べ小さく、実地においても耐酸性が認められた。一方、最初沈殿地では全ての水準で試験結果に大きな差はないものの、曝露期間が長くなるにつれ質量変化率の差は汚泥濃縮槽同様、顕著になっていくものと推察される。

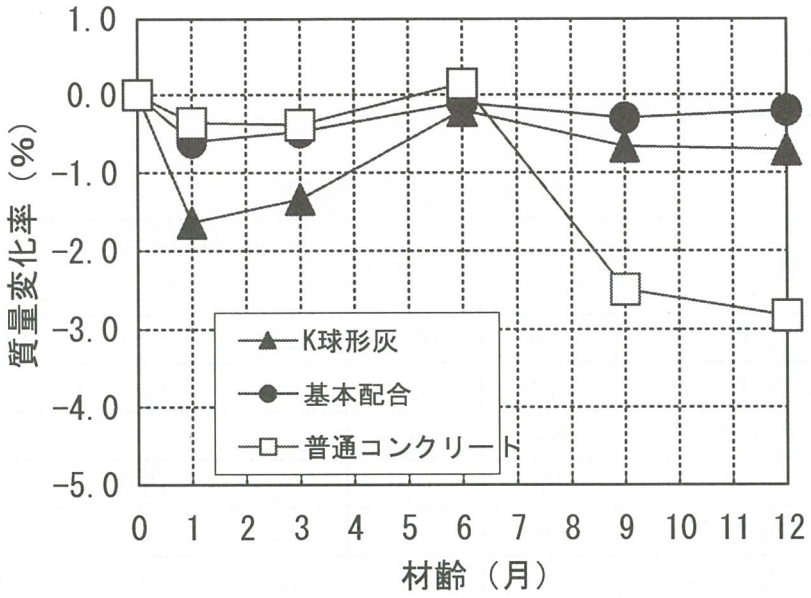


図 5-1-1　汚泥濃縮槽　質量変化率測定試験結果

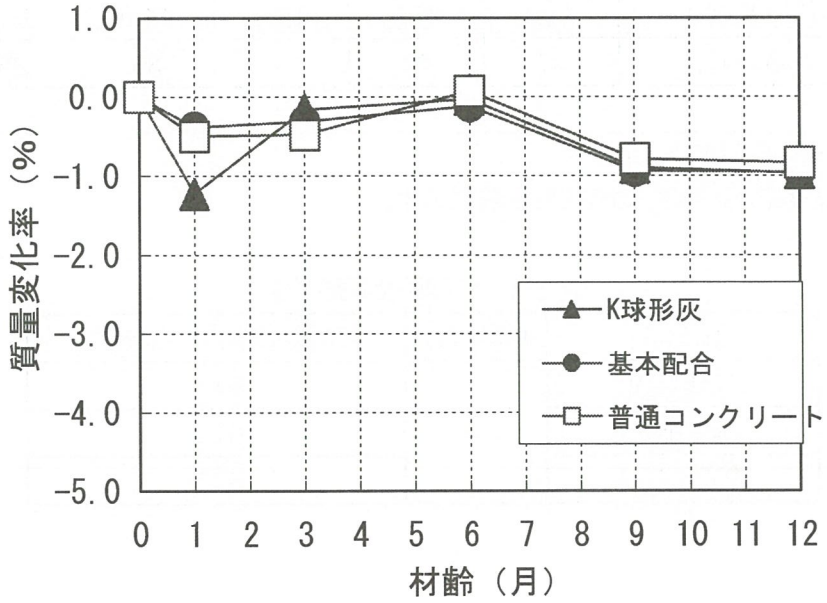


図 5-1-2　最初沈澱池　質量変化率測定試験結果



写真 5-1-1　供試体外観状況－Ｋ球形灰
（汚泥濃縮槽 3 ヶ月）



写真 5-1-2　供試体外観状況－Ｋ球形灰
（汚泥濃縮槽 6 ヶ月）



写真 5-1-3　供試体外観状況－Ｋ球形灰
（汚泥濃縮槽 9 ヶ月）



写真 5-1-4　供試体外観状況－Ｋ球形灰
（汚泥濃縮槽 12 ヶ月）

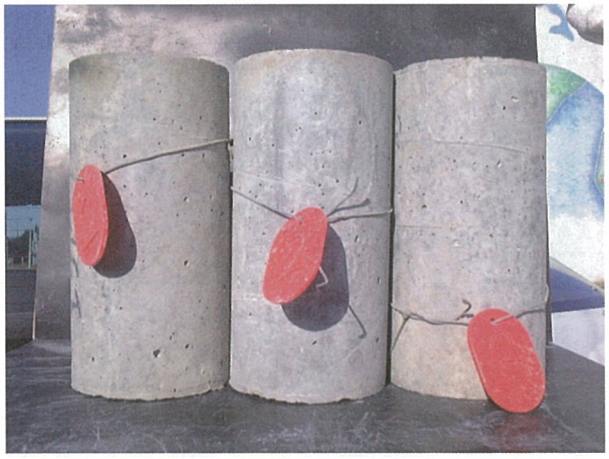


写真 5-2-1　供試体外観状況－基本配合
（汚泥濃縮槽 3 ヶ月）



写真 5-2-2　供試体外観状況－基本配合
（泥濃縮槽 6 ヶ月）



写真 5-2-3　供試体外観状況－基本配合
（汚泥濃縮槽 9 ヶ月）



写真 5-2-4　供試体外観状況－基本配合
（汚泥濃縮槽 12 ヶ月）



写真 5-3-1　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（汚泥濃縮槽 3 ヶ月）



写真 5-3-2　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（汚泥濃縮槽 6 ヶ月）



写真 5-3-3　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（汚泥濃縮槽 9 ヶ月）



写真 5-3-4　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（汚泥濃縮槽 12 ヶ月）



写真 5-4-1　供試体外観状況－K球形灰
（最初沈殿池 3 ヶ月）



写真 5-4-2　供試体外観状況－K球形灰
（最初沈殿池 6 ヶ月）



写真 5-4-3　供試体外観状況－K球形灰
（最初沈殿池 9 ヶ月）



写真 5-4-4　供試体外観状況－K球形灰
（最初沈殿池 12 ヶ月）

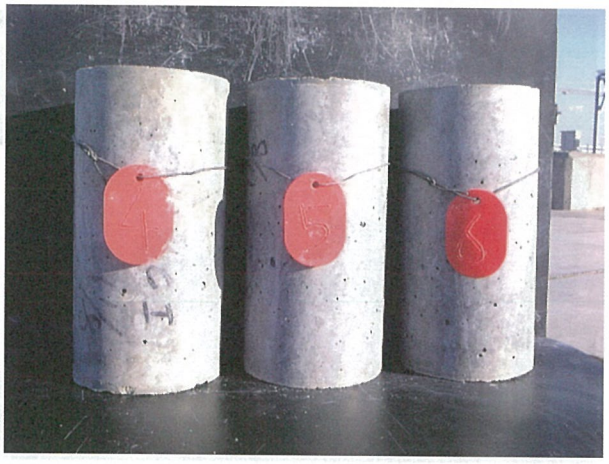


写真 5-5-1　供試体外観状況－基本配合
（最初沈殿池 3 ヶ月）



写真 5-5-2　供試体外観状況－基本配合
（最初沈殿池 6 ヶ月）



写真 5-5-3　供試体外観状況－基本配合
（最初沈殿池 9 ヶ月）

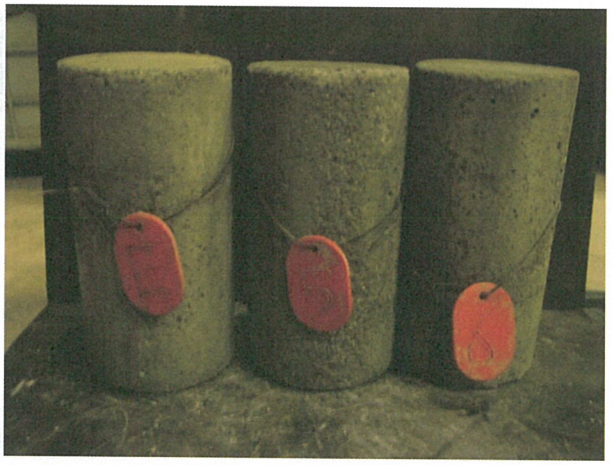


写真 5-5-4　供試体外観状況－基本配合
（最初沈殿池 12 ヶ月）

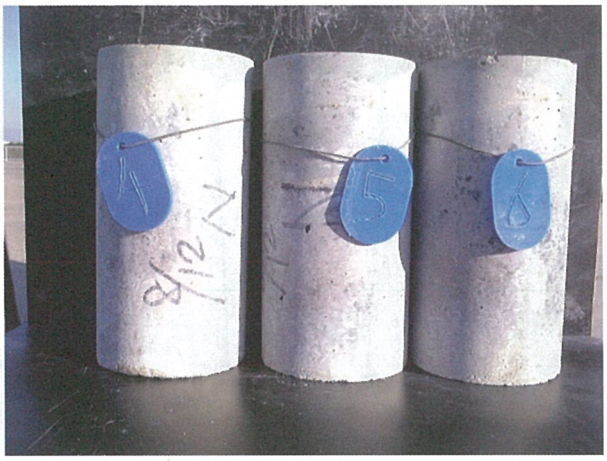


写真 5-6-1　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（最初沈殿池 3 ヶ月）



写真 5-6-2　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（最初沈殿池 6 ヶ月）



写真 5-6-3　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（最初沈殿池 9 ヶ月）



写真 5-6-4　供試体外観状況－普通ｺﾝｸﾘｰﾄ
（最初沈殿池 12 ヶ月）

（4）中性化深さ、寸法変化量測定試験結果

中性化深さ、寸法変化量測定試験結果を表 5-3 に示す。

硫化水素濃度が高い No.3 濃縮層では、エコノベル、球形灰の中性化が見られた。普通コンクリートは中性化が見られなかったが、供試体表面に硫黄分が付着・膨張していたため、今後は中性化が見られると推察される。

7 系最初沈殿池の中性化深さはほぼ 0mm であり、中性化はどの供試体も確認できなかった。

表 5-3　中性化深さ、寸法変化量測定試験結果

測定場所	配合名	曝露 1 ヶ月		曝露 3 ヶ月		曝露 6 ヶ月	
		寸法変化量 (mm)	中性化深さ (mm)	寸法変化量 (mm)	中性化深さ (mm)	寸法変化量 (mm)	中性化深さ (mm)
汚泥濃縮槽	K球形灰	-0.1	0.2	0.0	0.2	0.91	0.63
	基本配合	-0.2	-0.3	0.4	0.1	1.07	0.52
	普通コンクリート	0.0	0.0	0.2	-0.1	0.62	-0.27
最初沈澱池	K球形灰	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	0.4	-0.2
	基本配合	0.0	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0
	普通コンクリート	0.0	0.1	0.2	0.0	0.3	-0.1

測定場所	配合名	曝露 9 ヶ月		曝露 12 ヶ月	
		寸法変化量 (mm)	中性化深さ (mm)	寸法変化量 (mm)	中性化深さ (mm)
汚泥濃縮槽	K球形灰	-0.1	1.3	0.1	0.6
	基本配合	1.9	-0.2	-0.2	0.9
	普通コンクリート	0.3	0.1	-1.0	1.1
最初沈澱池	K球形灰	0.3	0.5	-0.1	1.1
	基本配合	-0.2	0.8	-0.1	0.7
	普通コンクリート	0.2	0.0	-1.5	1.2

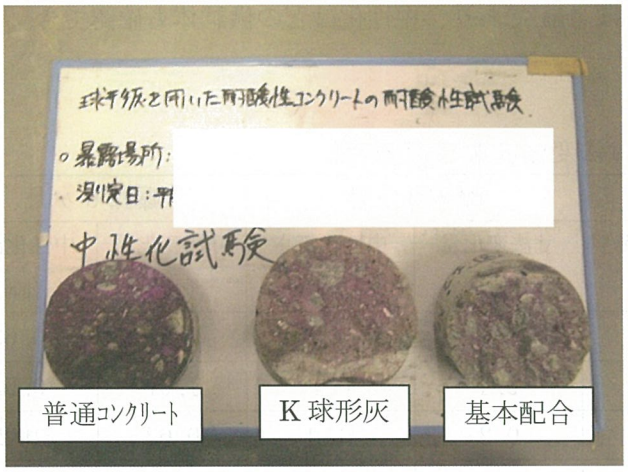


写真 5-7-1　中性化状況
（汚泥濃縮槽 3 ヶ月）



写真 5-7-2　中性化状況
（汚泥濃縮槽 6 ヶ月）



写真 5-7-3　中性化状況
（汚泥濃縮槽 9 ヶ月）

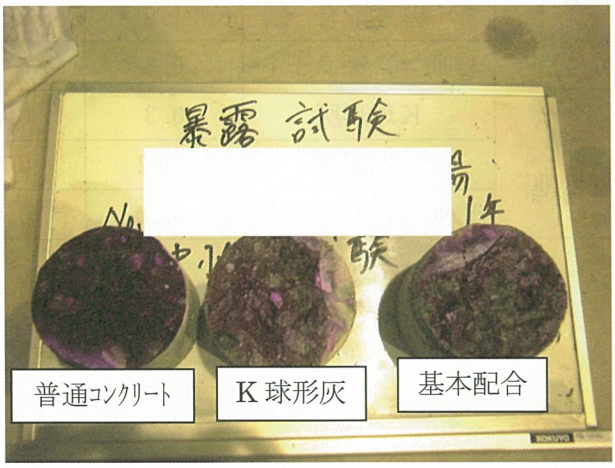


写真 5-7-4　中性化状況
（汚泥濃縮槽 12 ヶ月）

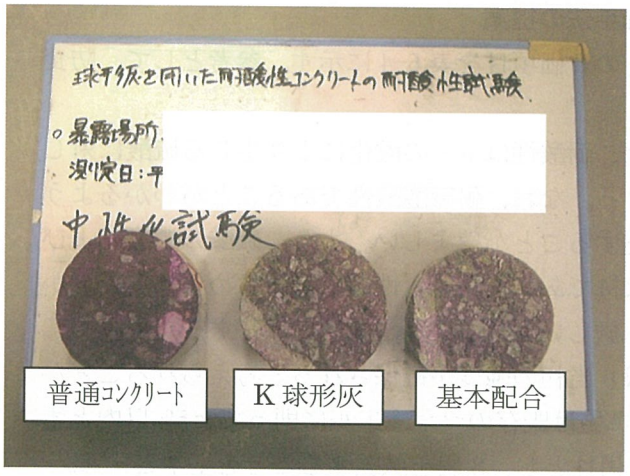


写真 5-8-1　中性化状況
（最初沈殿池 3 ヶ月）



写真 5-8-2　中性化状況
（最初沈殿池 6 ヶ月）

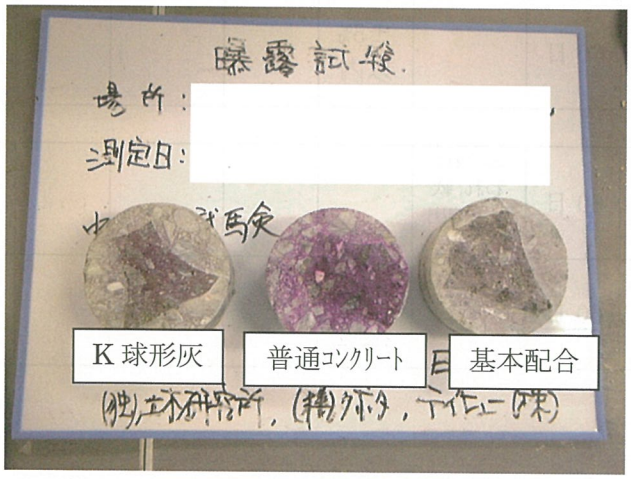


写真 5-8-3　中性化状況
（最初沈殿池 9 ヶ月）



写真 5-8-4　中性化状況
（最初沈殿池 12 ヶ月）

5-3. 耐酸性評価手法について

耐酸性コンクリートの耐酸性評価手法は、セメントが酸と反応して化学的に変質（腐食）するかどうかの観点と、酸がコンクリート内を浸透して鉄筋位置でのコンクリートの中性化を引き起こすかどうかの観点の２点から検討する必要がある。

5-3-1. コンクリートの耐腐食性に関する評価手法の提案

既存のコンクリート耐腐食性試験方法とその評価項目を表 5-4 に示す。参考として、防食被覆工法も併記する。

下水道施設については、特殊な場合を除き、耐酸性は H_2S の酸化により生じる硫酸に対して求められるため、試験液の種類は硫酸とする。なお、耐硫酸酸性であることがわかるように、表記に当たっては耐酸性（硫酸）と記述することが望ましい。また、硫酸の濃度および浸漬期間については、コンクリートが構造部材であって耐腐食性が厳密に求められることから、既存の下水道施設関連の評価方法で最も厳しい 10%硫酸および 60 日とする。

評価項目は、コンクリートが変質しない限り当初の強度が確保されると考えられることから、変質の評価項目である質量変化とし、基準値は既存のマニュアルに則って±5%以内とする。またこれに伴い、供試体はφ10×20cm 円柱とし、3 個を試験することを基本とする。

表 5-4　耐腐食性試験方法および評価項目

		試験方法				評価項目					
		供試体	試験液	温度	期間	外観	質量	長さ	動弾性係数	曲げ強度	圧縮強度
既存	コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法[1)]	JIS A 1132 (3 個)	5%硫酸 2%塩酸	20℃ ± 2℃		○	○	○	○	○	○
	コンクリート改修技術マニュアル(汚泥処理施設編)[2)]	φ10× 20cm 円柱	10%硫酸		60 日		±5% 以内				
	参考										
	コンクリート防食指針(案)(D 種)[3)]		10%硫酸		60 日	ふくれ, われ, 軟化, 溶出なし					
提案	コンクリートの耐食性評価手法	φ10× 20cm 円柱 ×3	10%硫酸		60 日		±5% 以内				

5-3-2. 酸の浸透拡散抵抗性に関する評価手法の提案

試験方法は、基本的に耐腐食性試験方法と同じとするが、既存のマニュアルを参考として、硫酸濃度は5%、試験期間は30日、供試体はφ10×20cm円柱3個とする。

評価項目は中性化深さとし、基準値は既存のマニュアルに則って3mm以下とする。

表5-5　既存の酸浸透拡散抵抗性試験方法および評価項目

		試験方法				評価項目
		供試体	試験液	温度	期間	中性化深さ
既存	コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法[1)]	JIS A 1132 (3個)	5%硫酸 2%塩酸	20℃ ±2℃		○
既存	コンクリート改修技術マニュアル(汚泥処理施設編)[2)]	φ10×20cm円柱	5%硫酸		30日	3mm以下
提案	酸の浸透拡散抵抗性の評価手法	φ10×20cm円柱×3	5%硫酸		30日	3mm以下

出典

1) 建材試験センター規格（JSTM C 7401T-1992)

2) 東京都下水道局施設管理部、平成12年 10月

3) 日本下水道事業団、平成9年6月

5-4. 耐酸性コンクリートの適用範囲

球形灰使用の耐酸性コンクリートは、基本配合（スラグ配合）の耐酸性コンクリートに比べて若干性能は落ちるが、求められる強度、耐酸性は有している。従って、土木ブロックなどの各種無筋コンクリート製品への適用が可能と考えられる。さらに、発錆防止対策を確立できれば、ヒューム管等の鉄筋コンクリートへの利用が可能になり、適用範囲が拡がる。

表5-6　耐酸性コンクリートの適用範囲

設計区分 / 強度 / 製造方法		無筋コンクリート 18	24	30	40↑	鉄筋コンクリート 18	24	30	40↑	プレストレストコンクリート 18	24	30	40↑
即時脱型		平板 境界ブロック 土木ブロック ILB				—				—			
形状「小」 流し込み 形状「大」		平板 境界ブロック L型擁壁 土木ブロック 消波ブロック			—		RC-1 L型擁壁 側溝 土木ブロック	RC-2 擬木 セグメント 擁壁 B型掛渠 RC-3 ボックスカルバート	—				PC-1 枕木 ボックスカルバート 橋桁
その他特殊な製造方法	遠心成形	—				—		RC-4 ヒューム　推進 パイル		—			RC-2 ポール パイル

□：現状での球形灰の適用可能領域

□：改良により球形灰の適用が可能になる領域

5-5. 耐酸性コンクリートの販売価格

5-5-1. 試算条件

前章まで述べてきた結果をもとに球形灰を用いた耐酸性コンクリートで製品化する際に必要となる条件を勘案し、以下に示す組み合わせを設定した。これらを相対的に比較することでコスト評価を行うものとする。なお、基準となるCASE-Ⅰを100とし、製品を1ｔ製造・販売するときの費用について比較するものとする。また、ここでは自治体より下水溶融スラグを加工しない状態で購入し、球形灰は下水溶融スラグと同一の価格で購入したと仮定した。

○CASE-Ⅰ：基本配合＋普通鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品

○CASE-Ⅱ：K-100＋普通鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品

○CASE-Ⅲ：K-100＋エポキシ塗装鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品

○CASE-Ⅳ：K-100からなる無筋耐酸性コンクリート製品

5-4-2. 耐酸性コンクリートの販売価格

各CASEの販売価格（＝製造コスト＋販売コスト）を下表に示す。

球形灰を用いることで耐酸性コンクリートとしての製造コストは低減できる。しかし、鉄筋の発錆を予防するためにエポキシ塗装鉄筋を使用した場合、その効果が吸収され逆にコスト高となる。また、無筋コンクリートで製品を製造した場合には、大きくコストダウンになる一方、無筋を許容する製品種が少ないことが懸念される。

表5-7　製品1ｔ当たりの販売価格比較

No.	CASE	製造コスト	販売コスト	販売価格
1	CASE-Ⅰ	100	100	100
2	CASE-Ⅱ	97	100	97
3	CASE-Ⅲ	103	100	103
4	CASE-Ⅳ	87	100	89

5-6. 事業費の試算について

5-6-1. 想定する事業形態

事業費の試算に当たっては、下水処理場内で下水汚泥焼却灰から球形灰を製造し、地元のコンクリート二次製品メーカーがそれを原料とした耐酸性コンクリート二次製品を生産、二次製品は自治体が全量を買い上げて公共事業に活用する、という事業を想定する。

この事業形態は、下図に示すとおり球形灰は廃棄物（汚泥焼却灰）を原料とするが、得られた球形灰を有価物として有償売却するところがポイントである。そうすることで、下水処理場としては売却益が見込め、これを球状化炉運転資金の一部として利用すれば、下水処理場でのコスト削減が見込める。また、球形灰を利用する企業側は廃棄物処理業者の資格が不要となり、地元の幅広いコンクリート二次製品業者が参加できる事業形態が実現できる。

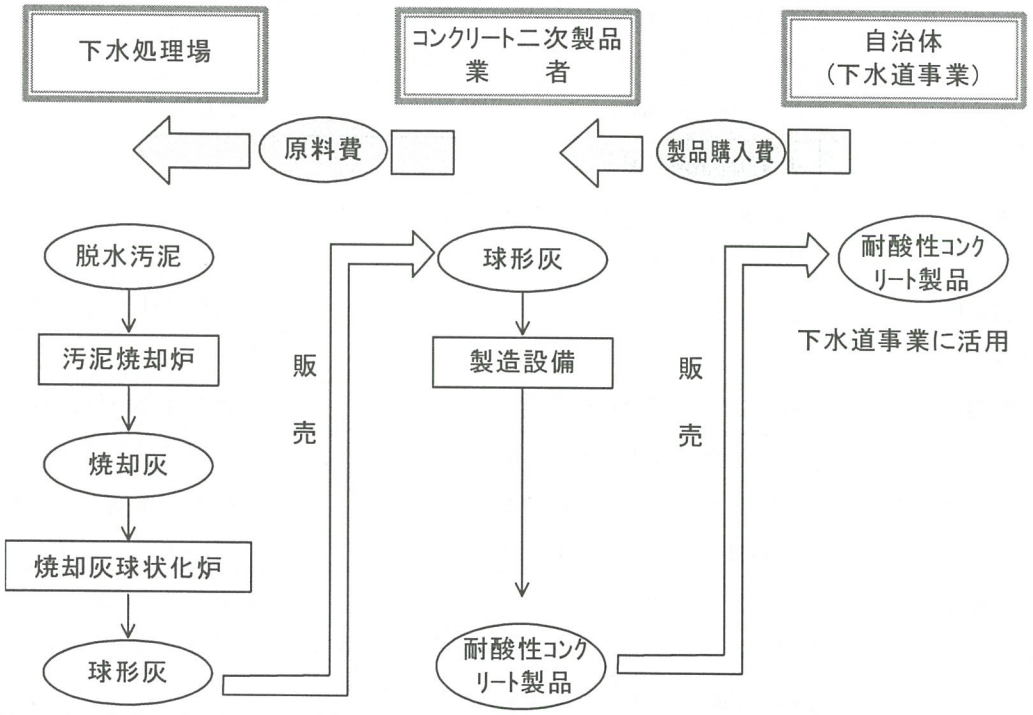


図 5-3　球形灰を用いた耐酸性コンクリート製品化事業

5-6-2. 試算条件

事業費の試算条件を表 5-8 に示す。

ここでは、球状化設備を建設するケースと、その比較対照に灰溶融設備を建設したケースの２ケースについて検討する。

球状化、灰溶融設備の共通条件として、処理規模を 5t-灰/日、製品引き渡し場所を処理場に、人件費 500 万/人年、雇用人員については増員分（２人）のみ、とする。減価償却については自治体負担分のみの建設費を対象とし、定額法にて算出する。

なお、製品売却単価については、コンクリート二次製品業者での製品粉砕工程が不要になる分、球形灰の方がスラグよりも高価に販売できるものとした。

表 5-8　球状化設備の事業コスト　試算条件

項　　目	条　　件	備　　考
検討ケース	既設焼却設備に、①球状化設備、②灰溶融設備、を併設した２ケースについて検討	
設備フロー	添付資料を参照	7-1.項
原　　料	汚泥流動焼却灰	
最終製品	①球形灰　　（球状化設備より） ②溶融スラグ（灰溶融設備より）	
設備規模	208kg/h	24h/日運転で 5t/日
設備運転時間	24h/日	
設備稼働率	85%　　（310 日/年）	既設焼却設備に合わせる
製品輸送費	0 円/t-灰　（球形灰、溶融スラグともに）	処理場引き渡しのため
製品売却単価	①球　形　灰：1,500 円/t ②溶融スラグ：　500 円/t	粉砕が不要な分、単価は球形灰の方が高い
人件費単価	500 万円/人年	年間２人増員
減価償却費	補助率＝55%、利子率 3%、耐用年数＝15 年（機電），50 年（土建）、償却後残存価値＝10%	計算方法：定額法

5-6-3. 試算結果

事業費の試算結果を表5-9に示す。

球状化設備は経済的な資源化設備であり、さらに球形灰の売価もスラグよりも高く見込める可能性が期待できることから、灰溶融設備に比べ経済的な事業運営が可能である。

また、今回の事業規模（設備規模×年間稼働日数＝1,550t/年）では、減価償却費を除く事業費（球形灰の製造コスト）は１トン当たり21,500円の見込みであり、埋立処分費と同等程度である。また、減価償却費を含むと33,200円/tとなるが、球形灰需要量が今回の事業規模よりも多く見込めるのであれば、設備費についてスケールメリットが期待できることから、処理量当たりの減価償却費をさらに安価にできる可能性が期待できる。

表 5-9　汚泥焼却灰の球状化設備、溶融設備の事業コスト　試算結果

	球状化設備				灰溶融設備			
	数量	単価	費用		数量	単価	費用	
			円/t-灰	千円/年			円/t-灰	千円/年
1. 用役費								
電力	150 kWh/t	12 円/kWh	1,800	2,800	190 kWh/t	12 円/kWh	2,280	3,500
鉄粉	30 kg/t	70 円/kg	2,100	3,300	0 kg/t	70 円/kg	0	0
消石灰	0 kg/t	30 円/kg	0	0	100 kg/t	30 円/kg	3,000	4,700
燃料	250 L/t	30 円/L	7,500	11,600	400 L/t	30 円/L	12,000	18,600
2. 人件費	2 人/年	5,000 千円/人	6,500	10,000	2 人/年	5,000 千円/人	6,500	10,000
3. 製品売却費								
球形灰	1,550 t/年	-1,500 円/t	-1,500	-2,300	0 t/年	-1,500 円/t	0	0
スラグ	0 t/年	-500 円/t	0	0	1,550 t/年	-500 円/t	-500	-800
4. 点検補修費			5,100	7,800			7,900	12,300
5. 減価償却費			12,300	19,100			19,700	30,500
事業費計（減価償却除く）			21,500	33,200			31,180	48,300
（減価償却含む）			33,800	52,300			50,880	78,800

（備考）

1. 鉄粉の添加	球状化設備では、球形灰からの重金属溶出抑制対策として原灰に対し鉄粉を3%添加する。
2. 消石灰の添加	灰溶融設備では、塩基度を調整して灰の融点を下げるために消石灰を原灰に対し10%添加する。 なお、球状化設備では理論値で2000℃以上の火炎中へ焼却灰を噴霧するため塩基度調整は必要ない。
3. 人件費について	増員分（2人）のみの人件費を追加する。
4. 製品売却費について	コンクリート二次製品業者での製品粉砕が不要になる分、球形灰の方がスラグよりも高価販売できるものとした。
5. 減価償却費について	自治体負担分のみの建設費を対象とし、定額法にて算出する。

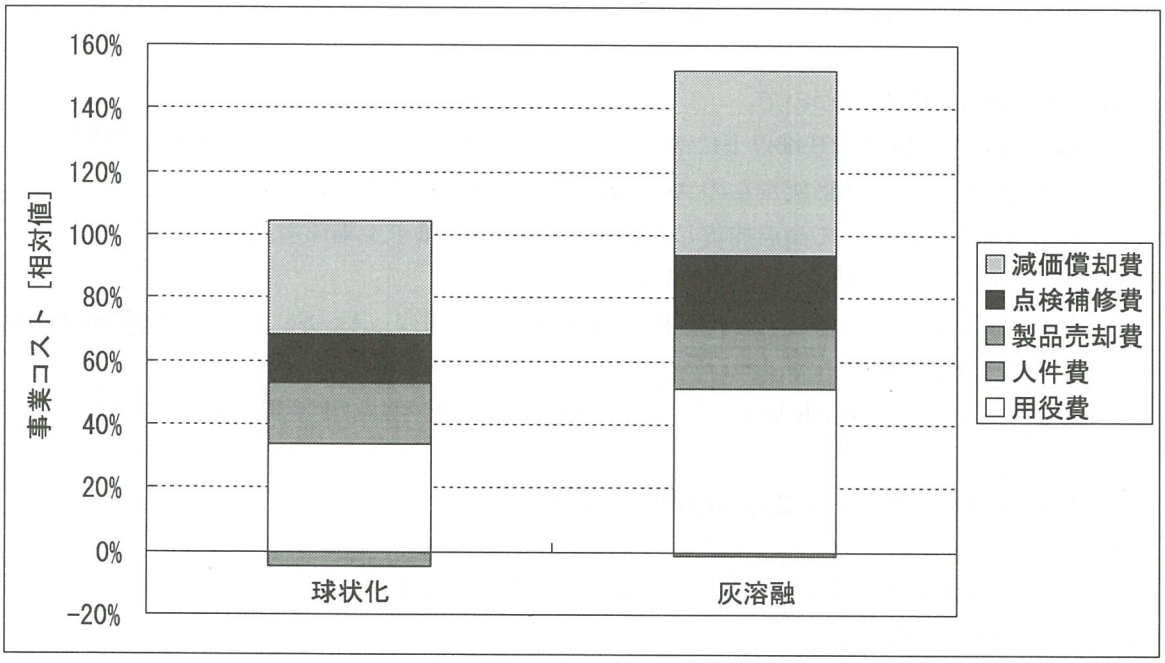


図 5-4　球状化設備、灰溶融設備の事業コスト（相対値）

第６章　まとめと今後の課題

6-1. まとめ

6-1-1. 焼却灰改質方法の研究開発

焼却灰の改質方法として、球状化処理による球形灰製造技術の開発を実施し、下記の知見を得た。

(1) 物理性状について

- 多孔性で吸水率の高い原料焼却灰は、球状化処理により真球形状となり、低吸水性で、比表面積が小さく、平均粒径が大きい粉体に改質された。
- 球状化度合いの指標として定義した球状化率（粒子総数に対する真球粒子数の割合）は、90%以上であった。
- 平均粒径 6μm程度まで粉砕した原灰を球状化した場合、未粉砕のものに比べ僅かに比表面積が広くなったが、目標ブレーン値の 5,000cm²/g には至らなかった。

(2) 化学組成について

- P は全ての球形灰に含有されている。
- 低温捕集時では、原灰と球形灰に大きな化学組成の違いはない。
- 高温捕集時では、原灰に比べ球形灰の Se, Pb 含有量が減少する。さらに原灰に鉄粉を添加した球形灰では、As の含有量も減少する。

(3) 重金属類溶出特性について

- As と Se が土壌環境基準以上に溶出し、かつ添加材を添加していない焼却灰を原灰とした場合、低温捕集球形灰からの As と Se の溶出を抑制できない。
- 上記原灰を球状化して高温捕集した場合、Se の溶出量を土壌環境基準以下とできた。しかし、As については土壌環境基準以下にできない。
- さらに原灰に鉄粉を添加して球形灰を高温捕集した場合、As, Se ともに土壌環境基準以下にまで溶出抑制できた。
- 消石灰を添加した Ca-K 灰については、原灰、球形灰ともに土壌環境基準を満足した。

6-1-2. 耐酸性コンクリート製品への適応性調査

(1) フレッシュコンクリートの性状

基本配合（スラグのみ使用）と比べ、球形灰を用いた耐酸性コンクリートのフレッシュ性状（フロー値）は向上した。

(2) コンクリートの強度、耐久性

球形灰を用いた耐酸性コンクリートの機械的特性及び耐久性は、基本配合と同程度もしくは若干下回るが、一般的なコンクリート製品用の材料として適用可能な範囲にある。

(3) コンクリートの耐酸性

下水道施設などで求められる硫黄（硫酸）に対する耐酸性は、基本配合同様良好である。

(4) 凍結融解抵抗性、発錆特性

球形灰使用の耐酸性コンクリート製品は凍結融解抵抗性及び鉄筋の発錆等の耐久性が低い。従って、材料の選定及び配合設計において留意が必要である。

6-1-3. 実用化に関する検討

(1) 耐酸性コンクリートの長期安定性

A処理センター内の汚泥濃縮槽、及び最初沈殿地に、①球形灰を使用した耐酸性コンクリート、②基本配合の耐酸性コンクリート、③普通コンクリート、の３試料を設置し、酸性曝露条件下での長期退散性能を調べた。

その結果、外観上９ヶ月目から普通コンクリートの腐食がみられたのに対し、球形灰使用品、基本配合品については腐食はみられなかった。また、質量変化率測定による耐酸評価でも外観評価と同様の結果となり、普通コンクリートに比べ球形灰使用の耐酸性コンクリートは長期に渡る耐酸性能を有していることが期待できる。

(2) 耐酸性コンクリートの耐酸性評価手法の提案

セメントが酸と反応して化学的に変質（腐食）するかどうかの観点と、酸がコンクリート内を浸透して鉄筋位置でのコンクリートの中性化を引き起こすかどうかの観点の２点から検討する必要がある。以下に２つの評価手法について提案する。

①コンクリートの耐腐食性に関する評価手法

下水道施設については、特殊な場合を除き、耐酸性は H_2S の酸化により生じる硫酸に対して求められるため、試験液の種類は硫酸とする。なお、耐硫酸酸性であることがわかるように、表記に当たっては耐酸性（硫酸）と記述することが望ましい。また、硫酸の濃度および浸漬期間については、コンクリートが構造部材であって耐腐食性が厳密に求められることから、既存の下水道施設関連の評価方法で最も厳しい 10%硫酸および 60 日とする。

評価項目は、コンクリートが変質しない限り当初の強度が確保されると考えられることから、変質の評価項目である質量変化とし、基準値は既存のマニュアルに則って±5%以内とする。またこれに伴い供試体はφ10×20cm 円柱とし、3 個試験することを基本とする。

②酸の浸透拡散抵抗性に関する評価手法

試験方法は、基本的に耐腐食性試験方法と同じとするが、既存のマニュアルを参考として、硫酸濃度は 5%、試験期間は 30 日、供試体はφ10×20cm 円柱 3 個とする。

評価項目は中性化深さとし、基準値は既存のマニュアルに則って 3mm 以下とする。

(3) 耐酸性コンクリートの適用範囲

球形灰使用の耐酸性コンクリートは、基本配合品に比べて若干性能は落ちるが、求められる強度、耐酸性は有している。従って、土木ブロックなどの各種無筋コンクリート製品への適用が可能と考えられる。さらに、発錆防止対策を確立できれば、ヒューム管等の鉄筋コンクリートへの利用が可能になり、適用範囲が拡がる。

表 6-1　耐酸性コンクリートの適用範囲

設計区分 / 強度 / 製造方法	無筋コンクリート				鉄筋コンクリート				プレストレストコンクリート			
	18	24	30	40↑	18	24	30	40↑	18	24	30	40↑
即時脱型	平板 境界ブロック 土木ブロック			ILB	———				———			
流し込み 形状「小」	平板 境界ブロック L型擁壁 土木ブロック 消波ブロック		———		———	RC-1 L型擁壁 側溝 土木ブロック	RC-2 擬木 擁壁 B型柵渠 RC-3 ボックスカルバート	セグメント	———			PC-1 枕木 ボックスカルバート 橋桁
形状「大」					———							
その他特殊な製造方法	遠心成形	———			———		RC-4 ヒューム　推進 パイル		———			RC-2 ポール パイル

：現状での球形灰の適用可能領域

：改良により球形灰の適用が可能になる領域

(4) 耐酸性コンクリートの販売価格

球形灰を用いることで耐酸性コンクリートとしての製造コストは低減できるため、販売価格（製造コスト＋販売コスト）は安価になる見込みである。また、鉄筋の発錆を予防するためにエポキシ塗装鉄筋を使用した場合、その効果が吸収され逆にコスト高となる。

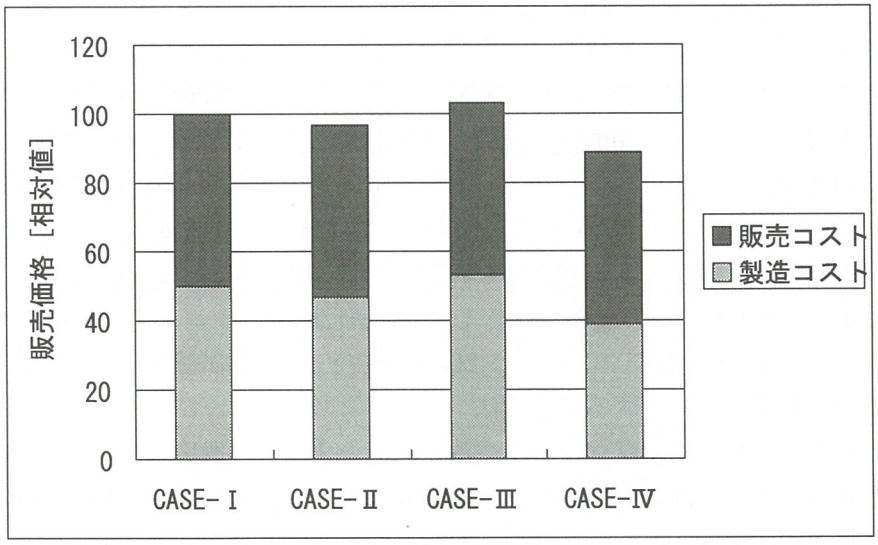


図 6-1　耐酸性コンクリートの販売価格（相対値）

○CASE-Ⅰ：基本配合＋普通鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品
○CASE-Ⅱ：K-100＋普通鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品
○CASE-Ⅲ：K-100＋エポキシ塗装鉄筋からなる耐酸性コンクリート製品
○CASE-Ⅳ：K-100 からなる無筋耐酸性コンクリート製品

(5) 事業費の試算

球状化設備を建設するケースと、灰溶融設備を建設するケース、の２ケースについて事業費を試算した。その結果、球状化設備の方が灰溶融設備よりも経済的な設備であるため減価償却費が安価であること、さらに粉砕工程が省略できる分球形灰の方がスラグよりも高い売価が見込めることから、事業費は球状化設備の方が経済的である。

また、減価償却を除いた球形灰の製造コストは灰１トンあたり 21,500 円の見込みであり、埋め立て処分費と同等程度とできる可能性が期待できる。

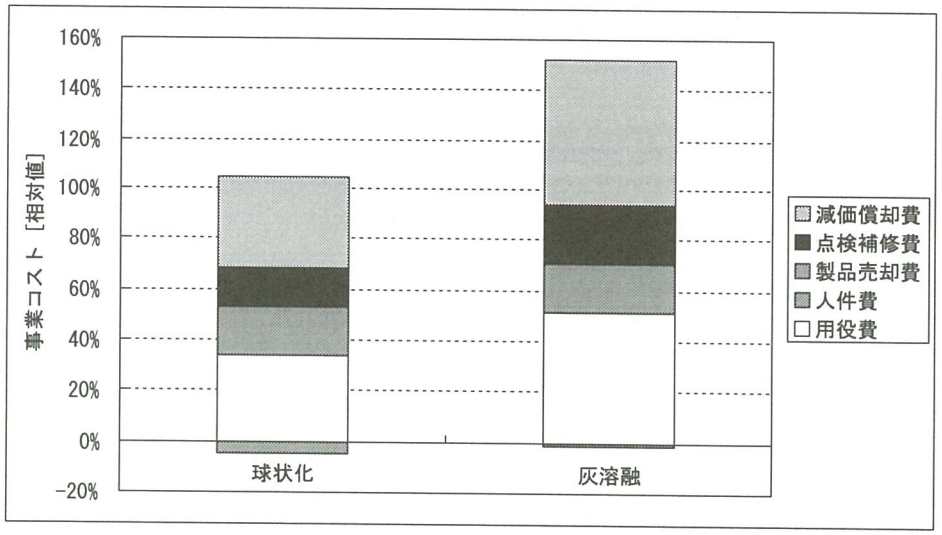


図 6-2　球状化設備、灰溶融設備の事業コスト（相対値）

6-2. 今後の課題

本研究により、球形灰を使用した耐酸性コンクリートは、製品として求められるフレッシュ性状、圧縮強度、硫酸への耐性、を有していることを実証した。

今後は、まずは鉄筋コンクリート製品へ適用範囲を拡大していくために、鉄筋の発錆、凍結融解性の改善対策について検討することが必要である。さらに耐酸性コンクリート製品の安全性確保（重金属類が溶出しないこと）に向け、本研究で安全性を実証した「鉄粉添加＋高温捕集」による球形灰のコンクリート性能、及び安全性を確認することが必要である。

第７章　添付資料

7-1. フローシート（球状化設備、灰溶融設備）

別紙参照。

7-2. 耐酸性コンクリートに関する既存出典

(1) 岡元ら；「下水スラグを用いたヒューム管等の耐酸性コンクリート製品について」、再生と利用、vol.23、No.86 (2000)

次頁以降を参照。

研究紹介

下水スラグを用いたヒューム管等の耐酸性コンクリート製品について

太平洋セメント㈱ 環境事業本部技術グループリーダー
岡 元 豊 重

テイヒュー㈱ 技術研究所所長
杉 山 章

1．まえがき

下水道の普及率は、平成10年度で58%に達し、それに伴い発生する下水汚泥の量も年々増加しており、その処理・処分は大きな課題となってきている。

下水汚泥は、これまで脱水処理さらには焼却処理後、大部分は埋立処分されてきた。しかし、最終処分場の残余年数は年々少なくなり、新たな処分先の確保は非常に困難な状況になってきている。そのため、一部の処理場では減容化、さらには有効利用をも視野にいれた溶融処理（下水スラグ化）も行われてきている。

また、下水汚泥や焼却灰は、セメント用粘土原料の一部として、すでに多くのセメント工場で利用・処理されている。セメント工場においても、都市ごみ焼却灰等の廃棄物を利用したエコセメントの開発をはじめ、下水汚泥や焼却灰の普通セメント原料への利用、さらには、下水スラグのコンクリート骨材等への用途開発を含め、これまで環境事業関連で種々の検討を積極的に進めてきている。

一方、下水処理関連施設においては、下水処理の拡大に伴い、処理施設や管きょ等の施設のストック量も膨大になり、下水処理場や下水管等の劣化・腐食等により、補修・更新を必要とする下水道施設も増加してきている。

すなわち、下水道施設では、下水中に含まれる硫酸塩と硫酸塩還元細菌との作用による硫化物の生成、さらには硫黄酸化細菌の作用による硫酸の生成により、コンクリート構造物やヒューム管等が腐食劣化する例が多く報告され、その高耐久化のための耐酸性材料の開発が望まれている。

そのため、下水スラグを利用した耐酸性セメントが開発できれば、上記のような課題の解決につながる可能性は大と考えられる。

このような状況の中で、下水スラグには高炉スラグと同様にアルカリ刺激により硬化する、いわゆる“潜在水硬性”を有する可能性があり、また“リン酸塩ガラス”の一種として耐酸性結合材としての水ガラス（ケイ酸ソーダ溶液）用の硬化材としての性質も有する可能性も考えられた。

そこで、下水スラグ粉末と水ガラスとの反応性について検討した結果、特に蒸気養生条件下では、

表－1　下水スラグの化学組成（例）

種　別	CaO/SiO_2 モル比	化学成分（%）							
		CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	R_2O	P_2O_5	Cl
下水スラグ									
高分子系	0.18	7.3	42.8	21.8	8.6	2.2	2.4	11.0	0.0
石灰系	1.1	33.1	32.1	14.4	4.5	2.4	1.3	8.0	0.0
高炉スラグ	1.3～1.5	42	32	1	6				
ポルトランドセメント	1.6～3.0	65	22	5	3	1	1	0	

良好な硬化性を示し、かつ耐酸性の硬化体が得られることを見出し、下水スラグを用いた耐酸性セメントの開発を進めてきているので報告する。

2．下水スラグの化学的特性

下水スラグの化学組成例を高炉スラグやポルトランドセメント等と対比して表－1に示す。

表－1から明らかなように、下水スラグには汚泥の脱水助剤の違いにより、高分子系の下水スラグと石灰系の下水スラグがある。両者ともに、SiO_2、Al_2O_3、CaO、P_2O_5、およびFe_2O_3を主要化学成分とし、その他、MgO、アルカリ等を少量含んでいる。

これらのうち、耐酸性セメント用主材料としては、石灰分が少ない高分子系のものが適しており、以下の耐酸性セメント用には、主に高分子系の下水スラグを使用している。

下水スラグ、特に、溶融後急冷して製造されたものは、従来より“潜在水硬性”を示す高炉スラグと同様、ガラス質の材料である。

このような下水スラグは、高炉スラグやポルトランドセメントと比較した場合、特に高分子系の下水スラグではCaO分が少なくSiO_2が多い、いわゆる低塩基度の材料であり、一般的には反応性が高いとは思えないような材料である。

しかし、このような低塩基度の下水スラグでも、強度発現性は低いもののNaOH等のアルカリ刺激により水和硬化する、いわゆる“潜在水硬性”を示すことは確認している。

このような低塩基度（CaO/SiO_2 モル比≦0.5）の下水スラグの反応性が高い理由は、そのガラス構造が相当不安定な状態、いわゆる“活性化された状態”になっているためと考えられる。

すなわち、下水スラグのガラス構造は、通常のビンガラスや窓ガラス等に比べ、ガラスの網目構造形成酸化物として主要な役割を果たすSiO_2が少ない上に、P_2O_5やFe_2O_3等のガラスを不安定化するような成分も多く含まれており、ガラス中のSiO_2の鎖は各所で歪められ、切断され、かなり不安定な状態、いわゆる“活性化された状態”にあるものと考えられる。その結果、水ガラスのようなアルカリ性材料により侵食され易い状態になっているものと考えられる。

また一方では、下水スラグはP_2O_5を含むリン酸塩ガラスの一種とも考えられる。

すなわち、ある種のリン酸塩ガラスは、耐酸性結合材として知られる水ガラス（ケイ酸ソーダ溶液）用の硬化材としての性能を有することが知られている。

このため、下水スラグとアルカリ性でかつ結合材でもある水ガラスとを組み合わせた場合、侵食と同時に水和反応も進行し、また水ガラスとも反応して耐酸性の硬化体が得られるものと考えられる。

3．硬化特性（水ガラスとの反応メカニズム）

本耐酸性セメントは、主に下水スラグ微粉砕品と水ガラスを主要構成材料としている。

下水スラグと水ガラスとの間では、例えば、模式的には次のような反応が進行し水和硬化するものと考えられる。

$CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 - P_2O_5$（下水スラグ）$+ Na_2O - SiO_2 - H_2O$（水ガラス）

→ $n\,SiO_2$（ゲル）＋ $CaO \cdot SiO_2 \cdot x\,H_2O$（C－S－H）＋ $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot y\,SiO_2 \cdot z\,H_2O$（ゼオライト）＋その他

すなわち、下水スラグ粉末と水ガラスとが反応し、耐酸性のケイ酸ゲルやポルトランドセメントの水和生成物に類似したカルシウムシリケート水和物（C－S－H)、さらには、アルカリ－アルミナ－シリカ系水和物のゼオライト等も生成して硬化するものと考えられ、X線回折等により、このような反応生成物が生成することは確認している。

このような下水スラグ－水ガラス系の硬化体は、従来のポルトランドセメントや高炉スラグ系硬化体と異なり、多いと酸に弱くなるCaO含有量がもともと少ない上に、さらに反応により水ガラスから耐酸性のシリカゲルが生成して良好な耐酸性が発揮されるものと考えられる。

なお、耐酸性、特に硫酸に対しては、硬化体中に適量のCaOが含まれていた方が良好な耐酸性を示す場合もある。これは硬化体中のCaO分と浸透してきた硫酸分との反応により$CaSO_4$が生成し、バリヤーが形成され酸の浸透が抑えられるものと推察される。

4．耐酸性セメントの特性

今回開発した耐酸性セメントは、図－1に示すように、下水スラグ粉末、さらには必要に応じて高炉スラグ粉末やアルミナセメント等も併用し、これらの粉末とアルカリ性材料の水ガラスを組み合わせたものを主要構成材料としている。

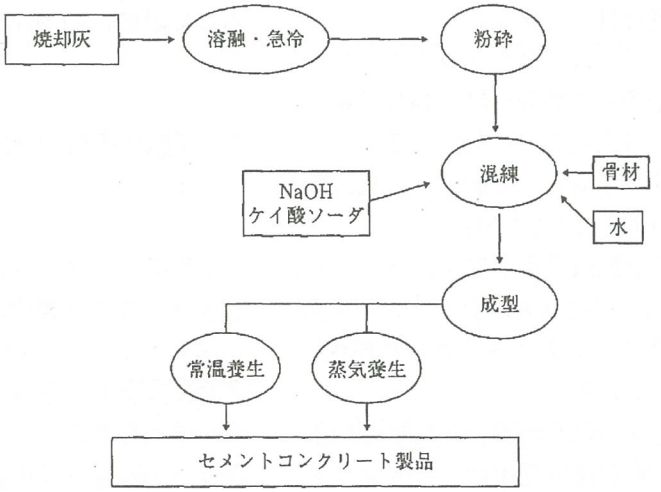
耐酸性セメントとしては、これまで蒸気養生タイプのものと常温養生タイプのものを開発してきているが、ここでは、主にコンクリート製品向けの蒸気養生タイプの耐酸性セメントについて記す。

耐酸性セメントの配合は、下水スラグ粉末：水ガラス（固形分）＝80～70：20～30で、75：25を標準としている。実際には、本耐酸性セメントに通常のケイ砂や骨材を配合して、モルタルやコンクリートとして使用する。

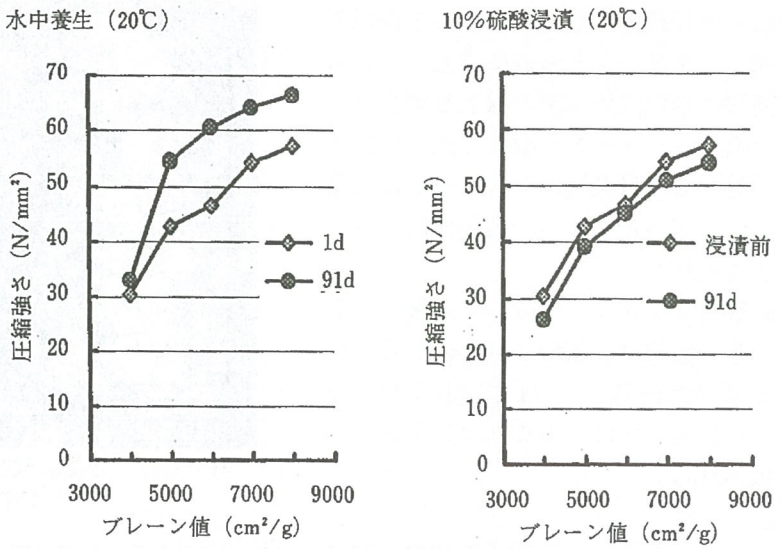
例えば、耐酸性モルタルの配合は、セメント（下水スラグ粉末＋水ガラス固形分）：ＪＩＳ標準砂＝１：３、水／セメント＝0.36を標準として調整し、水量に関しては、水ガラス中の水分も含めた形で調整する。

耐酸性セメントの強度発現性は、下水スラグの粉末度、水ガラスの組成や配合割合、養生条件、および混練水量等により影響される。一般的には、下水スラグは、粉末度5000cm^2/g 程度に微粉砕したものを、また、水ガラスとしては、主に１号品を用いる。なお、蒸気養生条件は、80℃－８時間養生を標準としている。

図－２に下水スラグの粉末度（ブレーン値）を変えて試製した耐酸性セメントを用いた標準的な



図－１　耐酸性セメントコンクリートの製造



図－2　粉末度の影響

モルタル配合品（5 cm φ×10cm の供試体）についての圧縮強さ試験結果を示す。図－2より、下水スラグの粉末度（ブレーン値）が高いほど、強度発現性、また、耐酸性も良好となることが分かる。

耐酸性コンクリートは、この耐酸性セメントに通常のセメントコンクリートと同様、砂や骨材を配合した混練・成形物を適切な養生条件下で養生することにより得られる。

以下、蒸気養生タイプの耐酸性セメントを用いた耐酸性コンクリートの強度発現性や耐酸性等の特性に関しての検討結果について示す。

5．耐酸性コンクリートの特性

5.1　強度特性

耐酸性コンクリートの圧縮強度、曲げ強度、引張り強度および静弾性係数について、その一例を普通コンクリートと比較して表－2に示す。ここでは耐酸性コンクリートの強度、柔らかさ（スランプ）を変化させた3種類の配合について、また、普通コンクリートは下水道用コンクリート製品に用いられる一般的な配合について試験した。

これによると圧縮強度はいずれも蒸気養生を行っているため初期の強度発現性が大きく、耐酸性コンクリートはさらにその傾向が強い。配合的には下水スラグと水ガラスの比率およびこれらに対する水量で強度が支配されている。また、曲げおよび引張り強度については、表中（　）で示すごとく圧縮強度に対する強度比が普通コンクリートより小さい傾向にある。静弾性係数については強度が高いほど大きな値を示すが、その値は普通コンクリートのおよそ1/2である。

5.2　耐酸性

5および10%の硫酸溶液に、蒸気養生後14日間気中養生したφ10×20cm の供試体を浸漬した時の重量変化率を図－3に示す。

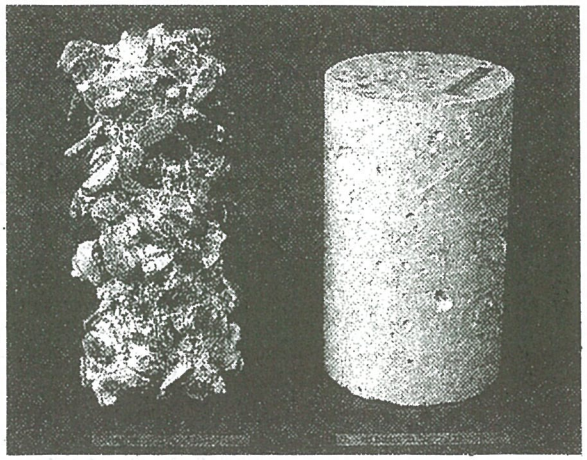
これによると耐酸性コンクリート（A配合）の

表－2　各種強度および静弾性係数の一例

種　類		スランプ (cm)	圧縮強度（N/mm²）				曲げ強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	静弾性係数 (Gpa)	ポアソン比
			1日	14日	28日	91日	14日	14日	14日	14日
耐酸性コンクリート	A	6	51.8	55.1	56.2	56.4	6.4(1/8.6)	3.1(1/17.8)	17.3	0.21
	B	14	41.2	42.5	43.8	44.2	－	－	14.8	0.23
	C	21	28.2	30.6	31.1	31.9	－	－	10.6	0.26
普通コンクリート		10	31.6	47.5	50.6	53.1	7.5(1/6.3)	3.5(1/13.6)	33.0	0.20

重量減少率は6カ月経過時点においても1%以下であり、普通コンクリートとの差は拡大している。また、浸漬期間中の供試体外観の様子を写真－1に見れば、普通コンクリートが激しく酸に侵食されているのに対して、耐酸性コンクリートは表面がわずかに劣化しているものの、供試体内部への酸の浸透は認められない。

これより耐酸性コンクリートは、下水施設や温泉排水における日常的ＰＨ領域（例えばＰＨ３は硫酸濃度でおよそ0.005%、ＰＨ２はおよそ0.05%に相当する）においては、かなりの延命化が図れるものと思われる。



写真－1　耐酸試験状況
（10%硫酸溶液、３カ月浸漬）

5.3　耐熱性

耐酸性コンクリートは温泉地や火山地帯などで用いられることが考えられるため、100℃程度の高温環境下における強度の変化を調べた。試験は100℃の恒温乾燥状態と最高100℃までの変温湿潤状態について行った。前者は加熱型乾燥機を用いて供試体を連続的に加熱し、後者は蒸気を使って１日１サイクルの割合で加湿昇温させた。上記環境下における試験開始から28日までの圧縮強度の変化を図－4に示す。

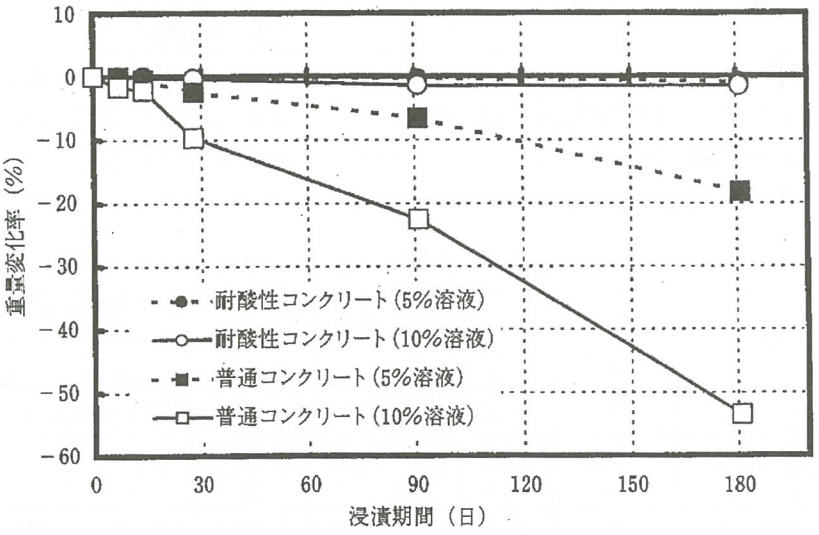
これによると耐酸性コンクリート（A配合）は比較的初期の段階で乾燥の影響を受け、28日までに15%の強度低下を示した。これは結晶中のゲル水の逸脱に起因するものと思われ、乾燥を伴わない加湿条件下においては強度低下は見られず、逆に未水和部分の養生効果により25%の強度増進を示した。

したがって耐酸性コンクリートが高温環境下において強制乾燥を受ける場合は、若干の強度低下を見越した使い方が必要となろう。

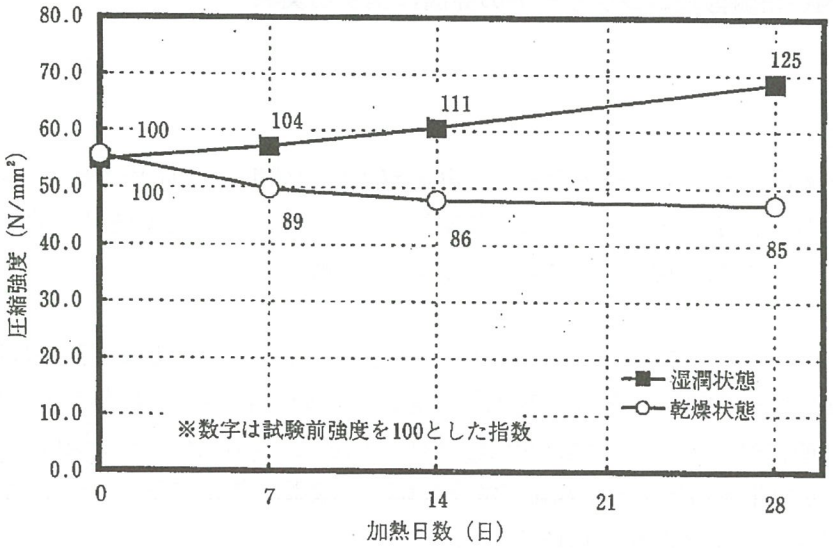
5.4　その他の特性

耐酸性コンクリートのその他の特性について、前記A配合のものと普通コンクリートを比較して以下に示す。

長さ変化については、普通コンクリートの乾燥収縮が6カ月ぐらいかけて収束するのに対し、耐酸性コンクリートは１～２カ月で収縮がほぼ完了し、以後はほとんど長さ変化が生じない。ＪＩＳA1129による試験では両者とも750×10^{-6}程度の



図－3　耐酸試験結果（20℃）



図－4　耐熱試験結果（100℃）

値を示して収束状態となった。

凍結融解抵抗性については、ＮＯＮ-ＡＥコンクリートではいずれも耐久性が劣るものの、ＡＥコンクリートにすることにより普通コンクリートと同程度に耐久性を改善することが可能となった。

中性化については、３カ月で普通コンクリートの中性化深さが８mmに達したのに対して、耐酸性コンクリートは１mm以下であった。これはコンクリート自体のアルカリ性が高いためと思われる。

そのほか耐摩耗性、透水性および線膨張係数についても試験を試みたが、普通コンクリートと比べて同レベルの結果が得られている。なお、重金属溶出試験、クリープ試験については現在試験中である。

６．耐酸性コンクリート製品の製造

本耐酸性コンクリートは下水スラグを再利用したコンクリートであり、優れた強度発現性と耐酸性を活かせば下水道分野の腐食環境には最適な防食材料となる。

メーカの立場から見ても、既存のコンクリートと性状が近いためこれまでのヒューム管などの製造ラインがそのまま活用でき、固定費が軽減できるメリットがある。しかもヒューム管においては遠心成形であるため２層構造とすることが可能で付着力も期待でき、従来の普通管の内層または外層の被覆材として使うこともできる。この点に関してはこれまでの樹脂系の材料と異なり、線膨張係数や乾燥収縮率が一般のコンクリートと近似していることから、温度変化や乾燥収縮に対しても無理なく一体化が可能である。また、樹脂系の材料より耐熱、耐候性に優れ、しかも摩耗や衝撃に強いため推進管においては施工中の損傷を受け難いと言える。

このほかの製品としては同様に遠心成形で造るマンホールがあり、振動流し込み成形においてはＵ字溝やボックスカルバートなど数多くの製品に応用できる。いずれの製品も一般のコンクリートの型枠が転用できるため、新たな設備投資がかからない。また、型枠が同一であるため形状、寸法が同じで、これまでの製品との互換性がある。

最後に、この耐酸性コンクリートを使った製品はまだ実績も少なく、現在は受注生産をしながら用途開発を行っている段階である。今後ともデータを蓄積し、改良を重ねていきたいと考えている。

7-3. 球形灰を用いた耐酸性コンクリートの発錆に関する実験

１．はじめに

先に行われた耐酸性コンクリートの発錆（JCI-SC2）の結果、球形灰を用いた耐酸性コンクリートの発錆率が、普通コンクリート及び基本配合のそれと比べ大きいものであった。普通コンクリートにおいて鉄筋が錆びるメカニズムを以下に記述する。

「コンクリート中の鉄筋は、セメントのアルカリ性によって、表面に不動態皮膜（20～60Åの薄い酸化被膜）を形成し基本的に発錆しない。しかし、塩素イオンが鋼材表面の不動態被膜を破壊し、鋼材を活性体に変化させ、活性体にある鋼材の表面では、鉄がイオン化するアノード反応（酸化反応）と酸素が還元するカソード反応（還元反応）が生じて腐食電池を形成する。」

$$Fe \rightarrow Fe2^{+} + 2e^{-}\ （アノード反応）$$
$$1/2O^{2} + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}\ （カソード反応）$$

このアノード反応、カソード反応は同時並行的に起こって、水酸化第二鉄［$Fe(OH)_2$］となる。これが錆。

耐酸性コンクリートにおいても同様の反応が起きているものと仮定した場合、球形灰を用いることで何らかの理由によって鉄筋の還元電位を低下させたことになる。その原因として、球形灰を用いた耐酸性コンクリートの圧縮強度が基本配合のそれと比べ若干低いことから、未反応の水ガラスが残存しているものと推察され、これを介しアノード反応及びカソード反応が助長されたことがあげられる。また、混和された塩化物が耐酸性コンクリートの反応生成物（普通コンクリートでいうところのＣ－Ｓ－Ｈ（珪酸カルシウム水和物）やブリーデル氏塩にような反応生成物）に固定化されなかったことがあげられる。

２．目的

そこで、本実験では以下の実験を行い、球形灰を用いた耐酸性コンクリートで著しい発錆が生じる原因を究明することで、今後の対策に役立てることを目的とした。

①球形灰及び下水溶融スラグの水溶液中における酸化還元電位の測定

②水ガラス中に鉄筋を浸漬して発錆状況を確認

３．実験概要

１）ＯＲＰ測定試験

（１）試験体

①球形灰微粉末　ブレーン値 2500（cm^2/g）

②球形灰微粉末　ブレーン値 5900（cm^2/g）

③下水汚泥溶融スラグ微粉末　ブレーン値 2590（cm^2/g）

④下水汚泥溶融スラグ微粉末　ブレーン値 5600（cm^2/g）

（２）測定方法

土のｐＨ試験（ＪＳＦ　Ｔ　２１１）に準拠。

①各サンプルは３０ｇ計量し、蒸留水を１００ｍｌ加えよく撹拌した。

②１時間静置した後、ＯＲＰ計にて酸化還元電位を測定した。

２）鉄筋浸漬試験

（１）試験体

φ16㎜ 丸鋼（みがき棒）

（２）測定方法

試験体を耐酸性コンクリートに用いる水ガラス中に浸漬し、所定の養生期間を経て表面に錆が発錆するか否か目視によって確認する。養生方法は 20℃及び 80℃の恒温室に 7 日間放置。

４．測定結果

１）ＯＲＰ測定試験

測定結果を下表に示す。

表 7-3-1　酸化還元電位測定結果

サンプル名	酸化還元電位 測定値 （ｍＶ）	ｐＨ	水温 （℃）
（１）球形灰微粉末 ブレーン値 2500（cm^2/g）	１１０	8.53	１６．０
（２）球形灰微粉末 ブレーン値 5900（cm^2/g）	１１５	8.44	１６．０
（３）下水汚泥溶融スラグ微粉末 ブレーン値 2590（cm^2/g）	４５	10.87	１６．０
（４）下水汚泥溶融スラグ微粉末 ブレーン値 5600（cm^2/g）	８３	8.82	１６．１
（５）蒸留水のみ （比較用）	１０７	8.47	１５．９

2）鉄筋浸漬試験

鉄筋の発錆状況を以下に示す。浸漬７日後の鉄筋に錆は認められなかった。



図 7-3-2　水ガラスに浸漬した鉄筋の発錆状況（７日－20℃）

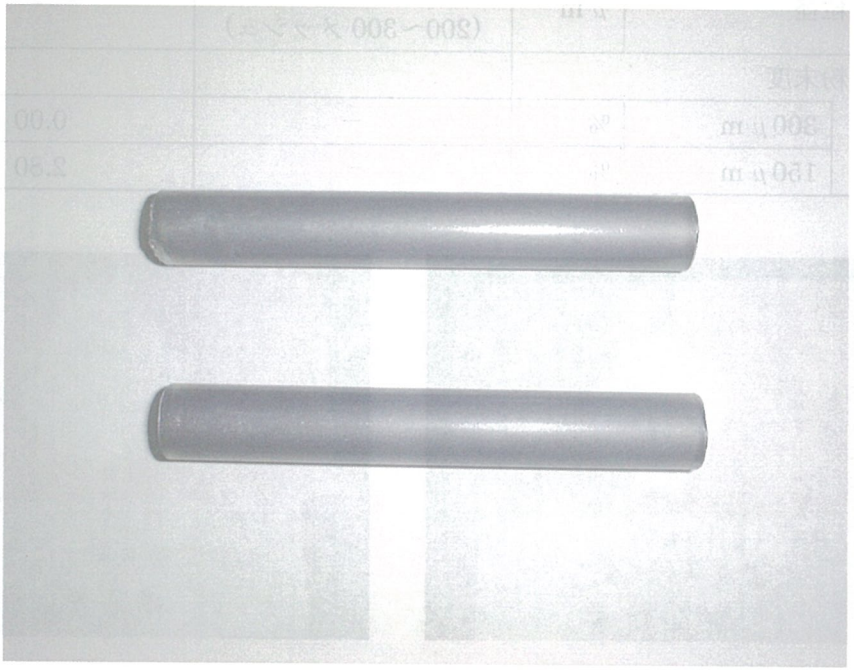


図 7-3-3　水ガラスに浸漬した鉄筋の発錆状況（７日－80℃）

４．おわりに

酸化還元電位について球形灰が下水溶融スラグを上回り、若干では酸化状態にあることが判明した。また、水ガラス中に浸漬した鉄筋も温度に関係なく錆びることがなかった。これらの結果から塩素イオンを固定できないことが発錆の理由と想定すると、反応生成物の違いが有力視され、今後はこの点に注視して実験・検討する必要があると思われる。

7-4. Si-K 灰, Ca-K 灰の作成方法

K 灰に SiO_2 粉末、及び消石灰を添加・混合することにより Si-K, 及び Ca-K 灰を作成した。用いた SiO_2 粉末、及び消石灰の性状を表 7-4-1 に示す。また、各調整灰の作成法は(1), (2)に示す通りである。

表 7-4-1　焼却灰添加材

項目		SiO_2 粉末（珪砂）	$Ca(OH)_2$（消石灰）
化学組成			
SiO_2	%	99.85	—
CaO	%	—	73.16
Al_2O_3	%	0.0328	—
Fe_2O_3	%	0.0251	—
強熱減量	%	—	24.54
その他	%	0.092	2.30
融点	℃	1600	—
真比重	—	2.60	—
粒径	μm	53～75 (200～300 メッシュ)	—
粉末度			
300μm	%	—	0.00
150μm	%	—	2.80

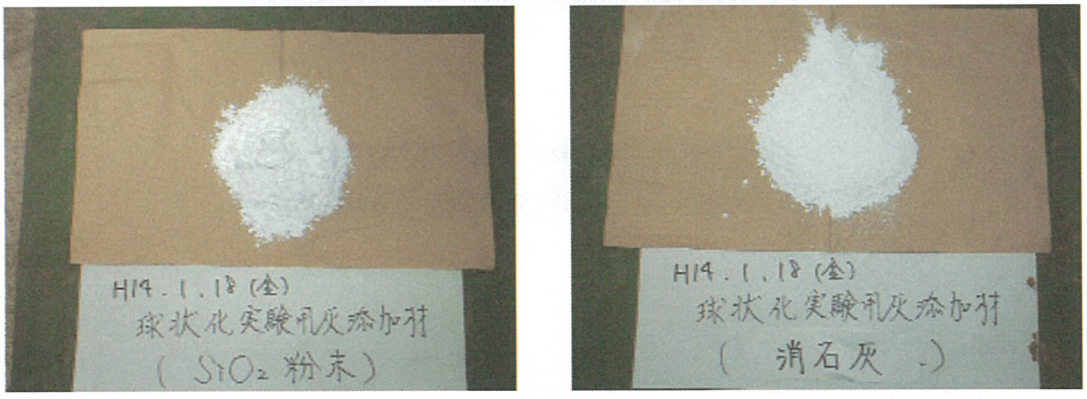


図 7-1　灰添加材（左図；SiO_2 粉末，右図；消石灰）

(1) Si-K灰の作成

以下の手法にて塩基度 0.1 となる様に SiO_2 粉末を添加・混合した。

① 焼却灰 40kg に対し SiO_2 粉末 5.76kg を秤量し、セメントミキサーへ投入する。(図 7-4-2)

② セメントミキサーにより完全混合が目視にて確認できるまで混合・混練する。なお、実際の作業では５分の混合で目視にて完全混合が確認できたが、さらに余裕を見て１０分の混合・混練を行った。(Si 調整の完了，図 7-4-3)

③ 上記①～②の工程を繰り返し、所定量を得る。(終了)

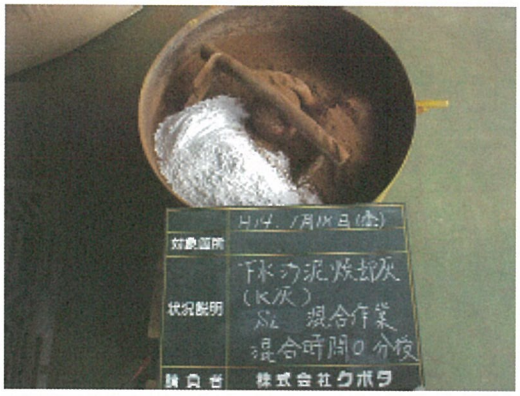


図 7-4-2　SiO_2 混合作業（混合前）



図 7-4-3　SiO_2 混合作業（混合完了）

(2) Ca-K灰の作成

以下の手法にてN灰と同じ塩基度 0.345 となる様に消石灰を添加・混合した。

① 焼却灰 40kg に対し消石灰 4.45kg を秤量しセメントミキサーへ投入する。(図 7-4-4)

② セメントミキサーにより完全混合が目視にて確認できるまで混合・混練する。なお、実際の作業では５分の混合で目視にて完全混合が確認できたが、さらに余裕を見て１０分の混合・混練を行った。(Ca 調整の完了，図 7-4-5)

③ 上記①～②の工程を繰り返し、所定量を得る。(終了)



図 7-4-4　消石灰混合作業（混合前）

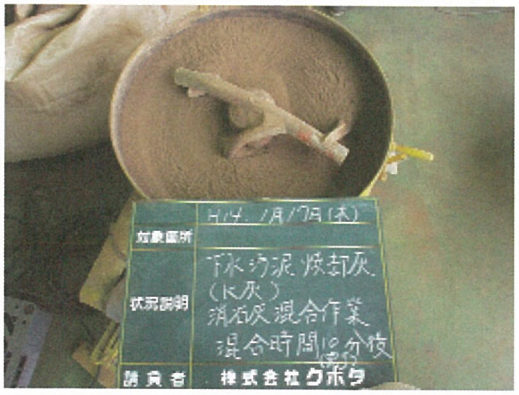


図 7-4-5　消石灰混合作業（混合完了）

7-5. K 焼却灰の粉砕処理について

ボールミルにより K 焼却灰の粉砕を行った。粉砕処理試験の結果は次頁以降に示す通りである。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊
＊　テスト報告書　＊
＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

株式会社　クボタ　様

テスト内容	焼却灰の委託粉砕
テスト日	２００２年 8月　１９、２０、２３日
テスト場所	弊社テスト場
客先立会者名	
テスト担当者名	技術２課　酒井健夫
報告書作成日	２００２年 8月　２８日
報告書作成者	技術２課　酒井健夫

承認	確認	担当
02.8.28 修	02.8.28 原秀	02.8.28 酒井

株式会社　マキノ

１．目的

平均粒子径２８μｍの原料を平均粒子径８～１０μｍにするときの条件を探り
原料３００ｋｇを平均粒子径８～１０μｍにする。

２．テスト方法

使用機械

予備テスト

ポットミル	・型式	２４０
	・ミル材質	アルミナ磁器
	・内側寸法	φ２１０×２１０ｍｍ
	・内容積	７．２ℓ
	・回転数	７５ｒ．ｐ．ｍ．（Ｎｃの７５％）
	・粉砕媒体	アルミナ磁器ボール
		φ３０ｍｍ　５．７ｋｇ
	・原料投入量	５００ｇ

本粉砕

ボールミル	・内容積	４０００ℓ
	・回転数	２２ｒ．ｐ．ｍ．
	・粉砕媒体	アルミナ磁器ボール
		φ２０ｍｍ　３２００ｋｇ
	・原料投入量	３００ｋｇ

３．テスト結果

予備テスト：粉砕時間２５分で平均粒子径１０．４μｍになった。
本粉砕　　：粉砕時間１５分で平均粒子径５．９μｍになった。
原料は、平均粒子径２８．８μｍ、含水率１．９ｗｔ％であった。

予備テスト

粉砕時間　[min]	１０	１５	２５
平均粒子径[μｍ]	１７．４	１２．１	１０．４

本粉砕

粉砕時間　[min]	５	１０	１５
平均粒子径[μｍ]	１４．５	８．４	５．９

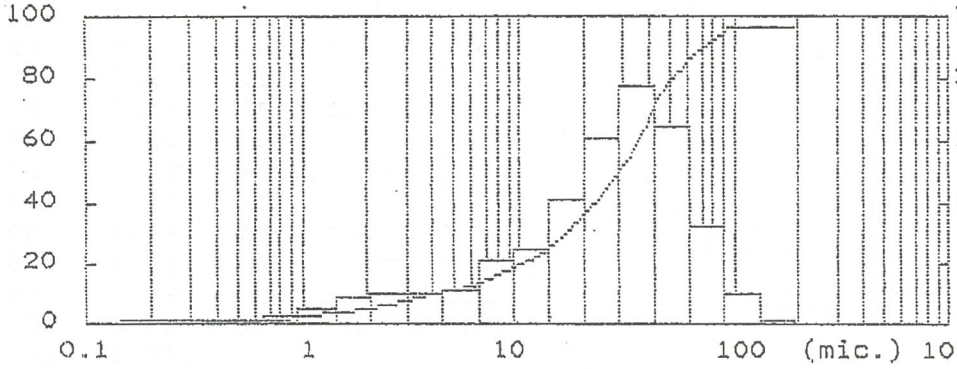
株式会社　マキノ

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:172

ｻﾝﾌﾟﾙ	: ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ ｹﾞﾝﾘｮｳ
ﾌﾞﾝｻﾝﾊﾞｲ	: H2O
ﾌﾞﾝｻﾝｼﾞｮｳｹﾝ	: U.S.W.60sec
ｿｸﾃｲﾋﾞ	: 2002/08/19
ｿｸﾃｲｼｬ	: T.SAKAI
ﾌﾙｲ	: シ タ
ｼｰﾌﾞｶｯﾄ (%)	: 3.2
ﾆﾝｲﾘｭｳｹｲ	: NO
ﾋﾞｺｳ	: ｸﾎﾞﾀ ｻﾏ

- Average -
28.8 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	0.5
3	0.4	1.1
4	0.6	1.5
5	0.8	1.8
6	1.0	2.2
7	1.5	3.5
8	2.0	5.4
9	3.0	8.0
10	4.0	10.1
11	6.0	12.6
12	8.0	16.6
13	12.0	22.4
14	16.0	28.5
15	24.0	42.4
16	32.0	55.2
17	48.0	77.9
18	64.0	87.3
19	96.0	95.6
20	128.0	96.6
21	192.0	96.8

REC.NO. : 172 ◇ ｻﾝﾌﾟﾙ : ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ ｹﾞﾝﾘｮｳ

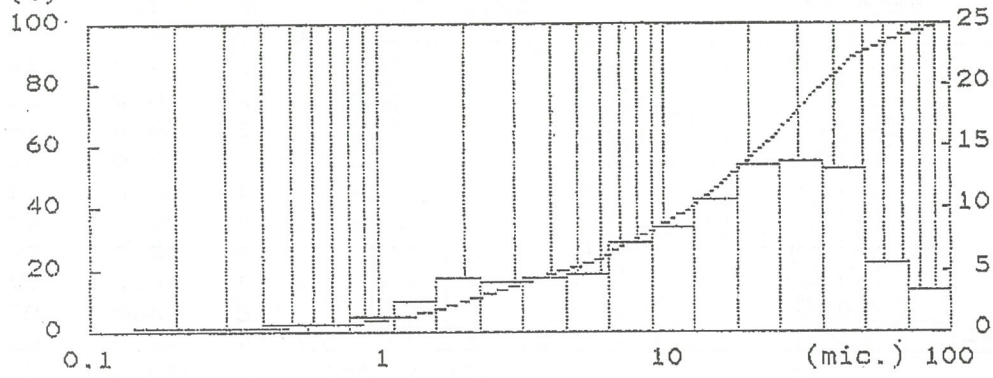
	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	11.7	55.5
0.2	0.5	0.4	27.3	80.1
0.4	1.1	0.6	38.9	89.4
0.6	1.5	0.4	43.6	91.6
0.8	1.8	0.4	46.9	92.7
1.0	2.2	0.4	49.5	93.4
1.5	3.5	1.3	55.6	94.6
2.0	5.4	1.9	62.3	95.5
3.0	8.0	2.6	68.6	96.1
4.0	10.1	2.0	72.1	96.3
6.0	12.6	2.5	75.1	96.5
8.0	16.6	4.1	78.6	96.6
12.0	22.4	5.7	82.1	96.7
16.0	28.5	6.1	84.7	96.7
24.0	42.4	13.9	88.9	96.8
32.0	55.2	12.8	91.7	96.8
48.0	77.9	22.7	95.1	96.8
64.0	87.3	9.4	96.1	96.8
96.0	95.6	8.3	96.7	96.8
128.0	96.6	1.0	96.8	96.8
192.0	96.8	0.2	96.8	96.8
AVERAGE	28.8 mic.		1.0 mic.	0.1 mic.

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:174

ｻﾝﾌﾟﾙ	: ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ 10minﾖﾋﾞ
ﾌﾞﾝｻﾝﾊﾞｲ	: H2O
ﾌﾞﾝｻﾝｼﾞｮｳｹﾝ	: U.S.W.60sec
ｿｸﾃｲﾋﾞ	: 2002/08/19
ｿｸﾃｲｼｬ	: T.SAKAI
ﾌﾙｲ	: ｼ ﾀ
ｼｰﾌﾞﾞｶｯﾄ (%)	: 0
ﾆﾝｲﾘｭｳｹｲ	: NO
ﾋﾞｺｳ	: ｸﾎﾞﾀ ｻﾏ

- Average -
17.4 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	0.6
3	0.4	1.4
4	0.6	2.2
5	0.8	2.8
6	1.0	3.4
7	1.5	6.0
8	2.0	9.8
9	3.0	14.5
10	4.0	18.4
11	6.0	23.4
12	8.0	29.6
13	12.0	38.8
14	16.0	47.3
15	24.0	62.5
16	32.0	74.4
17	48.0	90.1
18	64.0	95.6
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 174 ◇ ｻﾝﾌﾟﾙ : ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ 10min

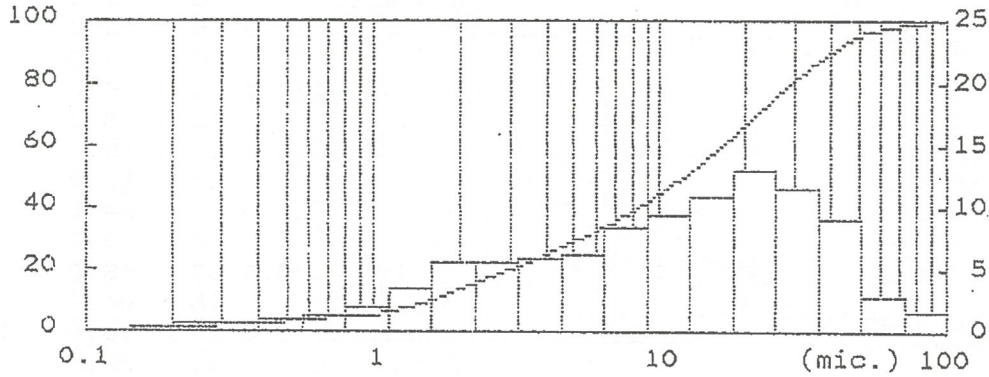
	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	8.5	49.5
0.2	0.6	0.5	22.7	77.0
0.4	1.4	0.8	34.0	88.0
0.6	2.2	0.8	40.8	92.0
0.8	2.8	0.6	44.5	93.5
1.0	3.4	0.6	47.3	94.4
1.5	6.0	2.6	56.2	96.5
2.0	9.8	3.8	65.4	98.0
3.0	14.5	4.7	73.4	99.0
4.0	18.4	3.9	78.1	99.3
6.0	23.4	5.0	82.4	99.6
8.0	29.6	6.2	86.1	99.8
12.0	38.8	9.2	90.1	99.9
16.0	47.3	8.5	92.6	99.9
24.0	62.5	15.2	95.9	100.0
32.0	74.4	11.9	97.7	100.0
48.0	90.1	15.7	99.3	100.0
64.0	95.6	5.5	99.8	100.0
96.0	100.0	4.4	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	17.4 mic.		1.2 mic.	0.1 mic.

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:175

ｻﾝﾌﾟﾙ	: ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ 20min ﾖﾋﾞ
ﾌﾞﾝｻﾝﾊﾞｲ	: H2O
ﾌﾞﾝｻﾝｼﾞｮｳｹﾝ	: U.S.W.60sec
ｿｸﾃｲﾋﾞ	: 2002/08/19
ｿｸﾃｲｼｬ	: T.SAKAI
ﾌﾙｲ	: シ タ
ｼｰﾌﾞｶｯﾄ (%)	: 0
ﾆﾝｲﾘｭｳｹｲ	: NO
ﾋﾞｺｳ	: ｸﾎﾞﾀ ｻﾏ

- Average -
12.1 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	0.9
3	0.4	2.2
4	0.6	3.4
5	0.8	4.4
6	1.0	5.4
7	1.5	8.9
8	2.0	14.0
9	3.0	20.2
10	4.0	25.5
11	6.0	32.1
12	8.0	39.3
13	12.0	49.7
14	16.0	58.8
15	24.0	73.6
16	32.0	84.1
17	48.0	95.2
18	64.0	97.9
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 175 ◇ ｻﾝﾌﾟﾙ : ｼｮｳｷｬｸﾊﾞｲ 20min

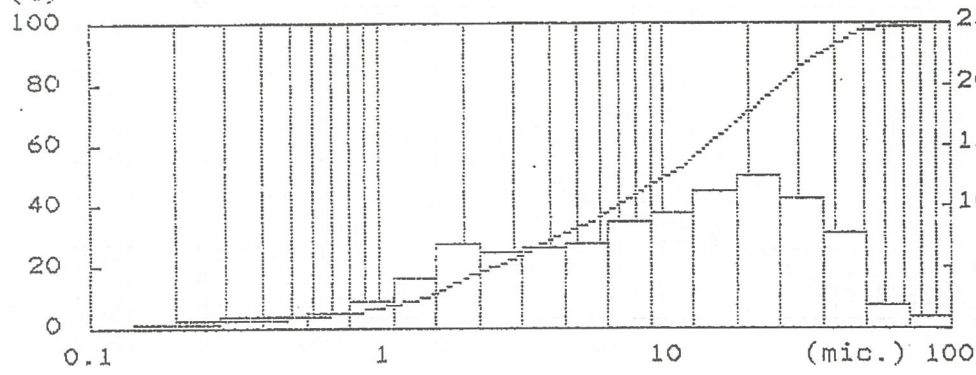
	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	6.3	38.5
0.2	0.9	0.8	23.0	72.6
0.4	2.2	1.3	36.7	86.5
0.6	3.4	1.2	44.2	91.1
0.8	4.4	1.0	48.7	93.1
1.0	5.4	1.0	52.2	94.3
1.5	8.9	3.5	61.0	96.4
2.0	14.0	5.1	70.1	98.0
3.0	20.2	6.2	77.9	99.0
4.0	25.5	5.3	82.7	99.4
6.0	32.1	6.6	86.8	99.7
8.0	39.3	7.2	90.1	99.8
12.0	49.7	10.4	93.3	99.9
16.0	58.8	9.1	95.4	99.9
24.0	73.6	14.8	97.7	100.0
32.0	84.1	10.5	98.9	100.0
48.0	95.2	11.1	99.8	100.0
64.0	97.9	2.7	99.9	100.0
96.0	100.0	2.1	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	12.1 mic.		0.9 mic.	0.1 mic.

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:176

サンプル : ショウキャクバイ 25min ヨビ
ブンサンバイ : H2O
ブンサンジョウケン : U.S.W.60sec
ソクテイビ : 2002/08/19
ソクテイシャ : T.SAKAI
フルイ : シ タ
シーブカット (%) : 0
ニンイリュウケイ : NO
ヒコウ : クボタ サマ

- Average -
10.4 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	0.9
3	0.4	2.3
4	0.6	3.5
5	0.8	4.7
6	1.0	5.7
7	1.5	9.8
8	2.0	16.0
9	3.0	23.0
10	4.0	28.9
11	6.0	36.2
12	8.0	43.7
13	12.0	54.2
14	16.0	63.5
15	24.0	77.9
16	32.0	87.7
17	48.0	97.2
18	64.0	99.0
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 176 ◇ サンプル : ショウキャクバイ 25min

	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	5.9	37.6
0.2	0.9	0.8	21.5	70.9
0.4	2.3	1.4	35.2	85.6
0.6	3.5	1.2	42.2	90.1
0.8	4.7	1.2	47.2	92.4
1.0	5.7	1.0	50.5	93.5
1.5	9.8	4.1	60.1	96.0
2.0	16.0	6.2	70.5	97.9
3.0	23.0	7.0	78.7	98.9
4.0	28.9	5.9	83.6	99.4
6.0	36.2	7.3	87.9	99.7
8.0	43.7	7.5	91.0	99.8
12.0	54.2	10.5	94.1	99.9
16.0	63.5	9.3	96.0	99.9
24.0	77.9	14.4	98.1	100.0
32.0	87.7	9.8	99.2	100.0
48.0	97.2	9.5	99.9	100.0
64.0	99.0	1.8	100.0	100.0
96.0	100.0	1.0	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	10.4 mic.		1.0 mic.	0.1 mic.

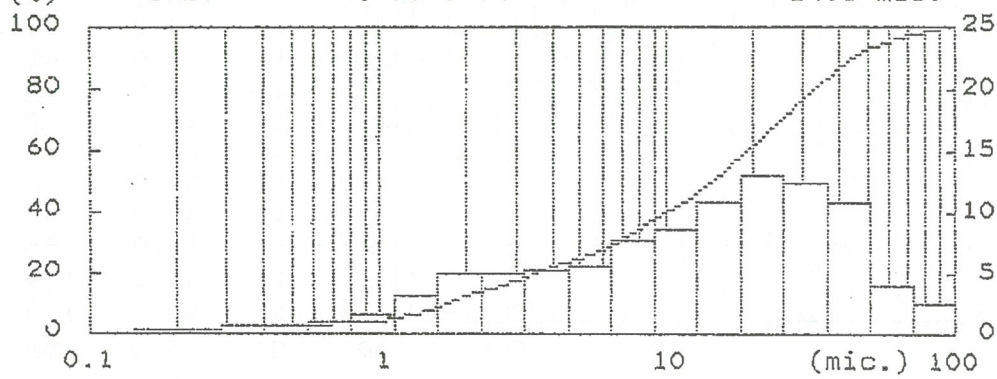
報告書No.200207-007 6/8

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:179

サンプル : ショウキャクバイ 5フン ホンフニサイ
ブンサンバイ : H2O
ブンサンジョウケン : U.S.W.60sec
ソクテイヒ : 2002/08/20
ソクテイシャ : T.SAKAI
フルイ : シ タ
シーブカット (%) : 0
ニンイリュウケイ : NO
ヒコウ : クボタ サマ

- Average -
14.5 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	0.8
3	0.4	1.9
4	0.6	2.8
5	0.8	3.6
6	1.0	4.3
7	1.5	7.6
8	2.0	12.2
9	3.0	17.7
10	4.0	22.3
11	6.0	28.1
12	8.0	34.8
13	12.0	44.6
14	16.0	53.4
15	24.0	68.3
16	32.0	79.5
17	48.0	92.8
18	64.0	96.8
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 179 ◇ サンプル : ショウキャクバイ 5フン ハ

	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	7.1	42.2
0.2	0.8	0.7	23.7	75.0
0.4	1.9	1.1	36.7	87.8
0.6	2.8	0.9	43.1	91.6
0.8	3.6	0.8	47.2	93.4
1.0	4.3	0.7	49.9	94.3
1.5	7.6	3.3	59.3	96.5
2.0	12.2	4.6	68.6	98.1
3.0	17.7	5.5	76.5	99.0
4.0	22.3	4.6	81.1	99.4
6.0	28.1	5.8	85.2	99.6
8.0	34.8	6.7	88.6	99.8
12.0	44.6	9.8	92.1	99.9
16.0	53.4	8.8	94.4	99.9
24.0	68.3	14.9	97.0	100.0
32.0	79.5	11.2	98.4	100.0
48.0	92.8	13.3	99.6	100.0
64.0	96.8	4.0	99.9	100.0
96.0	100.0	3.2	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	14.5 mic.		1.0 mic.	0.1 mic.

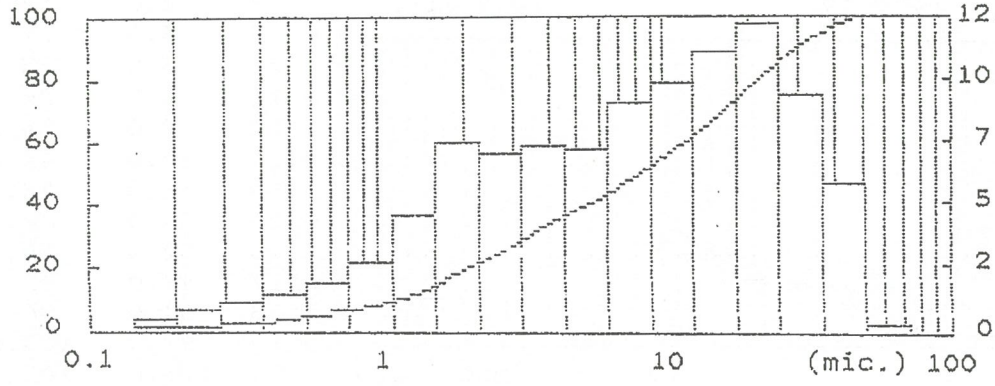
報告書No.200207-007 7/8

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:178

サンプル	:	ショウキャクバイ 10フン ホンフンサイ
ブンサンバイ	:	H2O
ブンサンジョウケン	:	U.S.W.60sec
ソクテイヒ	:	2002/08/20
ソクテイシャ	:	T.SAKAI
フルイ	:	シタ
シーブカット (%)	:	0
ニンイリュウケイ	:	NO
ヒコウ	:	クボタ サマ

- Average -
8.4 mic.



	MICRON	V %
1	0.1	0.1
2	0.2	1.0
3	0.4	2.8
4	0.6	4.5
5	0.8	6.1
6	1.0	7.6
7	1.5	12.1
8	2.0	18.8
9	3.0	26.7
10	4.0	33.2
11	6.0	41.0
12	8.0	48.8
13	12.0	59.7
14	16.0	69.1
15	24.0	83.2
16	32.0	92.3
17	48.0	99.7
18	64.0	100.0
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 178 ◇ サンプル : ショウキャクバイ 10フン ハ

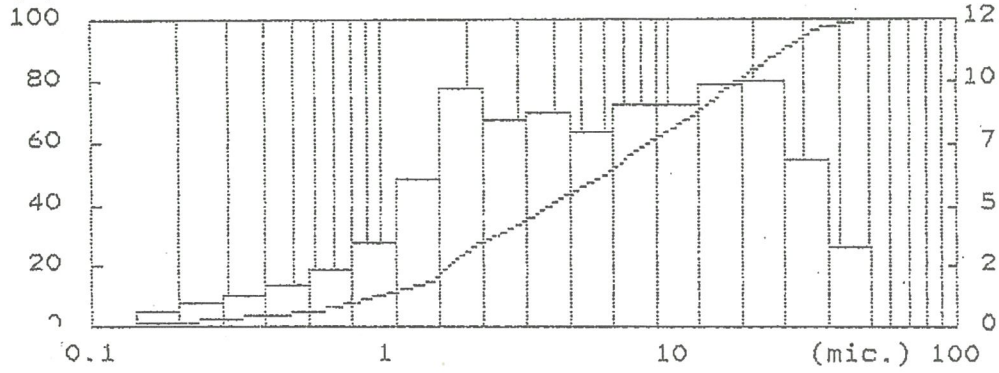
	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	5.1	33.5
0.2	1.0	0.9	20.3	67.0
0.4	2.8	1.8	35.5	83.7
0.6	4.5	1.7	44.1	89.4
0.8	6.1	1.6	49.9	92.1
1.0	7.6	1.5	54.1	93.7
1.5	12.1	4.5	63.2	96.1
2.0	18.8	6.7	72.9	97.9
3.0	26.7	7.9	81.0	99.0
4.0	33.2	6.5	85.7	99.4
6.0	41.0	7.8	89.6	99.7
8.0	48.8	7.8	92.4	99.8
12.0	59.7	10.9	95.2	99.9
16.0	69.1	9.4	96.9	100.0
24.0	83.2	14.1	98.7	100.0
32.0	92.3	9.1	99.5	100.0
48.0	99.7	7.4	100.0	100.0
64.0	100.0	0.3	100.0	100.0
96.0	100.0	0.0	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	8.4 mic.		0.8 mic.	0.1 mic.

SK LASER MICRON SIZER 7000S

REC.NO:177

サンプル : ショウキャクバイ 15フン ホンフンサイ
ブンサンバイリョウケン : H20 U.S.W.60sec
ソクテイビ : 2002/08/20
ソクテイシャ : T.SAKAI
フルイ : シ タ
シープカット (%) : 0
ニンイリュウケイ : NO
ヒコウ : クボタ サマ

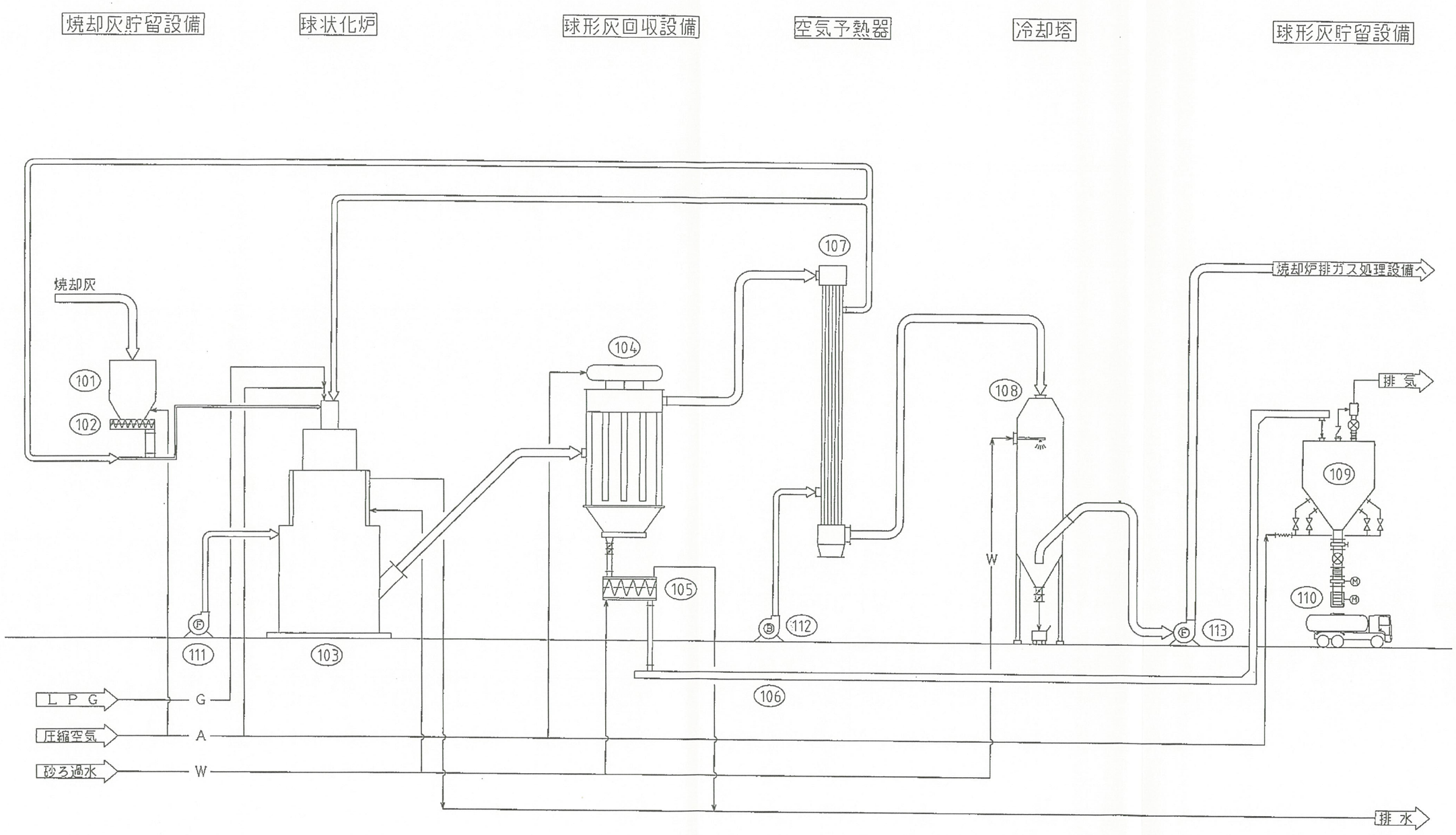
- Average - 5.9 mic.



	MICRON	V %
1	8.1	0.1
2	8.2	1.3
3	0.4	3.4
4	0.6	5.5
5	0.8	7.5
6	1.0	9.4
7	1.5	15.5
8	2.0	24.4
9	3.0	33.8
10	4.0	41.7
11	6.0	50.5
12	8.0	58.4
13	12.0	68.6
14	16.0	77.1
15	24.0	88.8
16	32.0	95.8
17	48.0	100.0
18	64.0	100.0
19	96.0	100.0
20	128.0	100.0
21	192.0	100.0

REC.NO. : 177 ◇ サンプル : ショウキャクバイ 15フン ハ

	V%	H%	S%	P%
0.1	0.1	0.1	4.2	28.3
0.2	1.3	1.2	21.0	66.1
0.4	3.4	2.1	35.7	82.7
0.6	5.5	2.1	44.5	88.6
0.8	7.5	2.0	50.5	91.5
1.0	9.4	1.9	55.0	93.2
1.5	15.5	6.1	65.2	95.9
2.0	24.4	8.9	75.9	98.0
3.0	33.8	9.4	83.8	99.0
4.0	41.7	7.9	88.5	99.5
6.0	50.5	8.8	92.2	99.8
8.0	58.4	7.9	94.6	99.9
12.0	68.6	10.2	96.8	99.9
16.0	77.1	8.5	98.0	100.0
24.0	88.8	11.7	99.3	100.0
32.0	95.8	7.0	99.8	100.0
48.0	100.0	4.2	100.0	100.0
64.0	100.0	0.0	100.0	100.0
96.0	100.0	0.0	100.0	100.0
128.0	100.0	0.0	100.0	100.0
192.0	100.0	0.0	100.0	100.0
AVERAGE	5.9 mic.		0.8 mic.	0.2 mic.



機器番号	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113
機器名称	焼却灰貯留ホッパ	焼却灰供給フィーダ	球状化炉	球形灰回収装置	球形灰排出コンベヤ	球形灰移送コンベヤ	空気予熱器	ガス冷却塔	球形灰貯留ホッパ	球形灰排出装置	冷却ファン	燃焼空気ブロワ	誘引ファン
仕様	鋼板製	スクリュー式	円筒立型炉	高温バグフィルタ	水冷ジャケット付	ケースコンベヤ	多管向流式	水噴射式	鋼板製	除塵ローダ	ターボファン	ターボブロワ	プレートファン
基数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

焼却灰球状化設備概略フローシート

焼却灰貯留設備　旋回式灰溶融炉　空気予熱器　冷却塔　バグフィルタ　スラグ貯留設備

焼却灰　101　102　※1　※2　103　104　105　106　107　108　109　110　111　112

噴霧空気　W　パルスエア　焼却炉排ガス処理設備へ　スラグコンベヤ

D　A O　A W　O A G

圧縮空気　O
L P G　A
灯　油　G
砂ろ過水　W

機器番号	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
機器名称	焼却灰貯留ホッパ	焼却灰供給フィーダ	溶融炉	空気予熱器	ガス冷却塔	バグフィルタ	スラグ貯留設備	燃焼空気ブロワ	湯口バーナファン	排ガス冷却ファン	排ガス抜出ファン	誘引ファン
仕　様	鋼板製	スクリュー式	旋回式灰溶融炉（無冷却式）	多管並流式	水噴射式	パルスジェット逆洗型	鋼板製カットゲート式	ターボブロワ	ターボファン	プレートファン	プレートファン	プレートファン
基　数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

旋回式灰溶融設備概略フローシート